

# MESTRADO PROFISSIONAL EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

## Caracterização físico-química de biocarvões com potencial para condicionador de solo

*Adson Lima de Oliveira*

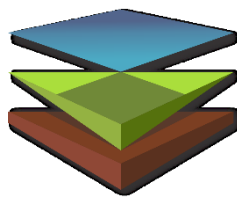
Serrinha - Bahia - Brasil - 2022



**INSTITUTO FEDERAL**

Baiano

Campus Serrinha



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO  
CAMPUS SERRINHA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ADSON LIMA DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE BIOCARVÕES COM POTENCIAL PARA  
CONDICIONADOR DE SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *campus* Serrinha, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Ciências Ambientais, para obtenção do título de Mestre.

**Orientador:** Dr. Antonio Hélder Rodrigues Sampaio  
**Coorientador:** Dr. Delfran Batista dos Santos

SERRINHA  
BAHIA - BRASIL  
2023

Catálogo: Fabiana A. Santos - CRB-5/1521  
IF Baiano, Campus Serrinha.

O48c Oliveira, Adson Lima de  
Caracterização físico-química de biocarvões com potencial para  
condicionador de solo. / Adson Lima de Oliveira. -- Serrinha, Ba, 2023.  
84p.  
II; Color.  
Trabalho de Conclusão de Curso (dissertação de mestrado profissional  
em ciências ambientais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Baiano - Campus Serrinha Ba.

Orientador: Dsc. Antonio Hélder Rodrigues Sampaio  
Co-orientador: Dsc. Delfran Batista dos Santos

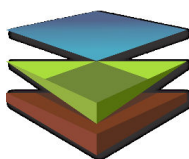
1. Biomassa 2. Pirose 3. fixação de carbono. I. Título.

CDU: 631.46



**Ministério da Educação**  
**Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica**  
**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano**  
**Campus Bom Jesus da Lapa**

**Declaração 28/2023 - B JL-CGE/BJL-DDE/BJL-DG/RET/IFBAIANO**



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO**  
**CAMPUS SERRINHA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE BIOCÁRVÕES COM POTENCIAL PARA  
CONDICIONADOR DE SOLO**

**Comissão examinadora da Defesa de Dissertação do discente Adson Lima de Oliveira**

Data da defesa: 28/07/2023

---

Dr. Antonio Hélder Rodrigues Sampaio

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano –*campus* Bom Jesus da Lapa  
(Orientador)

---

Dra. Maria Iraildes de Almeida Silva Matias

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano –*campus* Valença  
(Examinador Interno)

---

Dr. Cristovam Alves de Lima Junior

Documento assinado eletronicamente por:

- **Cristovam Alves de Lima Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** em 06/11/2023 16:37:12.
- **Maria Iraildes de Almeida Silva Matias, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** em 06/11/2023 16:00:54.
- **Antonio Helder Rodrigues Sampaio, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** em 06/11/2023 14:40:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifbaiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código** 508276  
**Verificador:** 13e9daf50c  
**Código de**  
**Autenticação:**



BR 349, Km 14, S/N, Zona Rural, BOM JESUS DA LAPA / BA, CEP 47600-000

Fone: (77) 3481-4513, (77) 3481-2521

## CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE BIOCARVÕES COM POTENCIAL PARA CONDICIONADOR DE SOLO

**Resumo:** O biocarvão é um produto obtido da pirólise de diferentes matérias-primas, que dependendo da sua composição e temperatura de preparo, possui elevada concentração de carbono, porosidade, superfície específica e minerais, que o destaca como um insumo com potencial para diversas aplicações. O objetivo deste estudo foi desenvolver biocarvões a partir da pirólise do resíduo do sisal, biomassa de nim, jurema e jurubeba e avaliar suas características físico-químicas como potencial para condicionador de solos. As biomassas foram coletadas em região de Caatinga no estado da Bahia e postas para secar ao ar, em pequenos pedaços, antes da carbonização. O processo de pirólise foi realizado em forno de ferro, com adaptação de um tambor de 200L, o qual foi acoplado uma chaminé na sua parte superior e no seu interior foi inserido um tambor de 50L com a função de armazenar a biomassa a ser pirolisada. Para cada tipo de biomassa, procedeu-se a pirólise em cinco repetições. Foram avaliados a temperatura, o tempo de carbonização e atributos físico-químicos das biomassas e dos biocarvões. Observou-se a influência direta da temperatura e tempo de pirólise e também da matéria-prima na produção dos biocarvões. A maior eficiência de pirólise foi do resíduo de sisal com 60,2% da sua biomassa transformada em biocarvão. Houve um aumento do pH após a carbonização de todas as biomassas e o maior valor foi observado para o biocarvão de nim com pH 10. As amostras de biomassa e biocarvão de Jurema destacaram-se com maior percentual de matéria orgânica total com 94% e 81% e maior teor de nitrogênio com 1,95% e 2,66%, respectivamente. A biomassa e biocarvão de jurubeba obtiveram maior valor de potássio com 3,63% e 1,88%, respectivamente, além de destacar com a maior capacidade de retenção de água com 124% de água disponível, em relação a sua massa. A biomassa do resíduo de sisal apresentou elevado valor de manganês com 294,2 mg kg<sup>-1</sup>, Zinco 84,40 mg kg<sup>-1</sup> e Cálcio 5,92%, enquanto no biocarvão, houve um acréscimo para estes minerais com valores de 334,0 mg kg<sup>-1</sup>, 134,10 mg kg<sup>-1</sup> e 10,61%, respectivamente. Conclui-se que as diferentes biomassas apresentam potencial para produção de biocarvões, e sua qualidade depende principalmente do processo de pirólise e da fonte de biomassa utilizada. Os biocarvões analisados apresentaram características físicas e químicas com potencial para serem condicionadores de solos.

**Palavras-chave:** biomassa, pirólise, fixação de carbono.

## PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERIZATION OF BIOCHAR WITH POTENTIAL FOR SOIL CONDITIONER

**ABSTRACT:** Biochar is a product obtained from the pyrolysis of different raw materials, which, depending on its composition and preparation temperature, has a high concentration of carbon, porosity, specific surface and minerals, which highlights it as an input with potential for various applications. The objective of this study was to develop biochars from the pyrolysis of sisal residue, neem, jurema and jurubeba biomass and evaluate their physicochemical characteristics as potential soil conditioners. The biomasses were collected and left to air dry, in small pieces, before carbonization. The pyrolysis process was carried out in an iron furnace, with the adaptation of a 200L drum, which had a chimney attached to its upper part and a 50L drum was inserted inside with the function of storing the biomass to be pyrolyzed. For each type of biomass, pyrolysis was carried out in five repetitions. The temperature, carbonization time, physical-chemical attributes of biomass and biochars were evaluated. The direct influence of the pyrolysis temperature and time and also of the raw material on the production of biochars was observed. The highest pyrolysis efficiency was for sisal residue with 60.2% of its biomass transformed into biochar. There was an increase in pH after carbonization of all biomasses and the highest value was observed for neem biochar with pH 10. Jurema's biomass and biochar samples stood out with the highest percentage of total organic matter with 94% and 81 % and highest nitrogen content with 1.95% and 2.66%, respectively. Jurubeba biomass and biochar obtained the highest potassium value with 3.63% and 1.88%, respectively, in addition to having the highest water retention capacity with 124% of available water, in relation to its mass. The biomass of sisal residue presented a high value of manganese with 294.2 mg kg<sup>-1</sup>, Zinc 84.40 mg kg<sup>-1</sup> and Calcium 5.92%, while in biochar, there was an increase for these minerals with values of 334.0 mg kg<sup>-1</sup>, 134.10 mg kg<sup>-1</sup> and 10.61%, respectively. It is concluded that different biomasses have potential for producing biochars, and their quality depends mainly on the pyrolysis process and the source of biomass used. The biochars analyzed presented physical and chemical characteristics with the potential to be soil conditioners.

**Keywords:** biomass, pyrolysis, carbon fixation.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>07</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b>	<b>11</b>
2.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
<b>3.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>12</b>
3.1.	Efeito do biocarvão sobre o solo	13
3.2.	Características químicas do biocarvão	14
3.3.	Características físicas do biocarvão	16
3.4.	Características Biológicas dos biocarvões	17
3.5.	Caracterização de biomassas utilizadas no estudo	18
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>20</b>
4.1.	Local e aspectos gerais do ensaio	20
4.2.	Identificação, seleção, obtenção, padronização do material para pirólise	21
4.3.	Produção, caracterização e análises das amostras de biomassa para a pirólise	21
4.4.	Morfologia e Anatomia dos materiais	24
4.5.	Construção do forno para pirólise para produção de biocarvão	25
4.6.	Procedimento da Pirólise lenta	26
4.7.	Análises das biomassas e dos biocarvões do resíduo de sisal, jurema, jurubeba e nim	28
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>32</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização física das biomassas e biocarvões</b>	<b>32</b>
5.2.	Caracterização química das biomassas e biocarvões	44
5.2.1.	pH	44
5.2.2.	Relação C/N	46
5.2.3.	Matéria Orgânica	47
5.2.4.	Macronutrientes	49
5.2.5.	Micronutrientes	58
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>61</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>62</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O biocarvão é o nome estabelecido para a biomassa carbonizada que é usada como condicionador de solos (GRABER, 2009). O interesse de se investigar o biocarvão surgiu a partir dos estudos de fertilidade dos solos conhecidos como “Terra preta de índios” que são solos de origem antropogênica onde existiam aldeias antigas de índio e agrupamentos muito antigos na Amazônia (LEHMANN et al., 2006). Os cientistas descobriram que essa fertilidade é devida a grande quantidade de carbono pirogênico, ou seja, da biomassa pirolisada que possui alta estabilidade, podendo permanecer no solo por um longo período de tempo, ou seja, milhares de anos, que condiciona o aumento da fertilidade do solo por períodos muito prolongados (BALLIET, 2007; REZENDE et al., 2011).

A estrutura do biocarvão é amplamente composta por Carbono aromático com vários graus de condensação, que aumenta com a temperatura de pirólise. Além disso, estruturas alifáticas estão presentes juntamente com grupos funcionais. A proporção geral de estruturas alifáticas para aromáticas diminui com o aumento da temperatura de pirólise (PRESTON e SCHMIDT, 2006; FUERTES et al., 2010; GASKIN et al., 2008; KOOKANA et al., 2011; MCBEATH e SMERNIK, 2009; NGUYEN et al., 2010; SINGH et al., 2014).

Entre as principais funções dos biocarvões está a propriedade de estocar carbono no solo, ou seja, a partir do sequestro de carbono atmosférico para o crescimento de plantas e conseqüentemente formação de biomassa, a qual pode servir como matéria prima para produção de biocarvão pirolisado e ter o carbono das suas estruturas estabilizado no solo em um prazo muito longo. Além disso, o biocarvão através das últimas pesquisas realizadas tem apontado incremento da qualidade do solo como: aumentando a capacidade de retenção de água, retenção de nutrientes, quando aplica fertilizantes em locais que concentram o biocarvão, a quantidade de perda de nutrientes por lixiviação é menor. Também apresentam a propriedade de atividade microbológica, ou seja, a vida microbiana do solo parece ser estimulada pela presença do biocarvão. Existem alguns trabalhos atualmente publicados que indicam que até por alguns componentes que existem nesse material, a exemplo do etileno que promove o crescimento das plantas (EMBRAPA, 2012).

Outra propriedade muito importante do biocarvão, além de estocar carbono no solo presente na sua constituição, é a capacidade de reduzir a emissão de outros gases

de efeito estufa, a exemplo do óxido nítrico e metano, conforme relatado por Lehmann et al. (2006). Por todas essas características que o biocarvão é considerado uma tecnologia carbono negativa, pois não neutraliza a emissão dos gases, mas, reduz a sua emissão. Um importante efeito do biocarvão como condicionador de solos é mitigar o efeito de sais no solo retendo cátions como  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^+$  (ATKINSON et al., 2010; AKHTAR et al., 2015). Em regiões com limitação de qualidade da água, a exemplo do Nordeste brasileiro, onde muitas vezes os produtores utilizam água salina para irrigação com condutividade elétrica acima de  $2,0 \text{ dS m}^{-1}$  (OLIVEIRA et al., 2011), o uso de biocarvão pode reduzir os impactos causados pela salinidade (HUANG et al., 2019) e permitir uma produção agrícola mais sustentável, reduzindo as reações fisiológicas como efeito osmótico, toxicidade iônica e desequilíbrio nutricional e a redução da capacidade produtiva (DIAS et al., 2016).

O biocarvão é produzido por pirólise (BRIDGWATER e PEACOCKE, 2002; DEMIRBAS e ARIN, 2002) e, até certo ponto, também pode ser um subproduto da gaseificação (BRIDGWATER, 2005). A pirólise é a decomposição química de materiais orgânicos por aquecimento na ausência de oxigênio (NAKASHIMA, 2016).

O produto pirolisado tem fontes muito diversificadas, sendo que cada tipo de matéria-prima pode apresentar um biocarvão com características diferentes. As pesquisas estão destinadas a descobrir os diferentes tipos de matéria-prima, a estabilidade de cada biocarvão, ou seja, por quanto tempo o carbono pode permanecer no solo e por quanto tempo a melhoria da fertilidade pode ser mantida durante os ciclos de produção.

Além dos resíduos gerados pela indústria siderúrgica (finas partículas de carvão vegetal), diversos subprodutos originados de atividades agrícolas podem ser utilizados como matéria prima para produção do biocarvão. Atualmente a Embrapa tem desenvolvido um projeto em rede, com mais de 12 unidades envolvidas nessa pesquisa, sendo pesquisado como matérias-primas resíduos florestais, o aguapé da região pantaneira, bagaço da cana de açúcar, o babaçu na região Norte, a casca de arroz no Centro-Oeste, e outras diversas pesquisas estão em curso pelo País (INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, 2012; SHENBAGAVALLI e MAHIMAIRAJA, 2012).

Na escolha de biomassa para utilização como componentes de substratos para produção de biocarvão, o resíduo do sisal (*Agave sisalana* Perrine), originário do desfibramento da folha da agave, desponta como uma opção promissora, podendo ter viabilidade econômica, além de uma destinação com perspectiva ambiental, pois, há

grande descarte por parte das indústrias. Assim, é importante avaliar a aplicação desse resíduo na forma de biocarvão com finalidade agrícola, averiguando suas características físico-químicas, dosagens e capacidade de melhoramento do solo e mitigação dos impactos no uso da água salina no cultivo agrícola.

A jurema preta *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir é uma árvore de pequeno porte, comumente encontrada no nordeste brasileiro, o caule, normalmente é revestido de espinhos esparsos nas partes mais novas, podem também, não apresentar espinhos. As folhas são compostas por pequenos folíolos, com qualidade forrageira na alimentação de aves, ruminantes. As flores dispostas em inflorescências (alvas) do tipo espiga e apresentam potencial apícola, os frutos e as sementes, apresentam fonte alimentícia para insetos, aves e roedores nos períodos secos (NEMA, 2019). As cascas secas e trituradas e o extrato alcoólico são usados na medicina popular regional para ação, antibacteriana, anti-inflamatória, antimicrobiana, antiespasmódica e cicatrizante. A madeira serve para estacas, lenha e carvão de elevado poder calorífico ( $4.150 \text{ Kcal m}^{-3}$ ) (EMBRAPA, 2010). Essa planta foi relatada pelos indígenas como efeitos visionários e afrodisíacos. Religiões de matrizes africanas também utilizam em cerimoniais. Além de suas propriedades em rituais espirituais, com a intenção de servir como enteógeno, assim oportunizar a concepção e a ampliação dos sentidos. Inclusive, há relatos de pajés indígenas que usavam a Jurema para efeitos afrodisíacos e visionários (GASPAR, 2009).

A *Solanum paniculatum* L. (*Solanaceae*) com nomes populares: jurubeba, jurupeba, juripeba, jubeba, juvena, juina ou juna (CORREIA, 1984) é utilizada na medicina popular (COIMBRA, 1958), sendo uma planta nativa das regiões norte e nordeste do Brasil (MAPA, 2010). As formas de consumo desta hortaliça vão desde a infusão de folhas, frutos e flores, suco com as raízes e frutos até o consumo dos frutos em forma de conservas, ou cozidos junto com outros alimentos, segundo a Farmacopeia dos Estados Unidos do Brasil (1959). Como planta medicinal tem grande potencial terapêutico e, assim, são avaliadas sua constituição, tais como taninos, ligninas, flavonoides, alcaloides, triterpenos, sesquiterpenos (HAUSTEEN, 1983) e objetivo de variados estudos, como a viabilidade e a germinabilidade polínica de populações de jurubeba (SANTOS NETO et al., 2006); a ausência de mutagenicidade (RIBEIRO et al., 2009); a análise da atividade antioxidante (RIBEIRO et al., 2007); a potencialidade anti-helmintico das raízes em ovinos do semiárido (VILELA et al., 2009); a atividade

antibacteriana e prospecção fitoquímica do extrato da raiz (LOBÔ et al., 2010) dentre outros.

O nim (*Azadirachta indica* A. Juss) tem origem asiática, Meliaceae, natural de Burma e das regiões áridas da Índia (SAXENA, 1983). O nim também é conhecido por neen, nime, lila, margosa, índio, ou ainda por *Melia azadirachta* L., *Melia indica* (A. Juss.) Brandis e *Antelaea azadirachta* (L.) Adelb. (KOUL et al., 1990). Há séculos, na Índia, é utilizada como medicinal, sombreadora e atualmente como inseticida, na produção de madeira e cosmético. Segundo Martinez (2002), é conhecida há cinco séculos e tem atuação significativa contra mais de 430 espécies de pragas que afetam vários países, combatendo múltiplos danos, tais como: interrupção do desenvolvimento e da ecdise, repelência, declínio no desenvolvimento, diminuição na fertilidade e fecundidade, e diversas alterações comportamentais e fisiológicas dos insetos que podem ocasioná-los ao extermínio. Além disso, estudos evidenciaram que pode ser empregada como vermífugo, na cura da diabetes, problemas dermatológicos, anti-séptico, tônico, malária, combate a sarna, pulga e diferentes enfermidades (MARTINEZ, 2002).

A biomassa pirolisada é um produto obtido por muitas metodologias e sua qualidade é condicionada de cada técnica e do material em que o processo é aplicado (SOHI et al., 2010). Sendo assim, a adequada composição química e estrutural é dependente da matéria-prima utilizada e das condições de pirólise. Para Sohi et al. (2010), o biocarvão apenas deve ser utilizado quando existir potencial para melhorar a qualidade do solo, a produtividade agrícola e contribuir para a mitigação da emissão de gases do efeito estufa a longo prazo.

O uso de biocarvão propicia baixo impacto ambiental, sendo que, a partir de sua utilização é possível reciclar uma grande quantidade de resíduos agrícolas e mitigar as mudanças climáticas por sua capacidade de sequestrar carbono. Os resíduos de beneficiamento são aqueles provenientes das operações de desfibramento, lavagem, secagem, batadura e seleção de fibras que correspondem a mais de 90% da planta e ainda tem pouco uso sendo geralmente despejados ou abandonados no campo (BRASIL, 1983). Os subprodutos do sisal, que praticamente não são aproveitados, podem ter várias aplicações tecnológicas: ações biocidas com relação à insetos (BARRETO et al., 2010), à nematoides em caprinos e ovinos (DOMINGUES et al., 2010; BOTURA et al., 2013), nematoides em plantas (DAMASCENO et al., 2015; JESUS et al., 2015).

Na literatura, alguns artigos que citam a produção de biocarvão a partir de resíduos orgânicos urbanos sólidos (restos de podas de árvores, lodo de esgoto), resíduos agrícolas (restos de culturas, bagaço e palha de cana-de-açúcar), resíduos industriais (da indústria de papel e celulose), ou materiais de origem animal como ossos e esterco) (AGUIAR e FERRAZ, 2011; LABEGALINI, 2013; LORENZ e LAL, 2014; GALINATTO et al., 2011), contudo há ainda, carência em trabalhos com biocarvão de biomassa de resíduos de sisal, nim, jurema e jurubeba com as suas características e composição. A motivação desse trabalho foi contribuir com o desenvolvimento de tecnologias referentes à utilização de resíduos e biomassas proporcionando maior estabilização do carbono orgânico em solos (HANKE, 2020), a partir de reator de pirólise confeccionado com baixo custo de produção e que pudesse ser preconizado para a agricultura familiar, com o intuito de fortalecer a autonomia da pequena propriedade rural.

## **2. OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste estudo foi desenvolver biocarvões a partir da pirólise do resíduo do sisal, biomassa de nim, jurema e jurubeba e avaliar suas características físico-químicas como potencial para condicionador de solos.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar o processo de pirólise quanto ao tipo de forno, temperatura e tempo de queima para produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa;
2. Caracterizar a granulometria, densidade aparente e umidade das biomassas e dos biocarvões de sisal, nim, jurubeba e jurema;
3. Medir a eficiência de processo de pirólise na produção de biocarvão de cada biomassa utilizada;
4. Avaliar macro e micronutrientes das diferentes biomassas e biocarvões;
5. Avaliar o potencial de retenção de água de cada biocarvão.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Estudos a respeito das mudanças climáticas relatam, em sua grande maioria, o acúmulo na atmosfera da quantidade de gases causadores do efeito estufa e mudanças na propriedade da superfície da terra, os quais alteram o equilíbrio energético do sistema climático (IPCC, 2007). Neste contexto a conversão de biomassa para biocarvão, seguida pela sua aplicação no solo, aumenta o tempo de residência do carbono quando comparado à aplicação direta da biomassa orgânica (MACHADO, 2005; SOHI et al., 2010; PETTER e MADARI, 2012; MAYER et al., 2014).

Nos países em desenvolvimento, foi reconhecida a necessidade de uma estratégia dupla de manejo da fertilidade do solo, agricultura de conservação e sequestro de carbono (C) no solo (LAL, 2004). Biocarvão tem o potencial de fornecer uma variedade de resultados de sustentabilidade, incluindo sequestro de carbono (C), fertilidade do solo melhorada, mitigação de efeitos externos de agroquímicos e energia renovável (LEHMANN, 2007).

As escolhas de matéria-prima para a produção de biocarvão são direcionadas pela disponibilidade de biomassa, pela necessidade de melhoramento do solo ou pela demanda de energia (DIAZ et al., 1986). Até recentemente, o paradigma era que o carvão de ocorrência natural (semelhante a certas formas de biocarvão) depositado no solo é relativamente inerte e estável por milênios e pode servir como um sumidouro para o C atmosférico (SCHMIDT e NOACK, 2000; FORBES et al., 2006; PRESTON e SCHMIDT, 2006; CZIMCZIK e MASIELLO, 2007). Se o carvão depositado pelos incêndios na vegetação fosse inerte, os reservatórios de carbono (C) da Terra seriam totalmente convertidos em biocarvão em menos de 100.000 anos (GOLDBERG, 1985; DRUFFEL, 2004).

Embora fragmentos de biocarvão ainda estejam na região da Amazônia ao longo dos séculos passou por várias mudanças e tornou-se macroscopicamente irreconhecível, enquanto enriquecia o solo com nutrientes e presentes nos férteis solos de cor escura da Terra Preta da Amazônia milhares de anos após o fim das práticas de corte e queima na região, a maioria das partículas de biocarvão altamente aromáticas presentes nesses solos não são mais reconhecíveis como estruturas físicas (GLASER et al., 2001; GLASER et al., 2002).

A maior parte do biocarvão aplicado e incorporado ao solo ainda está alterando as propriedades do solo. Alterações nas propriedades do solo foram registradas para

diferentes solos aos quais o biocarvão foi adicionado e incluem o aumento da capacidade de troca catiônica e do pH (LIANG et al., 2006; CHENG et al., 2008), criando locais hidrofóbicos (RUMPEL et al., 2006) e aumentando os locais de adsorção para micróbios (BALDOCK e SMERNIK, 2002; HAMER et al., 2004; HOCKADAY et al., 2006; HOCKADAY et al., 2007), minerais (BRODOWSKI et al., 2005) ou pesticidas (SMERNIK et al., 2006). Idealmente, o biocarvão no solo deve ser estável o suficiente (ou seja, mudar física, química e biologicamente em um ritmo lento o suficiente para fornecer benefícios de longo prazo ao meio ambiente, como os solos ricos em biocarvão da Terra Preta (LEHMANN, 2007).

As diversas fontes de biomassa com potencialidade para produção do biocarvão possui particularidades intrínsecas, como a composição química, isto é, conteúdos de celuloses, lignina, hemiceluloses, extrativos. A configuração e estruturação dos materiais varia, e também o seu comportamento durante a pirólise. Assim, o produto alcançado exibe propriedades físico-químicas que dependem da composição do material de origem, variando quanto a porosidade, superfície particular, capacidade de troca catiônica, pH, etc. O atributo do biocarvão terá efeito nos resultados da sua aplicação ao solo. Assim como, distintos solos exibirão diversas respostas. E ainda, implicações dos biocarvões sobre múltiplos cultivos pode ser diferenciado (FREITAS, 2011).

Conhecer a extensão e as implicações das mudanças sofridas pelo biocarvão adicionado ao solo é vital para entender a contribuição que o mesmo pode fazer para a melhoria do solo e o manejo sustentável do solo no futuro (BROWN et al., 2006).

### **3.1. Efeito do biocarvão sobre o solo**

Uma vez introduzido no solo, o biocarvão pode transformar várias propriedades químicas e físicas do solo. Dependendo da biomassa e do processo de carbonização, o biocarvão pode fornecer expressivamente como fonte de nutrientes (KOOKANA et al., 2011). Determinados biocarvões atuam como adsorventes de nutrientes, o que oportuniza elevada eficiência da adubação (MADARI et al., 2010). Se a matéria-prima exibe porosidade apropriada, pode colaborar para a retenção de água, e se o pH similarmente o for, o biocarvão pode promover a atividade e aumentar a diversidade biológica do solo, hospedando actinomicetos, fungos, microfauna e outros organismos benéficos. Para as melhores condições dos atributos de importância agrônômica do biocarvão, a pirólise pode ser advinda ou sucedida por múltiplos tratamentos químicos, físicos ou biológicos. (LEHMANN et al., 2011). Logo objetivam, através dos tratamentos,

a aquisição de material com excelente superfície específica, porosidade e o desenvolvimento das composições químicas com grupos funcionais, o que proporcionará máxima capacidade de troca iônica ou o enriquecimento com nutrientes do biocarvão (EMBRAPA, 2009).

O sistema de pirólise, particularmente o método de ativação, tem influência na natureza física dos biocarvões. O grau de influência que tem, no entanto, depende da matéria-prima utilizada, com diferentes matérias-primas produzindo resultados diferentes.

Pastor-Villegas et al. (2006) constataram que a influência do método de reação de carbonização na estrutura não microporosa não é significativa quando a matéria-prima é madeira de eucalipto, enquanto há diferenças consideráveis quando a matéria-prima é a madeira azinheira. Ao estudar biocarvão, é essencial observar a matéria-prima, as condições de preparação e os métodos de análise usados para garantir que conclusões significativas sejam tiradas e que possam ser comparadas com as de outros estudos (PASTOR-VILLEGAS et al., 2006).

### **3.2. Características químicas do biocarvão**

No processo de pirólise, os aspectos químicos são relevantes devido à grande variação da estrutura química dos matéria-prima lignocelulósica e também pela falta de compreensão nos procedimentos das reações químicas, já que durante a carbonização a lignina, celulose, hemicelulose dos vegetais e seus derivados sofrem diversas reações.

O processo de pirólise é compreendido pelas fases: a) desidratação ocorre de 50 a 150°C, período endotérmico onde moléculas livres de água e orgânicos voláteis são destituídos; b) degradação da hemicelulose, inicia 150°C e tem o pico de perda de massa em torno de 275°C é uma etapa exotérmica que gera produtos voláteis tais como óxidos de carbono; c) deterioração da celulose ocorre entre 280 a 500°C com pico de 350°C é uma fase endotérmica; d) degradação da lignina, presente entre 200 a 500°C e liberação máxima de energia em torno de 365°C um processo exotérmico lento (BRIDGWATER, 2001; TACCINI, 2010). A lignina tem um função acentuada na composição final dos biocarvões. Além de ser o último elemento a se desintegrar na biomassa. De tal modo, por exemplo, matéria-prima lenhosa origina biocarvões ásperos, resistentes, e elevados teores de C (acima de 80%) do que as espécies herbáceas. O processo de pirólise tem como resultado as estruturas similares ao grafite, baixa relação H/C e O/C e, assim,



reduzidos grupos funcionais orgânicos. Logo, sofre expressiva ação de desidratar, descarboxilar e condensar. (EMBRAPA, 2009).

Além da matéria-prima, as condições do processo, principalmente temperatura de tratamento (calor) mais alta, e a pressão parcial de O<sub>2</sub>, vapor e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) controlam as quantidades de cinzas minerais no biocarvão (BRIDGWATER e BOOCOOCK, 2006). Durante a degradação térmica, os íons de potássio (K) e cloro (Cl) são altamente móveis e começarão a vaporizar em temperaturas relativamente baixas (YU et al., 2005).

O cálcio (Ca) está localizado principalmente nas paredes celulares e ligado a ácidos orgânicos (MARSCHNER, 1995). O silício (Si) está presente nas paredes celulares como sílica ou como opala fitólitos (MARSCHNER, 1995). Tanto o Ca quanto o Si são liberados durante a degradação em temperaturas muito mais altas do que K e Cl (BOURKE, 2006). O magnésio (Mg) está ligado ionicamente e covalentemente com moléculas orgânicas e só vaporiza em altas temperaturas. O fósforo (P) e o enxofre (S) estão associados a compostos orgânicos complexos dentro da célula e são relativamente estáveis em baixas temperaturas de degradação. O nitrogênio (N) está associado a várias moléculas orgânicas diferentes e pode ser liberado em temperaturas relativamente baixas (SCHNITZER et al., 2007). Outros elementos como o ferro (Fe) e o manganês (Mn) existem em uma número de formas orgânicas e inorgânicas na biomassa e são amplamente retidos durante a formação do biocarvão.

Minerais encontrados em biocarvões incluem silvita (KCl), quartzo (SiO<sub>2</sub>), sílica amorfa, calcita (CaCO<sub>3</sub>), hidroxiapatita (Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>) e outras fases menores, como fosfatos de Ca, anidrita (CaSO<sub>4</sub>), vários nitratos e óxidos e hidróxidos de Ca, Mg, Al, titânio (Ti), Mn, zinco (Zn) ou Fe. A sílica amorfa é de particular interesse, pois normalmente está na forma de fitólitos que contêm e protegem a planta C da degradação (WILDING et al., 1967; KRULL et al., 2003; SMITH e WHITE, 2004; PARR e SULLIVAN, 2005; PARR, 2006).

### **3.3. Características físicas do biocarvão**

A configuração de origem da pluralidade das matérias-primas lignocelulósicas influencia no biocarvão, principalmente se não for condicionada a carbonização muito rigorosas, e, assim, interfere intensamente suas propriedades estruturais, tais como a microporosidade e macroporosidade (TOPOLIANTZ et al., 2006). Logo as composições aromáticas vão gradativamente se classificando com a ampliação da temperatura e

umentando a superfície específica do material, em virtude da perda de alcatrão e extrativos e em suas cavidades porosas (ETIÉGNI e CAMPBELL, 1991). Concomitantemente, quando eleva a temperatura a microporosidade também aumenta. As características físicas do biocarvão dependem não somente da matéria-prima e condições de pirólise, mas, também, do manuseio antes e depois da carbonização (DOWNIE et al., 2009), o que pode levar a fraturas e rachaduras do material.

Como biochar é um termo usado para se referir ao sólido de alto C formado como resultado da pirólise da matéria orgânica, o material pode ter se originado de uma gama diversificada de materiais de biomassa. A estrutura original da maioria dos tipos de materiais é impressa no produto biochar (Laine et al., 1991) uma influência avassaladora em suas características físicas e estruturais finais. Durante a pirólise, a massa é perdida (principalmente na forma de compostos orgânicos voláteis) e ocorre uma quantidade desproporcional de encolhimento ou redução de volume. Portanto, durante a conversão térmica, o mineral e o esqueleto C formado retêm a porosidade rudimentar e estrutura do material original. As estruturas celulares residuais de origem botânica que estão presentes e são identificáveis em biocarvões de madeiras e carvões de todos os níveis contribuem com a maior parte da macroporosidade presente (WILDMAN et al., 1991).

Confirmando isso, a análise de microscopia de carvão fisicamente ativado ilustrou a presença de grupos de poros alinhados em forma de favo de mel na ordem de 10 µm de diâmetro, provavelmente o esqueleto carbonáceo da estrutura capilar biológica da matéria-prima (LAINE et al., 1991). Esses poros de tamanho grande servem como um alimentador para poros de menor dimensão (isto é, meso e microporos) (FUKUYAMA et al., 2001; MARTÍNEZ et al., 2006; ZABANIOTOU et al., 2008).

### **3.4. Características Biológicas dos biocarvões**

As características químicas e físicas de diferentes biocarvões adicionarão outra camada de complexidade às interações da cadeia alimentar do solo, alterando a disponibilidade de matéria orgânica solúvel e particulada (substratos), nutrientes minerais, pH, agregação do solo e a atividade de enzimas extracelulares e, portanto, afetará a diversidade, abundância e distribuição das comunidades microbianas associadas. (BRUUN et al., 2011; LUO et al., 2013; STEINBEISS et al., 2009; ZIMMERMAN et al., 2011) Estudos com doses do biocarvão indicam aumento da fertilidade do solo e manutenção ou favorecimento da vida microbiológica do mesmo (SANTOS, 2013). Many (2012) afirma que biochar com elevada área superficial

específica e porosidade pode favorecer a capacidade sorção do solo e o aumento da biomassa microbiana do mesmo.

Pesquisas no Japão e estudos recentes nos Estados Unidos mostraram que o biocarvão estimula a atividade de uma variedade de microrganismos do solo importantes para a agricultura e pode afetar muito as propriedades microbiológicas dos solos (OGAWA et al., 1983; PIETIKÄINEN et al., 2000). A presença e a distribuição do tamanho dos poros no biocarvão fornecem um habitat adequado para muitos microrganismos, protegendo-os da predação e dessecação e fornecendo muitas de suas diversas necessidades de carbono (C), energia e nutrientes minerais (SAITO e MURAMOTO, 2002; WARNOCK et al., 2007). Com o interesse em usar biocarvão para promover a fertilidade do solo, muitos estudos científicos estão sendo conduzidos para entender melhor como isso afeta as propriedades físicas e químicas dos solos e sua adequação como habitat microbiano (CASTALDI et al., 2011; ZAVALLONI et al., 2010).

As associações mutualísticas entre raízes de plantas e microrganismos, como com os fungos arbusculares micorrízicos (AM) e o fungo (*Glomeromycota*) (ROBSON et al., 1994) ou as bactérias rizóbios fixadoras de nitrogênio (N<sub>2</sub>); ou por meio de interações tróficas resultando na excreção de nutrientes por alimentadores secundários, como protozoários e nematóides (BRUSSAARD et al., 1990). Cheng et al. (2006) afirma que atividade microbiana do solo afeta fortemente a função do solo e, conseqüentemente, o crescimento e a produtividade das culturas. O ambiente físico e químico do biocarvão pode alterar muitas dessas atividades biológicas (DEMPSTER et al., 2012).

### **3.5. Caracterização de biomassas utilizadas no estudo**

A Jurema, *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. é classificada como árvore e arbusto de acordo com a Flora do Brasil (2018) alcançando de 3 a 6m. Copa rala e globosa com folhas de um tom mais escuro de verde. Apresenta caule rugoso com espinhos retos; casca fina, pouca áspera e de coloração cinza amarronzada com estrias avermelhadas e lenticelas amareladas (SILVA et al., 2011). A disposição das folhas (filotaxia) de modo alterno, folhas bipinadas com dois a quatro pares de pinas e 15 a 22 pares de folíolos por pina (SILVA et al., 2011). As flores são brancas a creme, pequenas, sésseis e monóicas. Possui Inflorescência axilar em forma de espiga e pedúnculo curto (SILVA et al., 2011). Frutos secos, craspédio não estipitado, de superfície reticulada e ondulada, glabro (CORDULA; MORIN; ALVES, 2014). Sementes pleurogramáticas, com o pleurograma apical-basal. Região hilar subterminal, funículo filiforme e longo. Embrião

axial, invaginado ou criptorradicular com eixo hipocótilo-radícula reto e plúmula indiferenciada. (CORDULA; MORIN; ALVES, 2014).

A Jurema é uma espécie mais promissora como fonte sustentável e de produção energética na Caatinga, em decorrência a suas densidades, dominâncias absolutas e relativa serem substancialmente elevadas em analogia as demais espécies regionais. Além disso, o elevado poder calorífico, a densidade, o reduzido teor de cinzas e carbono fixo faz com que a jurema seja apontada para a produzir energia (CALIXTO, 2020). O máximo volume de biomassa coletado para a Jurema Preta é em torno de 15 anos, podendo variar de talhão pra talhão, sendo necessário o estudo de acordo com o local a ser aplicado o manejo (CARVALHO, 2018).

A jurubeba *Solanum paniculatum*, família Solanaceae, porte arbustivo com altura variando de 3 a 5 metros (Brasil, 2010), ramos pilosos e com acúleos (espinhos); folhas simples, pecioladas, até 15 cm de comprimento; ovaladas ou lanceoladas, com a margem lobada ou inteira; com acúleos cônicos; flores esbranquiçadas a violetas, agrupadas em panículas terminais, de cor branca ou levemente arroxeadas; As flores esbranquiçadas são agrupadas em panículas terminais, possuem cinco pétalas unidas, de cor violeta-pálido; cinco anteras amarelas, poricidas, vistosas e tubulosas, dispostas como um cone ao redor do estigma; o estigma é capitado e o estilete os frutos são do tipo bagas, globosos, com cerca de 1,0-1,5 cm de diâmetro e de sabor amargo. (FORNI-MARTINS et al., 1998). É encontrada principalmente em lavouras, pastagens, beiras de estradas, rios e terrenos baldios (COSTA, 1975). Tem preferência por solos bem drenados. Por ser uma planta rústica e resistente à seca, é própria de clima tropical e subtropical. Devido à sua rusticidade, a planta adapta-se a diversos tipos de solo e não é exigente em fertilidade (BRASIL, 2010).

O nim é uma árvore de crescimento rápido, podendo alcançar de 10 a 20 m de altura, com tronco semiereto a reto, marrom-avermelhado, duro e resistente, de 30 a 80 cm de diâmetro, e apresentando um sistema radicular que pode atingir profundidade de até 15 m. Sua copa pode variar de 8 a 12 m. Suas folhas são alternadas, com frequência aglomerada nos extremos dos ramos simples e sem estípulas e com folíolos de coloração verde-clara intensa (SODEPAZ, 2006). Suas flores são brancas ou de cor creme e aromáticas, reunidas em inflorescências densas, de cerca de 25 cm de comprimento, encontrando-se tanto flores masculinas como hermafroditas na mesma planta. Seu fruto é uma baga ovalada que apresenta cor verde-clara durante seu desenvolvimento inicial, e se tornando amarelado, com polpa macia e amarga quando

madura. Sua semente apresenta uma casca dura, porém fina, de coloração branca, contendo em seu interior a semente propriamente dita, de coloração marrom. (SODEPAZ, 2006).

A planta tem sido disseminada em várias cidades brasileiras, sendo introduzida no paisagismo de casas e edifícios, bem como em ruas, avenidas e praças (SOTO; DIAZ; RAMIREZ, 2014). As podas realizadas não têm uma finalidade específica. Além disso, tem uma brotação intensa quando podada. Ocasionalmente uma grande e constante necessidade de insumos e mão de obra para a manutenção (LUNDGREN; SILVA; ALMEIDA, 2013).

O Sisal (*Agave sisalana* Perr.) é uma planta monocárpica, perene, plurianual e semixerófila. (MEDINA, 1954; SILVA e BELTRÃO, 1999; ABREU, 2010; TRELIM, 2015). O período do ciclo vegetativo é de 8 a 10 anos. Apresenta dois tipos de raízes, uma para fixação da planta ao substrato e outra para absorção de nutrientes. O sistema radicular tem formato de tufo, peculiar das monocotiledôneas, fasciculado, fibroso. Tem um pseudocaule suculento revestido de lignina, onde as folhas e o broto terminal se inserem e acumulam nutrientes e água (SILVA et al., 2008). As folhas possuem rigidez, com desenho linear lanceolada, ausente de pecíolo, de coloração verde escuro com 10 cm a 15 cm de largura e comprimento entre 120 cm a 160 cm. A superfície é côncava com um único acúleo na terminação da folha. Sua epiderme é composta por uma cutícula cerosa. A inserção da folha no pseudocaule tem configuração espiral ascendente, formando rosetas. Durante o ciclo tem produção de 200 a 250 folhas, pesando entre 400 g e 700 g, contém média de 1000 a 1200 fios de fibras (BELTRÃO, 2006; SILVA et al., 2008). A flor é hermafrodita agrupada em cachos localizados na extremidade de cada ramificação da panícula; a frutificação ocorre quando há decapitação do pedúnculo floral (GONDIM e SOUZA, 2009).

O sisal (*agave sisalana*) tem em sua composição química celulose, hemicelulose, lignina, pectina e ceras (ANSELL e MWAIKAMBO, 2002; MEGGIATO JR., 2007; MARTIN et al., 2009). A hemicelulose que predomina é constituída de xiloses. As fibras de sisal aparecem em formas de feixe, com comprimentos que variam de 50 cm a 180 cm. A fibra tem a composição lignocelulósicas (HOLANDA, 2013). De acordo com Medina (1954), a fibra é constituída por 65,8% de celulose, 12% de hemicelulose, 9,9% de lignina e 0,8% de pectina. Já para Ansell e Mwaikambo (2002), encontraram: 73% de celulose, 13% de hemicelulose, 11% de lignina e 2% de pectina.

A fibra representa 3% a 5% do peso da folha. Os resíduos do beneficiamento correspondem 97% a 95% restantes. Sendo a principal fibra dura produzida no mundo, portanto, quase 70% da produção comercial de todos os filamentos desse tipo (HOLANDA, 2013). São constituídas de fibras ou fibrilas que possui de 1,5 mm a 4,0 mm de comprimento e, sua parede celular apresenta várias camadas com diferentes estrutura e composição química.

O desfibramento das folhas de sisal apresenta um subproduto que tem fonte alternativa para o insumo farmacêutico, produção do biogás, utilizado na construção civil. A biomassa adquirida, após a remoção da fibra, representa 98% da planta e pode ter como finalidades a incorporação ao solo para aumentar a fertilidade e também para alimentação do rebanho. O suco produzido, durante o desfibramento apresentou altos valores de açúcar. Assim, a glicose encontrada foi de 11,02 g L<sup>-1</sup>, frutose 28,37g L<sup>-1</sup> e sacarose 1,73 g L<sup>-1</sup>, e ainda a inulina, materiais com elevadas potencialidades farmacológicas (FAO, 2015) e a hecogenina - precursor na síntese de corticoesteróides (CALLOW et al., 1951; ZULLO et al., 1989). A elevada concentração de carboidratos no resíduo do sisal elucida a pretensão de sua utilidade na fermentação, e assim, gerar bioprodutos e biocombustíveis, tais como: butanol, biodiesel, metanol, fenol, detergentes, ésteres, adoçantes saudáveis, etc. O sisal por sua infinita versatilidade apresenta potencialidades para biorrefinarias para confecção de biocombustíveis, bioprodutos e eletricidade (LIU e HU, 2008).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Local e aspectos gerais do ensaio**

O experimento foi realizado no IF Baiano, *campus* Serrinha, estado da Bahia, situado no Território de Identidade do Sisal, região do semiárido baiano, incluída no denominado “Polígono das Secas”, no período de março de 2022 a março de 2023 (SEI, 2022). O clima é semiárido, seco a subúmido com longos períodos de estiagem ou escassez de chuvas que variam anualmente de 250 a 500mm. A vegetação divide-se nos tipos caatinga arbórea aberta, com palmeiras e caatinga floresta estacional (CPRM, 2005).

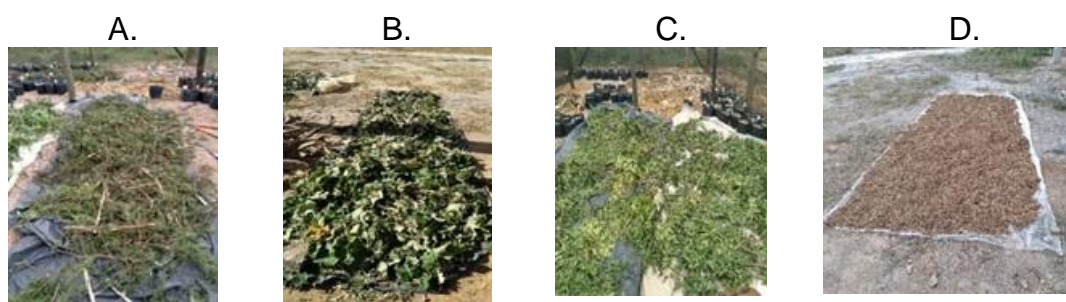
A maior parte dos solos da região do estudo é classificado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, fase caatinga e hipoxerófila, com relevo

plano a suavemente ondulado, localizado nas coordenadas de latitude 11°40'51,95"S, longitude 38°59'01101"O e altitude de 359m.

#### 4.2. Identificação, seleção, obtenção, padronização do material para pirólise

As estruturas vegetais da biomassa de jurema, nim e jurubeba foram colhidas no IFBaiano no *campus* Serrinha, enquanto o resíduo do sisal foi recolhido da comunidade de Riacho Fundo no município de Retirolândia – Bahia, a partir de produtores locais. Nessa fase, a jurema apresentou pouco aspecto florístico e nenhuma vagem. A jurubeba apresentou aspectos vegetativos e reprodutivos. O nim não tinha floração nem frutificação. Para a produção de biocarvões esses detalhes podem ocasionar alterações devido a constituição de elementos, bem como suas estruturas.

As diferentes biomassas foram espalhadas e revolvidas para reduzir e uniformizar a umidade conforme demonstrada na Figura 1.



**Figura 1.** Ramos de jurema expostos para perda de umidade (A); Ramos de jurubeba expostos para perda de umidade (B); Ramos de nim expostos para perda de umidade (C) e Resíduos de sisal expostos para perda de umidade (D)

Fonte: Autoria própria, 2022.

#### 4.3. Produção, caracterização e análises das amostras de biomassa para a pirólise

Para a caracterização das partes das biomassas de nim, jurema e jurubeba foi utilizado paquímetro para dimensionar circunferências, comprimentos dos ramos, folhas, inflorescências e frutificações. Na Figura 2, observa-se a circunferências dos ramos da jurema com tamanhos entre 0,13 e 0,93 cm para circunferência menor e maior, respectivamente. Já o comprimento variou de 5 a 21 cm. Na Figura 3, representa a jurubeba, cuja menor circunferência encontrada foi de 0,3 cm e maior de 1,14 cm. Já o

comprimento variou entre o maior 7 e 42 cm. Na Figura 4, são apresentadas as medidas do nim, com circunferência variando entre 0,19 a 1,38 cm. Enquanto, o comprimento estabelecido foi entre 13 e 36 cm. A biomassa de sisal foi caracterizada como um resíduo extraído a partir da retirada das fibras das suas folhas e sua constituição apresenta-se como fragmento de pequenas partículas fibrosas, as quais foram quantificadas a sua granulometria.



**Figura 2.** Partes vegetais utilizadas como parâmetros para o processo de pirólise da Jurema  
 Fonte: Autoria própria, 2022.





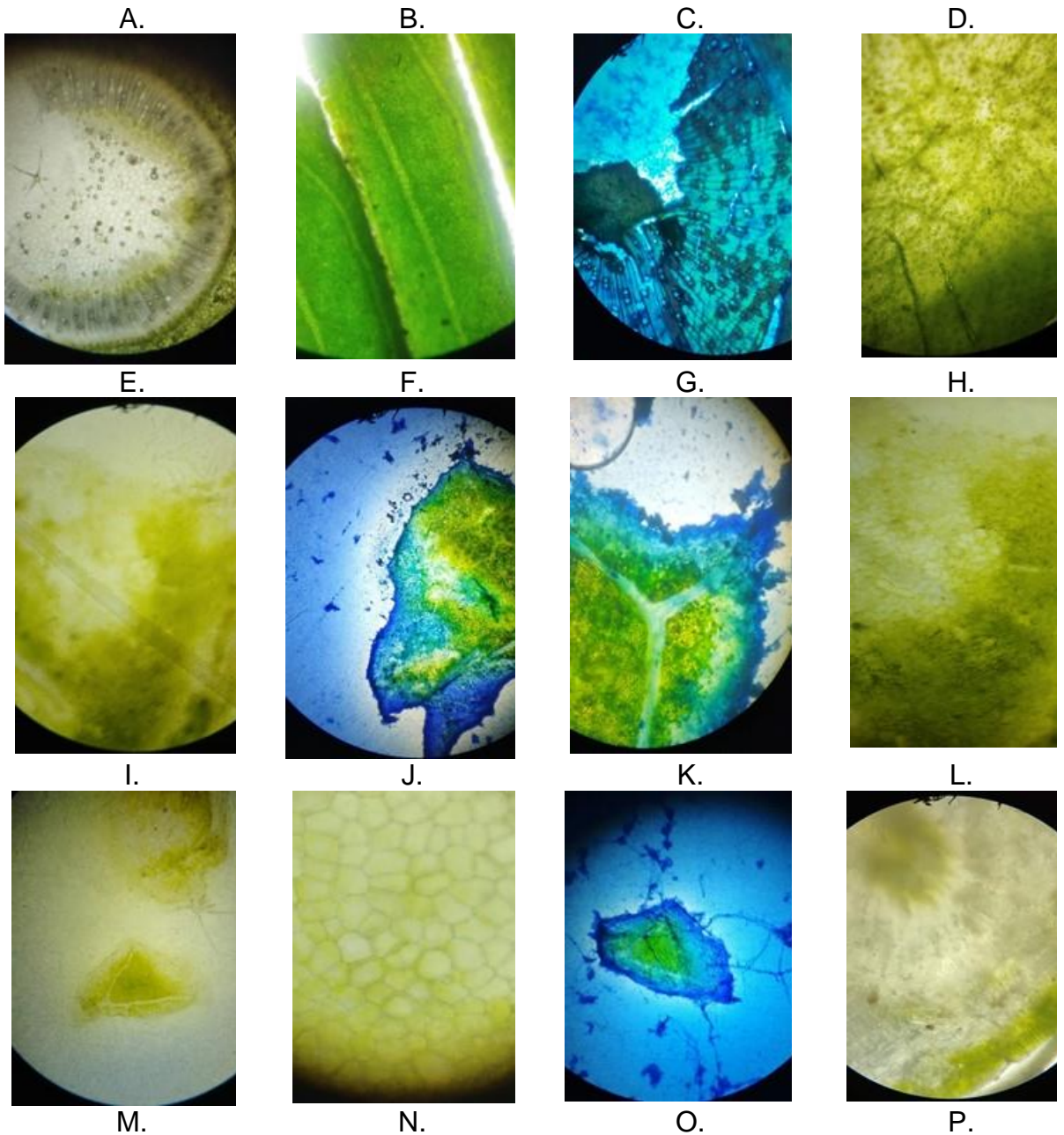
**Figura 3.** Partes vegetais utilizadas como parâmetros para o processo de pirólise da Jurubeba  
 Fonte: Autoria própria, 2022.

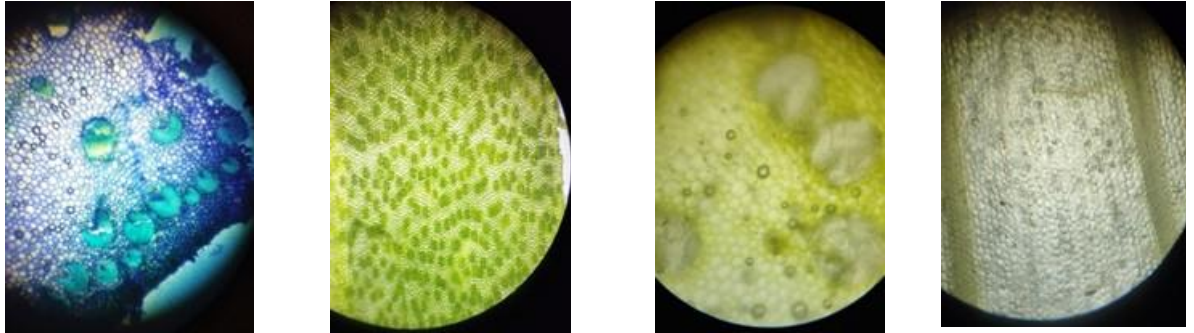


**Figura 4.** Partes vegetais utilizadas como parâmetros para o processo de pirólise do Nim  
 Fonte: Autoria própria, 2022.

#### 4.4. Morfologia e Anatomia dos materiais

As análises das partes vegetais, sua organização, composição oportunizam uma diferenciação na biomassa, e por conseguinte nos biocarvões produzidos (Por exemplo: os fitólitos presentes e responsáveis por diversos mecanismos e funções). Na Figura 5 observa-se a visão microscópica das células vegetais da Jurema, jurubeba, do nim e sisal.





**Figura 5.** Corte longitudinal do caule de jurema (A); corte transversal da folha de jurema (B); corte transversal do caule de jurema (C); corte longitudinal da folha de jurema (D); corte transversal do caule de jurubeba (E); corte transversal da folha de jurubeba (F); corte longitudinal da folha de jurubeba (G); corte longitudinal do caule de jurubeba (H); corte transversal da folha de nim (I); corte transversal do caule de nim (J); corte longitudinal da folha de nim (K); corte longitudinal do caule de nim (L); corte longitudinal da folha de sisal com uso de azul de metileno (M); corte transversal da folha de sisal (N); corte longitudinal da folha de sisal (O) e corte transversal da folha de sisal (P)

Fonte: Autoria própria, 2023.

#### **4.5. Construção do forno para pirólise para produção de biocarvão**

O forno artesanal utilizado para pirólise (Figura 6) foi confeccionado a partir de um modelo da Iniciativa Internacional de Biocarvão (IBI), sendo um tambor cilíndrico de ferro com capacidade de 200L, sobre o qual foi adaptada uma chaminé construída de zinco, dividida em dois compartimentos cilíndricos interligados e de diâmetros diferentes. A chaminé desenvolve a função crucial de distribuição do calor e direcionamento da fumaça em apenas uma direção. Esta estrutura pode ser adaptada para aproveitamento da fumaça com possibilidades de produção de extrato pirolenhoso como subproduto de forma a evitar emissões de gases para a atmosfera.





**Figura 6.** Imagem do forno para pirólise com indicação dos pontos de medição da temperatura  
Fonte: Autoria própria, 2023.

Além do tambor de 200L e a chaminé na parte superior, também compõem o forno, outro tambor menor de capacidade de 50L, o qual acomoda a matéria-prima a ser pirolisada. Este tambor interno foi confeccionado a partir de um choppeira de inox, com adaptação na tampa superior para inserção de resíduo de sisal, permitindo fechamento após cheio, com total vedação da tampa, utilizando barro, para garantir internamente a temperatura ideal e sem a presença de oxigênio.

#### **4.6. Procedimento da Pirólise lenta**

Para a produção do sólido pirolisado (biocarvão), procedeu-se a queima separadamente para cada fonte de biomassa. Estas fontes de matéria-prima foram inseridas no tambor menor de 50L (Figura 7A) e o material de combustão (madeira de demolição ou restos de poda) foi adicionado abaixo e dos lados preenchendo o espaço entre os tambores interno e externo formando uma câmara de ignição (Figura 7E). Nesta etapa, utilizou-se barro em torno da tampa para fechar a choppeira, tambor menor (Figura 7E) e assim, produzir o biocarvão sem presença de oxigênio nem perda de calor

(Figuras 7E, 7F, 7G e 7H). O mesmo procedimento foi repetido com as amostras de biomassa de jurema (Figura 7B), jurubeba (Figura 7C) e nim (Figura 7D).

Inicialmente foram testados tempos diferentes de queima e avaliados o percentual das biomassas carbonizadas. Após a calibração de melhor tempo para pirólise, procedeu-se as produções dos biocarvões com resíduo de sisal, jurema, jurubeba e nim. (Figuras 7 I, K, L e M). Para o tempo total de combustão e efetivação do processo de produção do biocarvão de resíduo de sisal foi verificado que 1 hora e 45 minutos foram suficientes. Já os materiais lenhosos tiveram o processamento reduzido em 1 hora e 20 minutos para a produção completa.



**Figura 7.** Adição de resíduo de sisal no tambor de chopp (A); adição de biomassa de Jurema no tambor de chopp (B); adição de biomassa de jurubeba no tambor de chopp (C); adição de biomassa de nim no tambor de chopp (D); inserção de material de combustão na câmara de ignição e vedação com barro (E); forno em processo de pirólise lenta para a carbonização das biomassas (F, G, H); produção de biomassa pirolisada do resíduo de sisal (I); produção de biomassa pirolisada de jurema (J); produção de biomassa pirolisada de jurubeba (K); e produção de biomassa pirolisada de nim (L)

Fonte: Autoria própria, 2022

#### 4.7. Análises das biomassas e dos biocarvões do resíduo de sisal, jurema, jurubeba e nim

As análises realizadas nas biomassas e nos biocarvões (Figura 8) do resíduo de sisal, jurema, jurubeba e nim foram as seguintes: temperatura de queima, teor de umidade, granulometria, densidade, análise retenção de água e análises de composição físico-química.



**Figura 8.** Biomassas antes e após a carbonização lenta

Fonte: Autoria própria, 2023

A temperatura de carbonização das biomassas foi medida a cada 20 minutos com termômetro de infravermelho, em 7 pontos distintos do forno de pirólise, conforme indicação da Figura 6.

Resíduo do Sisal



Jurema



Jurubeba



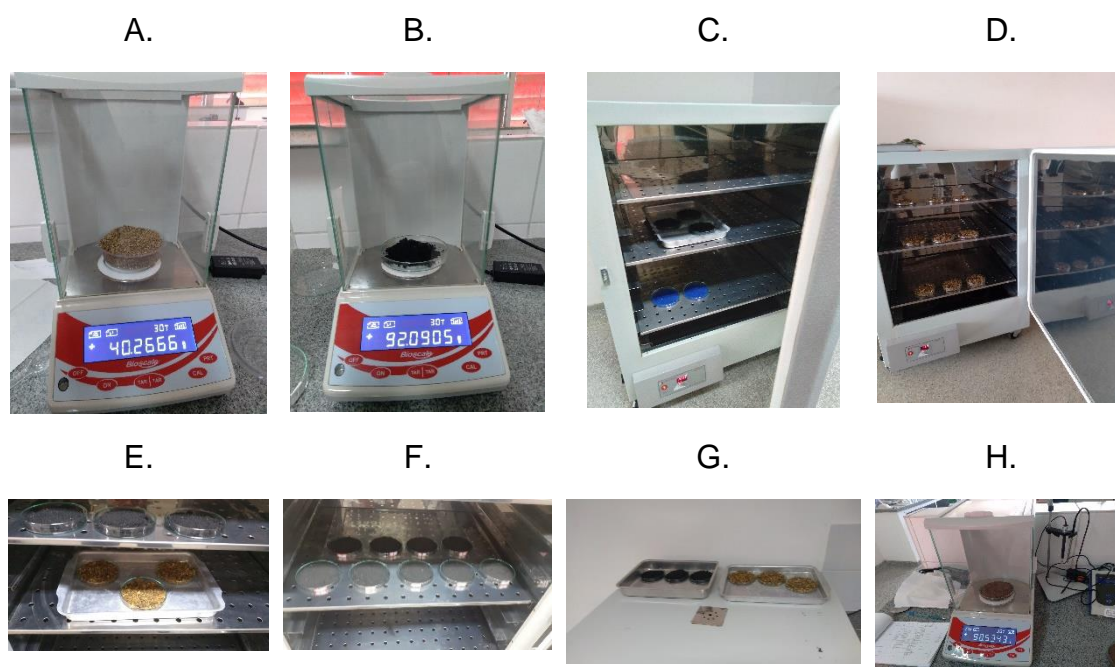
Nim



**Figura 9.** Rendimentos de biocarvão após a carbonização lenta

Fonte: Autoria própria, 2022.

O biocarvão produzido foi resfriado a temperatura ambiente por 25 minutos. Após a obtenção do biocarvão, a primeira análise realizada foi da avaliação do teor de umidade, da biomassa de resíduo de sisal, jurema, jurubeba e nim antes e após a pirólise, a partir de uma amostra em triplicata para cada forno produzido. Em uma balança analítica foi realizada a pesagem das amostras com a umidade residual e após 48 horas mantido em estufa de ar seco em temperatura calibrada de 105 °C (Figura 10).



**Figura 10.** Avaliação do teor de umidade das biomassas e dos biocarvões. A – Pesagem em balança de precisão das biomassas; B - Pesagem em balança de precisão dos biocarvões; C – Amostra do biocarvões na estufa a 105°C; D- Amostras das biomassas na estufa a 105°C; E – Após 48 horas foram retiradas as



amostras de biomassas. F–Após 48 horas foram retiradas as amostras dos biocarvões. G e H – Amostras das biomassas e dos biocarvões retiradas e submetidas a pesagem para mensurar os valores obtidos  
Fonte: Autoria própria, 2022

Após a realização das pesagens e obtenção dos valores antes e depois da inserção das amostras na estufa, o teor de umidade foi calculado a partir da equação:

$$\text{Umidade (\%)} = \left( \frac{\text{Peso úmido} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \right) * 100$$

A caracterização granulométrica das partículas de biomassa e biocarvões de Jurema (Figuras 11A e 11B), Jurubeba (Figuras 11C e 11D), Nim (Figuras 11E e 11F), resíduo de Sisal (Figuras 11G e 11h) foram realizadas com peneiras de solo de malhas de  $\leq 0,149$  mm, 0,149 mm, 0,212 mm, 0,297 mm, 0,425 mm, 0,59mm, 0,85mm, 1,19mm, 1,68mm, 2,38mm, 3,36mm, 4,76mm, 6,35mm e 9,52mm, sendo peneiradas amostras em triplicatas com massa de aproximadamente 3,7 kg para biocarvões e 0,8 kg para as biomassas por processo de pirólise e pesadas separadamente cada quantidade retida na peneira e quantificada o percentual.



**Figura 11A.** Granulometria da amostra de biomassa de da Jurema



**Figura 11B.** Granulometria do biocarvão da biomassa de Jurema



**Figura 11C.** Granulometria da amostra de biomassa de Jurubeba



**Figura 11D.** Granulometria do biocarvão da biomassa de Jurubeba





**Figura 11E.** Granulometria da amostra de biomassa de Nim



**Figura 11F.** Granulometria do biocarvão da biomassa de Nim



**Figura 11G.** Granulometria da amostra de biomassa de Resíduo de sisal



**Figura 11H.** Granulometria do biocarvão da biomassa de Resíduo de Sisal

Fonte: Autoria própria, 2022

Para a realização da medida de densidade das biomassas e biocarvões foram utilizadas o método da pipeta, adaptado da metodologia da Embrapa (2017) para solos arenosos. Utilizou-se uma proveta de 100 ml, preenchida em três etapas com biomassas ou biocarvões, com ajuda de 10 batidas no fundo da proveta, por etapa, para acomodação das partículas, até completar o seu volume total. Ao final a massa de biomassas ou biocarvões, equivalente ao volume da pipeta foi quantificada em balança analítica (Figuras 12A e 12B) e determinada conforme equação abaixo:

$$D_s = \frac{m. s. p}{V_p}$$

Sendo:

Ds – densidade; m.s.p – passa seca da partícula; Vp – volume da proveta.



**Figura 12.** Medida de densidade do resíduo (A); e medida de densidade do biocarvão (B)

Fonte: Autoria própria, 2022

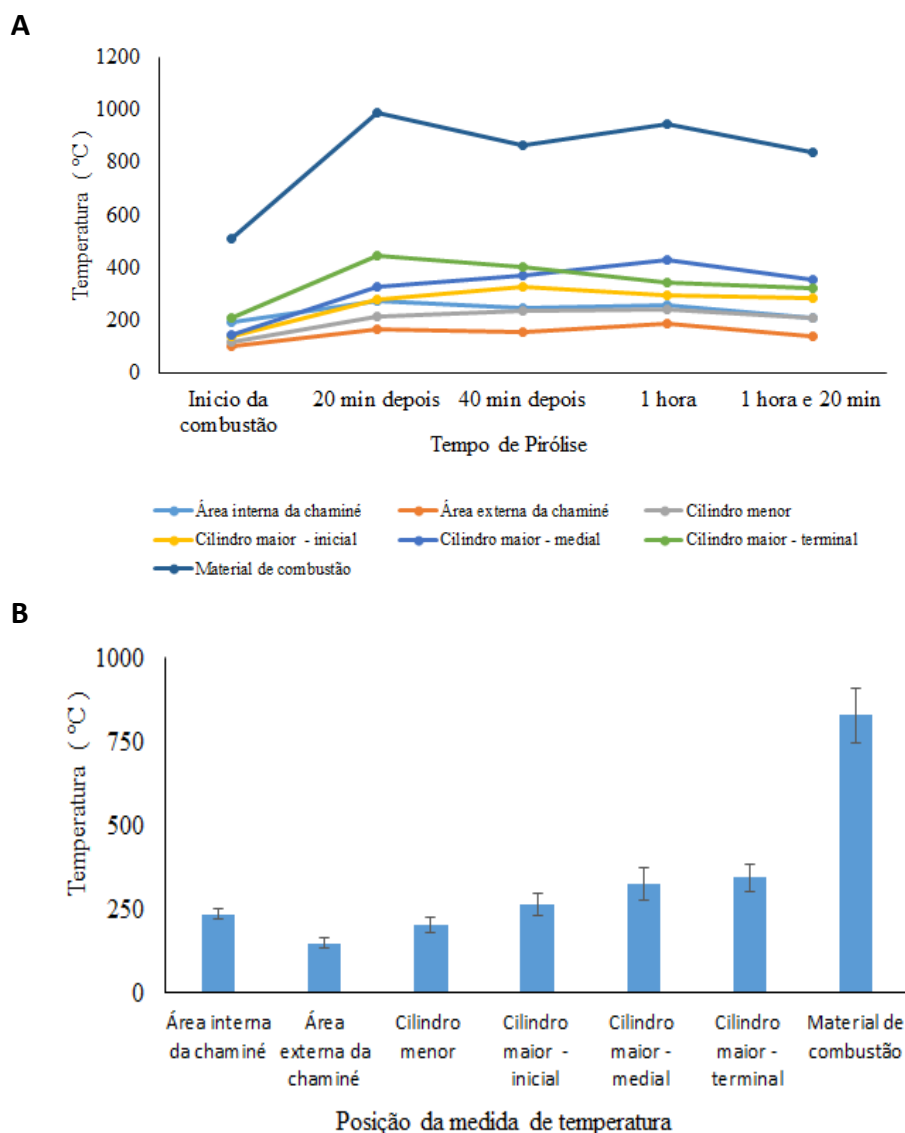
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização física das biomassas e biocarvões

Na Figura 13 A e B, observa-se a distribuição de calor no forno de pirólise durante a carbonização do resíduo de sisal. A temperatura aumenta após o início da ignição e após 20 minutos registrou valores já elevados. Observou-se que a temperatura variou de acordo ao local de medição, sendo elevadas no orifício que dá acesso a posição do material de combustão, chegando a valores médios 991°C. Nas demais posições a distribuição da temperatura apresenta-se mais uniforme variando de 120 a 450°C. A área externa da chaminé manteve os valores menores com média de 235 °C, oposta ao local do material de combustão ou câmara de ignição que manteve a maior concentração calorífica apresentando uma média de 829°C.

Vários pesquisadores descreveram a natureza evolutiva do resíduo carbonáceo obtido quando a biomassa lignocelulósica é termicamente degradada sob várias condições (ANTAL e GRØNLI, 2003; KERCHER e NAGLE, 2003; PARIS et al., 2005; SKODRAS et al, 2006; STRESOV et al, 2007). Conforme descrito por Paris et al. (2005), quatro etapas ou processos de mudança (desidratação, pirólise, nucleação do grafeno e carbonização) são observadas em condições não hidrotermais. Com taxas de aquecimento muito lentas aproximadamente 2°C min<sup>-1</sup> e pressão quase ambiente, as transições entre as etapas ocorrem em cerca de 250°C, 350°C e 600°C. Em taxas de

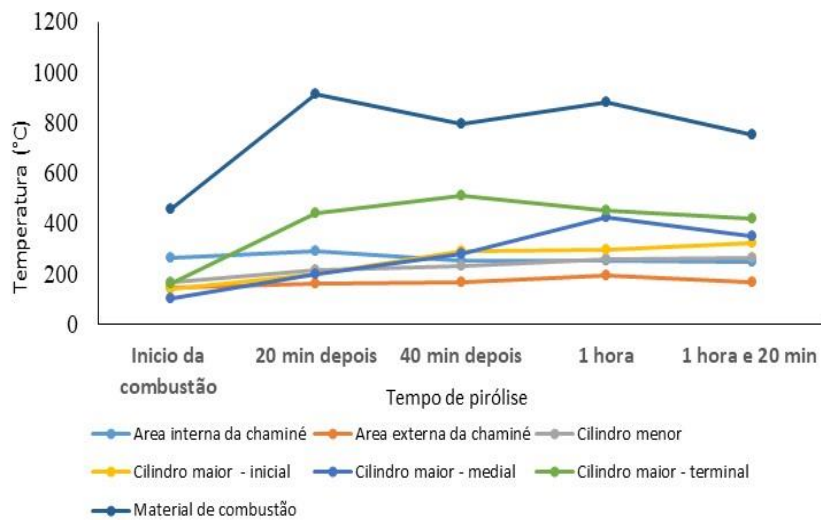
aquecimento mais rápidas, essas transições ocorrem em temperaturas mais altas devido a limitações de transferência de calor e massa. Na primeira etapa (ou seja, em temperaturas abaixo de 250°C), as principais mudanças na matéria-prima são a desidratação e a leve despolimerização da celulose. Observa-se pouca perda de massa. Entre 250°C e 350°C ocorre a despolimerização completa (pirólise) da celulose, resultando em significativa perda de massa por volatilização e criação de uma matriz C essencialmente amorfa. Por volta de 330°C, os primeiros sinais de C aromático são vistos, e acima de 350°C, folhas de grafeno poliaromático começam a crescer às custas da matriz de C amorfo.



**Figura 13.** Análise da distribuição de temperatura a cada 20 minutos no forno de pirólise (A) e média da temperatura durante o processo (B)

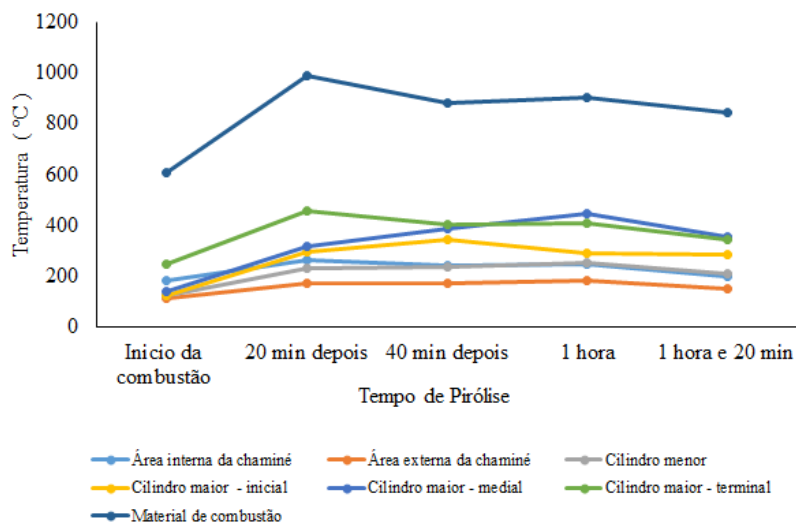
Fonte: Autoria própria, 2022

As demais matérias-primas apresentam uma variação de temperatura e tempo de queima muito próximo aos valores obtidos ao do resíduo de sisal, com destaque para a biomassa da jurema que foi notado um aquecimento superior e um tempo reduzido de queima. Nas Figuras 14, 15 e 16 estão as medidas de temperatura, a cada 20 minutos, para as biomassas da jurema, jurubeba e nim até um processo de pirólise de 1 hora e 20 minutos.



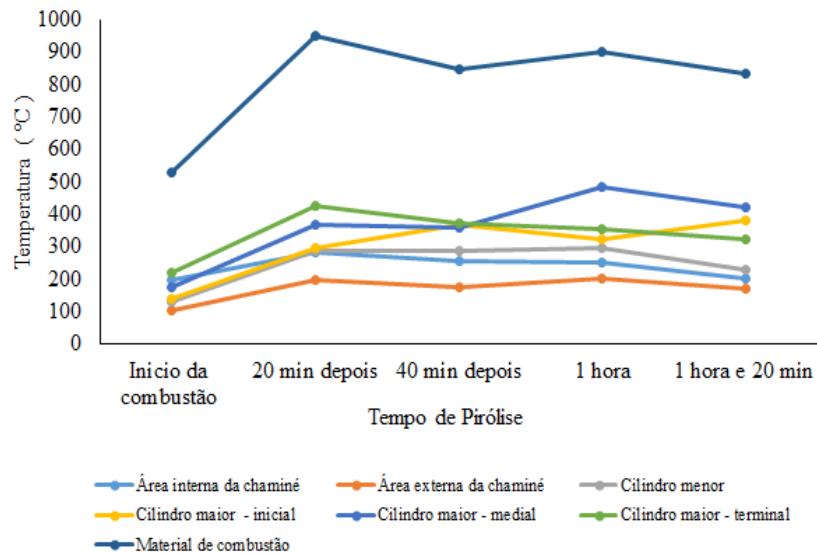
**Figura 14.** Análise da distribuição de temperatura a cada 20 minutos no forno de pirólise durante o processo de produção de biocarvão de Jurema.

Fonte: Autoria própria, 2022



**Figuras 15.** Análise da distribuição de temperatura a cada 20 minutos no forno de pirólise durante o processo de produção de biocarvão de Jurubeba.

Fonte: Autoria própria, 2022.



**Figura 16.** Análise da distribuição de temperatura a cada 20 minutos no forno de pirólise durante o processo de produção de biocarvão de nim.

Fonte: Autoria própria, 2022

A temperatura, o tempo que um material é mantido a uma determinada temperatura e a taxa de aquecimento influenciam diretamente nas propriedades químicas do biocarvão. Elementos individuais são potencialmente perdidos para a atmosfera, fixados em formas recalcitrantes ou liberados como óxidos solúveis durante o processo de aquecimento. No caso do biocarvão de madeira formado em condições naturais, o carbono (C) começa a se volatilizar por volta de 100°C, nitrogênio (N) acima de 200°C, enxofre (S) acima de 375°C e potássio (K) e fósforo (P) entre 700°C e 800°C. A volatilização de magnésio (Mg), cálcio (Ca) e manganês (Mn) ocorre em temperaturas acima de 1000°C (NEARY et al., 1999; KNOEPP et al., 2005). Biocarvão produzido a partir de lodo de esgoto pirolisado (aquecido na ausência de oxigênio) a 450°C contém mais de 50% do N original (embora não esteja em uma forma facilmente biodisponível) e todo o P original (BRIDLE e PRITCHARD, 2004).

Enquanto a jurema apresenta uma constituição rígida e lenhosa na parte do caule, a jurubeba tem uma constituição vegetal esponjosa e macia, embora o verso das folhas e os ponteiros mais tenros são constituídas de fuligem. Mesmo desidratado ao ar livre mantém essa constituição. O nim representou a biomassa de maior concentração de folhas. Depois, de trituração e desidratada, e iniciado o procedimento de pirólise foi gradativamente aumentando a temperatura do ponto inicial até os 20 minutos de queima. Após, manteve estabilizado em vários componentes do forno (Figura 16).

Observou-se que com a exceção do local do material de combustão que alcançou elevadas temperaturas, as demais partes externas do forno permaneceram com temperaturas abaixo de 500°C, o que possibilita a produção de um biocarvão de melhor qualidade. Assim, o biocarvão é produzido pelo aquecimento de resíduos orgânicos em um ambiente com limitação de oxigênio, geralmente em temperaturas de 350–600°C. Os compostos cristalinos são formados a partir de elementos presentes nos resíduos, sendo a natureza dos compostos dependendo da temperatura de pirólise (SINGH et al., 2010; KLEBER et al., 2015; PRAKONGKEP et al., 2015).

Na Tabela 1 estão apresentadas a eficiência média da pirólise determinadas em cinco amostras de cada matéria-prima (biomassas e biocarvões de resíduo de sisal, jurema, jurubeba e nim). Assim, da massa de resíduo de sisal para obtenção da massa de biocarvão produzido, houve uma variação de 66,8 a 49,7%, com valor médio de 60,2% em temperaturas médias de 460 a 500°C. Logo, a eficiência do processo de pirólise do resíduo de sisal para a produção de biomassa carbonizada pode ser considerada como uma porcentagem eficiente na carbonização desse. A jurema apresentou um rendimento de 29,7%, a jurubeba um valor bem próximo de 29,3% e o nim 24,2%. Os rendimentos inferiores desses três últimos podem ser explicados devido a não concentração de materiais sobrepostos na sua constituição. Então, as medidas percentuais de eficiência da pirólise das biomassas em consonância com a massa de biocarvão produzido (n=5) significou uma possibilidade viável e inovadora para questões na localidade.

O rendimento da biocarbonização em grande parte das matérias primas apresentam rendimento de no máximo 40%, em conformidade aos valores da temperatura e do teor de lignina que é proporcional ao rendimento (MACHADO et al., 2014). O elevado rendimento de biocarvão comprova que este resíduo de sisal tem enorme potencial para os(as) produtores(as) do Território do sisal que vivem do extrativismo, evitando com isso, o descarte deste material, em áreas que podem contribuir para diversos problemas sociais, econômicos, ambientais. Os outros materiais apresentados são abundantes e sem finalidades específicas. A jurema apresenta rebrota exuberante, o nim na arborização urbana não tem destinação quando realizada as podas, e a jurubeba é considerada invasora.

Na Tabela 1, também estão apresentados os valores de umidade do resíduo de sisal e das biomassas, antes da pirólise e a umidade do biocarvão após o processo de carbonização. Como já era esperado, há uma diferença quanto ao teor de umidade entre

os materiais, pois embora o resíduo de sisal seja seco ao ar, o mesmo possui uma umidade residual média de 5%, sendo dez vezes superior ao do biocarvão que apresentou média de 0,5%, mesmo sendo submetido a altas temperaturas. Provavelmente, esse valor residual de umidade do biocarvão seja devido a sua alta higroscopicidade de suas partículas que pode reter água do meio após sua retirada do forno de pirólise.

A umidade da biomassa do nim foi a que apresentou maior valor 18,7%, sendo que a jurema e jurubeba apresentaram valores intermediários. Em relação ao teor de umidade do biocarvão, a jurubeba teve o maior valor de 1,8%, seguido do nim com 1,4%, respectivamente. Era esperado que a jurema apresentasse teor de umidade bastante reduzido, devido a sua constituição hídrica limitante, contudo esse valor pode estar associado a presença de folhas, e algumas inflorescências.

**Tabela 1.** Teores de umidade, densidade e eficiência das análises das biomassas e biocarvões

Matéria Prima	Umidade da Biomassa (%)		Umidade do Biocarvão (%)		Densidade da Biomassa (g/cm <sup>3</sup> )		Densidade do Biocarvão (g/cm <sup>3</sup> )		Eficiência da pirólise (%)
	Média	Erro padrão	Média	Erro padrão	Média	Erro padrão	Média	Erro padrão	
Sisal	5.0	0.5	0.11	0.12	0.23	0.0222	0.77	0.038	60.22 ± 0.03
Jurema	11.5	0.7	0.6	0.16	0.13	0.024	0.26	0.0046	29.73 ± 0.003
Jurubeba	11.8	1.35	1.8	0.60	0.08	0.00364	0.19	0.00506	29.3 ± 0.02
Nim	18.7	0.07	1.4	0.40	0.17	0.00416	0.19	0.0072	24.2 ± 0.003

Fonte: Autoria própria, 2022

O rendimento do biocarvão reduz com o aumento da temperatura e a relação rendimento/temperatura é diferente com distintas biomassas. Conforme o aumento da temperatura durante a pirólise, maior a abundância de produto gasoso. Geralmente a biomassa é composta de celulose (40-50%), hemiceluloses (20-30%), lignina (10-25%), e em menores proporções, resinas, taninos, ácidos graxos, fenóis, compostos nitrogenados (proteínas) e sais minerais. O peso de massa total seca sofrerá oscilações, devido a particularidade de cada matéria-prima (IQBAL et al., 2021; KUMAR et al., 2022). Ocorre uma mudança estrutural de carbono alifático para carbono aromático em temperaturas entre 150 a 550 °C (diminuição nas quantidades de grupos OH e CH<sub>3</sub> e aumenta a quantidade de C=C). Portanto, para adquirir um bom rendimento de produto sólido deve-se escolher temperaturas mais baixas (300 °C a 450 °C), pois



nessa faixa de temperatura os biocarvões apresentam enormes quantidades de grupos funcionais ácido-base que agem como trocadores de cátions e ânions no ambiente, e ainda podem originar um maior acúmulo de carbono e nutrientes (nitrogênio, enxofre e potássio), que são desprendidos a altas temperaturas (LEHMANN e JOSEPH, 2009; KEILUWEIT et al., 2010). Logo que a temperatura sobe, eleva a proporção de carbonos aromáticos, em decorrência ao aumento relativo da perda de matéria volátil (inicialmente a água, depois hidrocarbonetos, vapores de alcatrão, H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub>) e da conversão de alquilo a arilo (anel aromático). Quando eleva a temperatura cria microporos (devido à perda de água na desidratação), o que resulta em uma expansão da área superficial. Mas este atributo está condicionado a características particulares de cada biomassa utilizada pirólise (LEHMANN e JOSEPH, 2009).

De acordo Tag et al. (2016) o rendimento produtivo de biocarvão é inversamente proporcional à temperatura de pirólise. O rendimento em biocarvão está relacionada com o modo de pirólise, parâmetros empregados, duração e temperatura, além das particularidades da biomassa (BASU, 2013).

Segundo Valente (1986) o padrão, é que a madeira apresenta 20-30% de umidade para ser usada na produção de carvão. Para Oliveira (2012) o ideal seria acima de 30% em relação ao teor de umidade que aumentaria a requisição de energia (fase endotérmica) necessária à evaporação da água. Além disso, uma lenha com elevado teor de umidade evidencia com rigor no rendimento e qualidade do biocarvão vegetal. A carbonização reduz a massa em volume no formato de compostos carbono (DOWNIE et al., 2009). Para Picancio (2011) a umidade do biocarvão deve ser de no máximo 8%. Os valores encontrados nesta pesquisa variaram entre 5 a 18%, dependendo da fonte de matéria-prima utilizada.

Na Tabela 1, também são apresentados os valores de densidades do resíduo de sisal e do biocarvão. Observou-se menor densidade para o resíduo com média de 0,23 g cm<sup>-3</sup>, comparado ao biocarvão que apresentou média de 0,77 g cm<sup>-3</sup>. O resíduo de sisal apresenta menor densidade, pois os espaços vazios são consideráveis. Já no biocarvão a textura com partículas menores favoreceu o resultado de maior densidade. Assim, a densidade é uma característica dinâmica que sofre grande influência pelos materiais sólidos, dimensão dos poros e quantidade de espaços porosos (CARTER e GREGORICH, 2007).



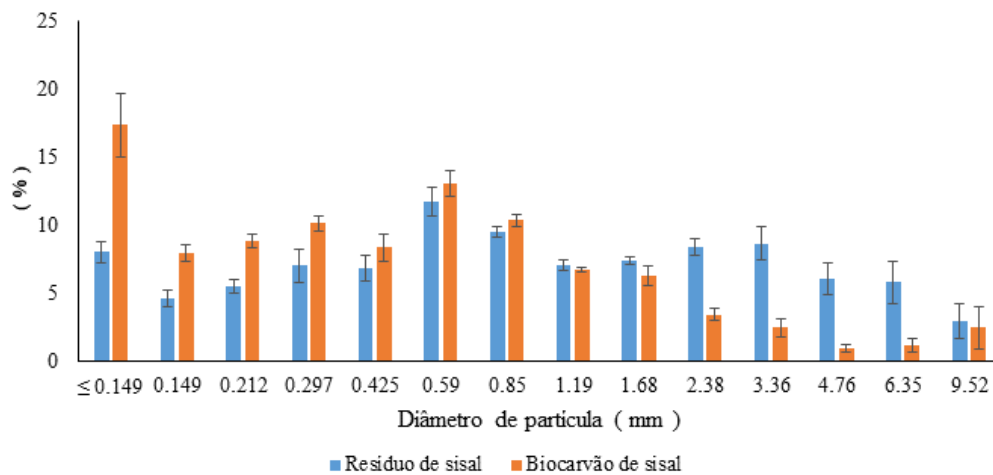
A média amostral da densidade da biomassa da jurema e a média do nim são próximos, 0,04% de diferença. Já referente as medias amostrais dos biocarvões de nim e jurubeba tiveram densidades similares.

A densidade dos biocarvões depende da natureza do material de partida e do processo de pirólise (PANDOLFO et al., 1994). A estrutura física do biocarvão é herdada do tecido vegetal do qual é formado e, portanto, pode ter uma densidade de poros extremamente alta, como a encontrada no tecido do xilema lenhoso. A porosidade influencia nos mecanismos potenciais que podem ajudar a explicar vários estudos que demonstraram maior colonização micorrízica na presença de biocarvão (SAITO, 1990; ISHII e KADOYA, 1994; EZAWA et al., 2002; MATSUBARA et al., 2002; YAMATO et al., 2006). Vários estudos demonstraram mudanças na atividade microbiana ou na composição da comunidade com adições de biocarvão ao solo (WARDLE et al., 1998; PIETIKÄINEN et al., 2000; DELUCA et al., 2006).

É possível deparar em algumas literaturas que, conforme adiciona-se as doses de biocarvão a densidade do solo diminui (BLANCO-CANQUI, 2017). Já outros estudos demonstram que aplicações de biocarvão até 50 t ha<sup>-1</sup>, não ocorreu redução da densidade do solo (PRATIWI e SHINOGI, 2016).

A incorporação do biocarvão restringe a densidade do solo por meio do efeito de mistura. Ou seja, o biocarvão tem densidade aparente mais baixa (< 0,6 g cm<sup>-3</sup>) do que o solo (1,25 g m<sup>-3</sup>) (BLANCO-CANQUI, 2017). Assim, os maiores efeitos nos solos arenosos acontecem pela maior diferença entre as densidades. Efetivamente, a diferença na densidade aparente entre o biocarvão (0,6 g cm<sup>-3</sup>) e solos argilosos (1,1 g cm<sup>-3</sup>) é menor do que biocarvão (0,6 g cm<sup>-3</sup>) e solos arenosos (1,5 g cm<sup>-3</sup>) (Blanco-Canqui, 2017).

Na Figura 17, estão apresentados a granulometria do resíduo de sisal e do biocarvão após a pirólise. Observou-se que a granulometria do resíduo de sisal apresenta maior distribuição em relação ao diâmetro de suas partículas, variando de ≤0,149mm, até partículas de 9,52mm. Após o processo de pirólise houve uma redução do percentual de partículas com diâmetros maiores (1,19 a 9,52mm), elevando o percentual de partículas menores que 0,85mm, com destaque para o aumento do percentual de partículas ≤0,149mm.



**Figura 17.** Granulometria do resíduo de sisal e do biocarvão após pirólise

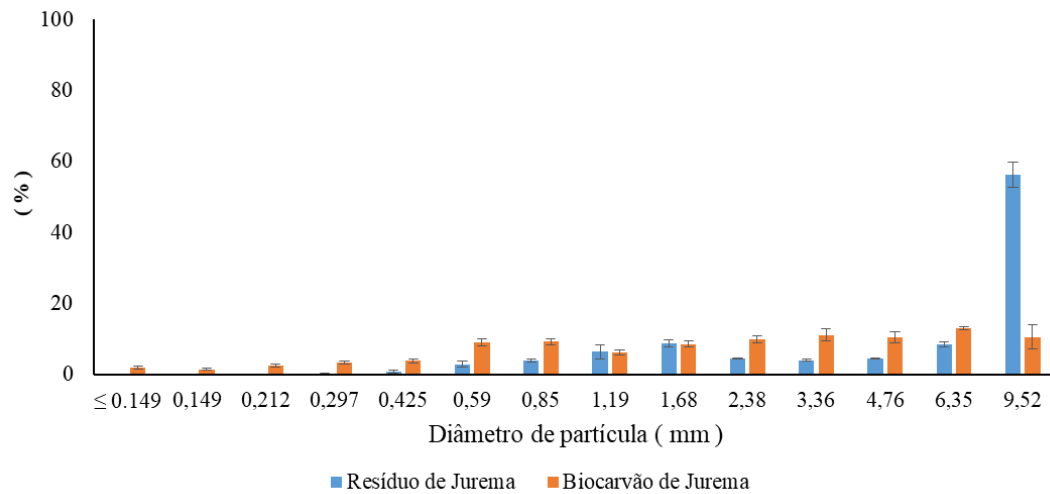
Fonte: Autoria própria, 2022

A análise textural é um dos aspectos fundamentais do solo, tem elevada influência na dinâmica físico-hídrico e químico do solo. Assim, é possível conhecer a classificação das partículas isoladas e menores que 2,0 mm em uma amostra de solo: areia, silte e argila (GEE e BAUDER, 1986). A fração menor que 2mm do biocarvão, obtido através do peneiramento na classificação, apresenta uma estrutura altamente porosa, já que, na pirólise, os compostos voláteis e a água contidos na biomassa são eliminados, permitindo espaços vazios. Segundo Tsuzuki (2000), de 70 a 80% do volume do biocarvão é composto por poros, favorecendo a baixa densidade (0,3 a 0,4 kg dm<sup>-3</sup>). Para Miyasaka et al., (2001), o biocarvão pode ser aplicado na granulação de 2,0 a 5,0 mm. O aspecto textural visa a obtenção de condições ideais de dispersão das partículas do solo (GROHMANN e RAIJ, 1977). No solo, o biocarvão deve formar ligações com as partículas minerais, formando e elevando a estabilidade dos agregados (YANG et al., 2016).

A granulometria do biocarvão pode ser adequada ou não, dependendo da textura do solo o qual será adicionado. Há relatos da sua potencialidade agrônômica em solos de textura grossa e de maneira análoga aos Latossolos brasileiros (VERHEIJEN et al., 2010; UZOMA et al., 2011).

Na Figura 18, estão apresentados a granulometria da biomassa e do biocarvão da jurema após a pirólise. Observou-se que a granulometria da biomassa apresenta maior distribuição em relação ao diâmetro de suas partículas, variando de ≤0,149mm, até partículas de 9,52mm. Após a pirólise, houve uma redução do percentual de

partículas com diâmetros maiores (9,52mm). Valores equiparados de biomassa e biocarvão foram encontrados na granulometria de 1,68 mm.

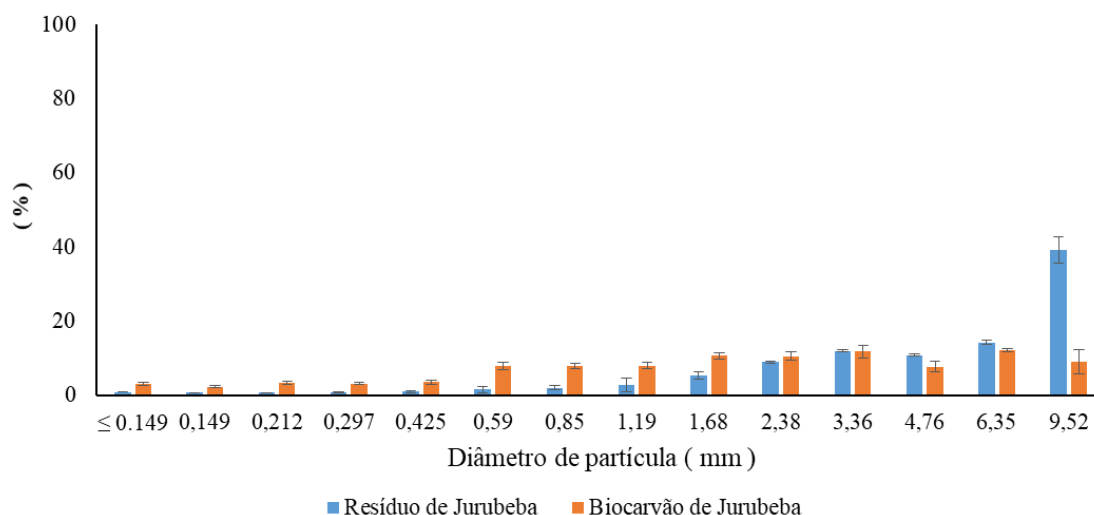


**Figura 18.** Granulometria da biomassa e do biocarvão Jurema após pirólise.

Fonte: Autoria própria, 2022

Os resultados apresentados por Obia et al. (2016), que afirmam aumentar a porosidade total em 2% quando adicionado biocarvão em solo arenoso, sem implicação desse efeito pelas culturas. Por outro lado, através de experimentos  $\leq 4$  anos, foi comprovado que as modificações na porosidade total ocorrem em solos de textura mais arenosa, sendo essas alterações insignificantes para solos de textura mais argilosa, independentemente da quantidade de biocarvão (USOWICZ et al., 2016; ZHENG et al., 2016; BURRELL et al., 2016).

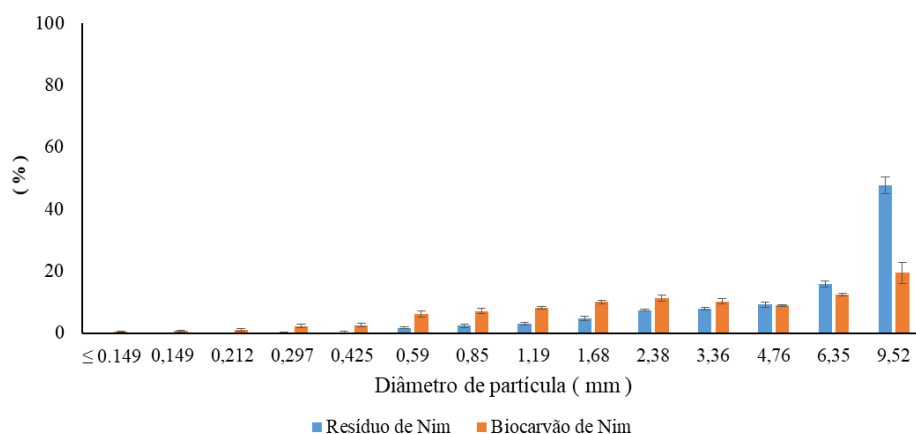
Na Figura 19 está apresentada a análise granulométrica da biomassa e do biocarvão da jurubeba após a carbonização. Notou-se que de  $\leq 0,149$ mm até a 2,38mm a biomassa apresenta percentagens inferiores comparada a do biocarvão. Na granulometria 3,36 mm ambos são similares. Gradativamente os diâmetros do biocarvão vão reduzindo, e o diâmetro de partículas do resíduo supera na granulação de 4,76mm, continua aumentando na 6,35mm e quadruplica o valor nas partículas de diâmetro de 9,52mm.



**Figura 19** Análise comparativa da granulometria da biomassa e biocarvão da Jurubeba

Fonte: Autoria própria, 2022

Na Figura 20, está apresentada a porcentagem de diâmetros das partículas da biomassa e do biocarvão de nim. Observou-se que a granulometria do biocarvão apresenta maior distribuição até a malha 3,36mm. Na malha de 4,76mm estão equiparados. Nos demais, os diâmetros das partículas de biomassa são acentuados.



**Figura 20** Análise comparativa da granulometria da biomassa e biocarvão do Nim

Fonte: Autoria própria, 2022

Glab et al. (2016) avaliaram o efeito do tamanho das partículas de biocarvão provenientes do trigo em solo arenoso. Os resultados mostraram melhorias nas propriedades físicas do solo (densidade aparente, porosidade total e tamanho de

partícula) a partir da adição do biocarvão, em especial quando a fração mais fina foi utilizada concomitantemente foi aumentado a disponibilidade do teor de água.

Em solos de textura argilosa que proporcionam alta aptidão de retenção, existe menos susceptibilidade às modificações por adição de biocarvão, ainda que os minúsculos poros do biocarvão tenham a capacidade de elevar o nível de água (KRULL et al., 2004).

A retenção de água dos diferentes biocarvões analisados pode ser verificada conforme os resultados apresentados no Tabela 2.

**Tabela 2.** Retenção de água pelos biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Retenção de água – Ug (%)							
Biocarvão	Saturado	0,1 atm	0,33 atm	1 atm	3 atm	8 atm	Água disponível
Jurema	111,99	91,90	72,30	64,46	61,60	60,64	31,26
Jurubeba	234,00	201,28	103,69	80,56	77,47	77,08	124,21
Nim	117,97	84,08	69,13	63,60	61,43	60,62	23,45
Resíduo de Sisal	62,98	25,35	12,81	9,44	8,43	8,15	17,20

Fonte: Autoria própria, 2023

O biocarvão de jurubeba foi destacado entre os demais em relação ao potencial de retenção de água. Enquanto, o biocarvão a base de resíduo de sisal teve uma capacidade de retenção de água inferior. Isso evidencia que no processo de carbonização ocorreu a formação da porosidade estrutural, além de um acréscimo de hidroxílicos e carboxílicos, grupos funcionais responsáveis pelo mecanismo hidráulico de adsorção. Conforme já foi citado, e de acordo com os resultados distribuídos na tabela, indicando diferenças distintas e assinaladas na capacidade de retenção de água é possível aferir que a diversidade de biomassas existentes pode ser manipulada através da pirólise para variadas funcionalidades e potencialidades.

Limitação hídrica e períodos longos de seca são desafios do atual modelo de agricultura, e podem ser reduzidos com a aplicação do biocarvão. Pois, melhora a aeração, a retenção e a condutividade hidráulica; reduz a densidade do solo e aumenta a disponibilidade de nutrientes, proporcionando o desenvolvimento das plantas (GLASER et al., 2002; NOVAK et al., 2009; ATKINSON et al., 2010; PEAKE et al., 2014).

Algumas pesquisas despontaram que a aplicação de biocarvão no solo elevou a capacidade de retenção de água, pois apresenta elevada porosidade. Esse impacto incidiu principalmente em solos arenosos (PETTER et al., 2012; THIES e RILLING, 2009, ZHANG et al., 2010; LAIRD et al., 2010).

Nos países em desenvolvimento, foi reconhecida a necessidade de uma estratégia dupla de manejo da fertilidade do solo, agricultura de conservação e sequestro de C no solo (LAL, 2004).

As superfícies do biocarvão são heterogêneas, com uma estrutura complexa e uma quantidade significativa de compostos orgânicos e metálicos. As superfícies altamente porosas de biocarvões demonstraram adsorver  $N_2O$ ,  $CO_2$  e  $CH_4$ , bem como substratos para a produção de  $N_2O$ , incluindo  $NH_4^{4+}$  e  $NO_3^3$  (BAGREEV et al., 2001; HITOSHI et al., 2002). Uma vez que o biocarvão é adicionado em quantidades substanciais ao solo, é provável que ocorram mudanças na quantidade e composição da massa e fluxos de energia dos gases, fótons absorvidos do sol, transferência de calor da água e movimento de elétrons e íons. Tanto na superfície como dentro do biocarvão.

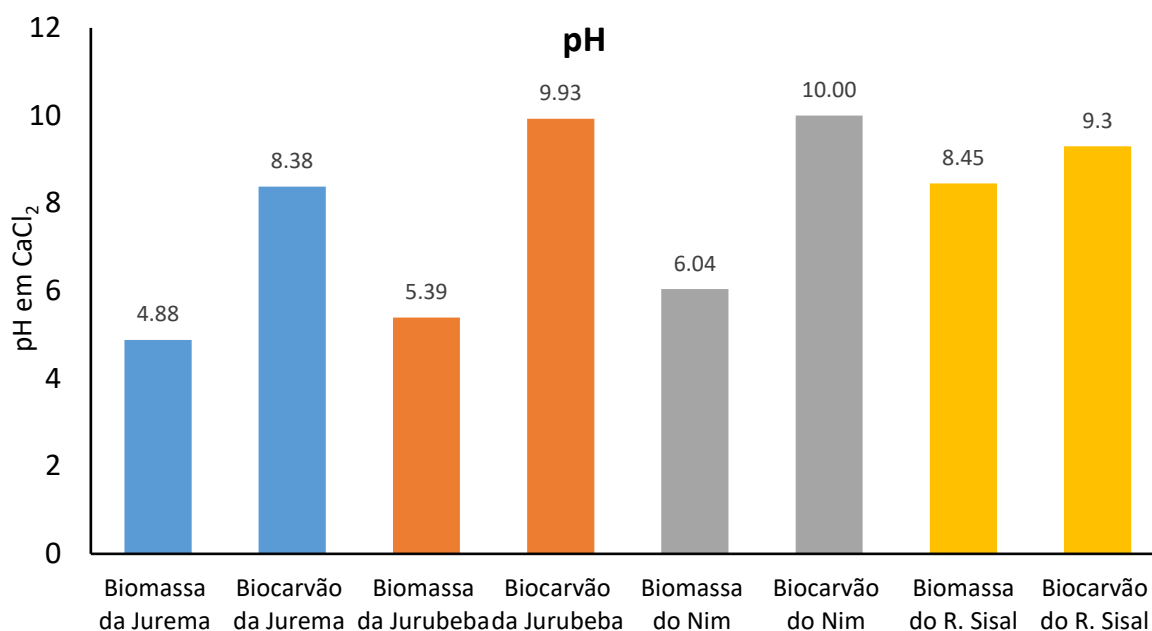
Os valores de retenção de água observados neste estudo para os diferentes tipos de biocarvões são maiores comparados à retenção da maioria dos solos, principalmente para os de textura arenosa. Isto mostra que, além de diversas melhorias que estes biocarvões podem conferir aos solos como condicionador, a retenção de água será um ganho importante, e dependerá da quantidade que será adicionado em uma determinada área.

## **5.2. Caracterização química das biomassas e biocarvões**

Nas análises químicas das biomassas e biocarvões, os resultados apresentam elevada relação C/N, altos teores de nutrientes como fósforo, cálcio, magnésio e elevado pH, podendo ser uma alternativa para introdução nas áreas relacionadas as indústrias de produção de substratos para mudas e como adubo orgânico. A aplicação destes materiais poderá melhorar a fertilidade do solo, resultando na fixação de carbono no solo.

### **5.2.1. pH**

O pH dos biocarvões do Nim, da jurubeba, resíduo de sisal apresentaram valores próximos a 10 (Figura 21). O biocarvão da jurema apresentou pH de 8,38, sendo a matéria prima mais lenhosa. Destaca-se para o pH da biomassa do resíduo de sisal em que o valor foi superior as demais biomassas e maior que o pH do biocarvão da Jurema.



**Figura 21.** Análise comparativa dos valores de pH de biomassa e biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal.

Fonte: Autoria própria, 2023

O pH é um parâmetro que afeta diretamente nos processos de adsorção (MARY et al., 2016). Conforme aumenta a temperatura eleva a alcalinidade (ZHANG et al., 2015; ZORNOZA et al., 2016; TAG et al., 2016). A temperatura avançando desprende grupos funcionais ácidos encontrados na estrutura da biomassa florestal, além de originar o desenvolvimento de grupos oxigenados derivados da alteração térmica da celulose, assim, elevando o pH (JOSEPH et al., 2009), concordando com os resultados encontrados para os biocarvões de jurema, jurubeba e nim. De acordo com Lehmann et al. (2011), biocarvões obtidos a partir de biomassa não madeireiras exibem pH mais elevado, devido a ocorrência de carbonatos e outros sais básicos, confirmando com os resultados do resíduo de sisal, tanto a biomassa como para o biocarvão os teores são elevados para o pH. Assim, Lee et al. (2013), apontam que durante a carbonização reduz o material volátil e eleva na formação de materiais alcalinos, logo eleva o pH.

A maioria dos biocarvões usados para correção do solo são alcalinos (MUKHERJEE e LAL, 2014), no entanto, valores de pH de biocarvão entre 3,1 e 12,0 foram relatados na literatura (LEHMANN, 2007; MUKHERJEE et al., 2011).

Conseqüentemente, os biocarvões com baixo teor de cinzas, como os produzidos com matérias-primas lenhosas, geralmente têm valores de pH mais baixos, como exemplo o pH do biocarvão da jurema encontrado neste estudo, comparado aos

biocarvões com maior teor de cinzas, como os produzidos com gramíneas, resíduos ou adubos (LEHMANN et al., 2011; MUKHERJEE et al., 2011; SMIDER e SINGH, 2014).

Biocarvões produzidos sob altas temperaturas (>400°C) provavelmente terão valores de pH maiores do que os biocarvões de baixa temperatura (<400°C) da mesma matéria-prima (LEHMANN et al., 2011; MUKHERJEE et al., 2011; YUAN et al., 2011).

Numerosos estudos demonstraram que o biocarvão pode modificar o pH do solo, normalmente aumentando o pH em solos ácidos (MBAGWU, 1989; MATSUBARA et al., 2002; LEHMANN et al., 2003). Estudos demonstraram uma redução no pH com a adição de biocarvão em solos alcalinos, no entanto, a adição de biocarvão a solos ácidos foi observada para reduzir o pH do solo (CHENG et al., 2006).

### 5.2.2. Relação C/N

A biomassa de Jurubeba apresentou a maior relação C/N, sendo 20/1. Após o processo de pirólise houve uma redução significativa para 13/1. Enquanto, a biomassa da jurema teve na sua constituição 18/1, e sofreu uma queda na relação quando transformado em biocarvão 11/1. O nim manteve 16/1 na relação C/N antes e após o processo. Já o resíduo de sisal teve 16/1 na biomassa, e alterou para 17/1 no biocarvão.

Como a jurema apresentou alto valor de N isso influenciou na relação C/N menor no biocarvão de 11/1. Quanto a biomassa da jurema e da jurubeba apresentam alta relação (18/1 e 20/1), respectivamente. Após pirolisado estes valores reduziram. Diferente do Nim e Sisal em que a relação C/N mantiveram quase constante, conforme Tabela 3.

**Tabela 3.** Relação C/N das biomassas antes e após o processo de pirólise

Fonte	Biomassa	Biocarvão
Jurema	18/1	11/1
Jurubeba	20/1	13/1
Nim	16/1	16/1
Resíduo de sisal	16/1	17/1

Fonte: Aatoria própria, 2023

No processo de carbonização, geralmente são constituídos materiais com elevados teores de C e baixa concentração em N, já que este é volátil. De acordo com Yuan et al. (2013), o aumento da relação C/N significa altos teores de C estável. Mukome et al. (2013) completaram que a relação Carbono/Nitrogênio, indica uma ótima capacidade de um produto

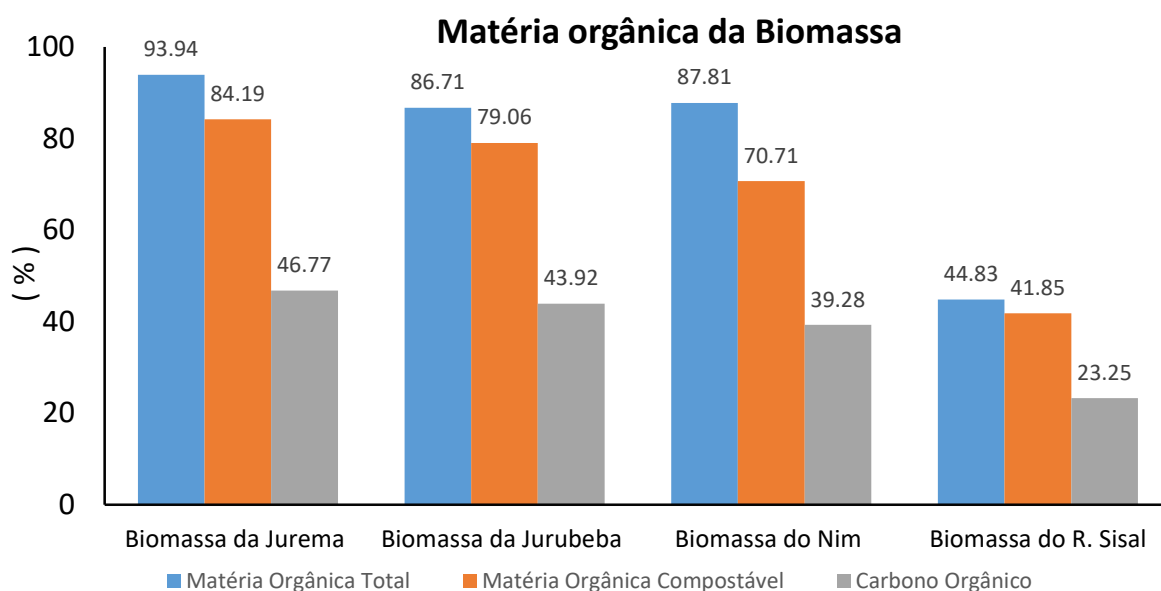


orgânico imobilizar nitrogênio, devido à alta relação C/N dos biocarvões incorporados no solo.

Os biocarvões podem apresentar altos teores de Carbono (LEHMANN e JOSEPH, 2009) e baixa concentração de (N), apresentar uma alta relação C/N e reduzida taxa de mineralização, ocorrência que colabora para o acréscimo de tempo de duração no solo (BENITES et al., 2009).

### 5.2.3. Matéria Orgânica

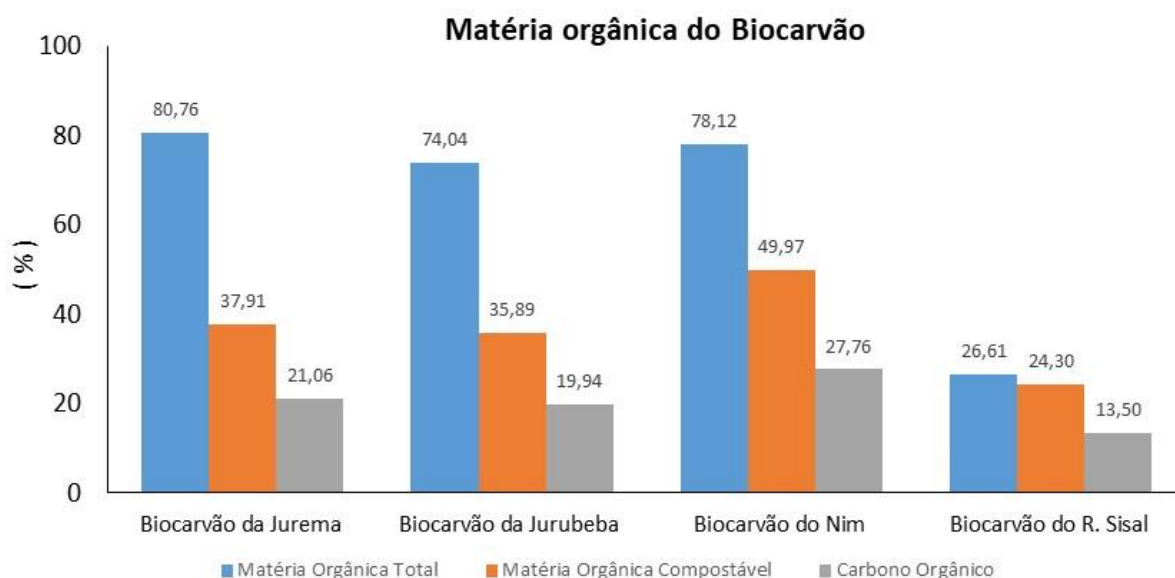
Os parâmetros utilizados para as medidas matéria orgânica total, matéria orgânica compostável e carbono orgânico apresentaram valores elevados na biomassa de jurema. Embora os índices foram distintos para as 4 biomassas, a Figura 22 apresenta evidências que a matéria orgânica total apresentaram maiores valores para as biomassas de jurema, jurubeba e nim e menor para o resíduo do sisal, devido este ter sido processado para retirada das fibras. A matéria orgânica compostável e carbono orgânico seguiram a mesma tendência, sendo que para este último parâmetro, o maior valor para biomassa da jurema foi de 46,77% e menor para o resíduo de sisal, com teores de 23,25%.



**Figura 22.** Análise comparativa dos teores de Matéria Orgânica nas biomassas de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023

A Figura 23, estão apresentados os parâmetros da matéria orgânica total, matéria orgânica compostável e carbono orgânico dos biocarvões. Comparando os resultados obtidos para as biomassas, os valores dos biocarvões sofreram alterações, a exemplo da matéria orgânica compostável no biocarvão do nim (49,97%) que superou o valor da jurema (37,91). O que não era esperado, já que o índice encontrado na biomassa da jurema era o mais alto. O mesmo fato ocorreu em relação ao carbono orgânico do nim que apresentou o valor mais elevado (27,76%). Nos 3 parâmetros supracitados, o resíduo de sisal apresentou menores valores tanto no biocarvão como na biomassa.



**Figura 23.** Análise comparativa dos teores de Matéria Orgânica nos biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023

Uma propriedade importante do biocarvão, que o diferencia de outros tipos de matéria orgânica, é sua altíssima afinidade e capacidade de sorver compostos orgânicos (PIETIKÄINEN et al., 2000). Essa propriedade do biocarvão é a razão pela qual o carvão ativado - uma forma de biocarvão de alta temperatura que tem sido tratado com vapor ou CO<sub>2</sub> para remover alcatrões e maximizar a porosidade – há muito tempo é usado para remover ou 'retirar' compostos orgânicos do ar e da água poluídos (DIAS et al., 2007).

Vários mecanismos principais operam nos solos através dos quais a matéria orgânica que entra no solo é estabilizada e que aumenta significativamente o seu tempo de residência no solo. Estes envolvem sua recalcitrância intrínseca, separação espacial

de decompositores e substrato e formação de interações entre superfícies minerais e matéria orgânica (SOLLINS et al., 1996).

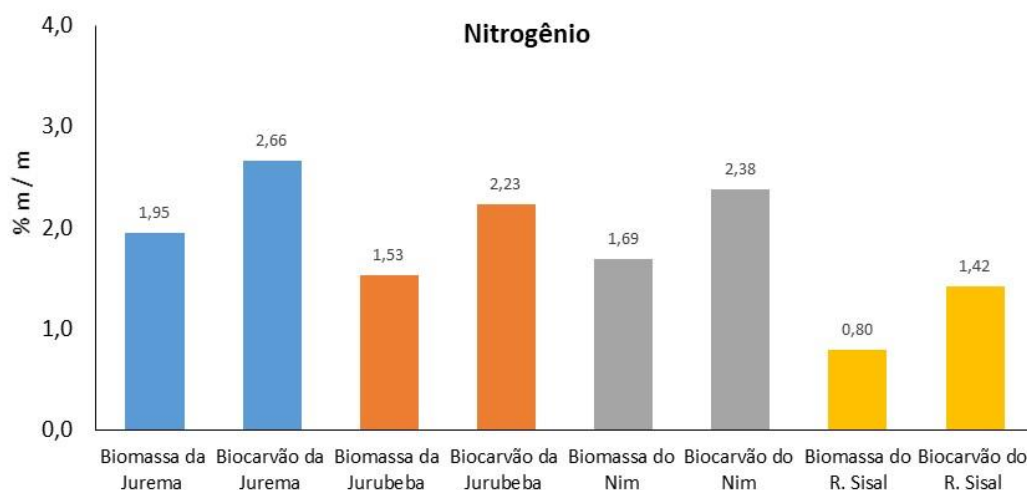
A conversão de matéria orgânica em biocarvão por pirólise aumenta significativamente a recalcitrância de C na biomassa. A composição muda por meio da destruição completa da celulose e da lignina e pelo aparecimento de estruturas aromáticas (PARIS et al., 2005) com compostos do tipo furano (BALDOCK e SMERNIK, 2002). Algumas diferenças nos produtos de pirólise são documentadas para decomposição térmica de diferentes moléculas orgânicas individuais (KNICKER, 2007).

Em alguns solos, o biocarvão pode promover a agregação inicialmente formando um núcleo de atividade biológica e formas de matéria orgânica semelhantes ao processo descrito para a serapilheira (TIESSEN e STEWART, 1988), o que pode levar a revestimentos de partículas de biocarvão com minerais (LEHMANN, 2007). Se o biocarvão, de fato, favorece a proliferação de fungos micorrízicos, como discutido por Warnok et al. (2007), então a agregação pode aumentar por uma maior abundância de hifas fúngicas. A conexão entre hifas micorrízicas e abundância agregada e estabilidade está bem estabelecida (TISDALL e OADES, 1982; MILLER e JASTROW, 1990; RILLIG et al., 2002).

#### **5.2.4. Macronutrientes**

##### **Nitrogênio**

De acordo com os níveis de nitrogênio para as biomassas de jurema, nim e jurubeba estiveram próximos com valores de 1,95, 1,69 e 1,53%, respectivamente. Nas concentrações de biocarvões, os teores aumentaram, porém, a sequência manteve com a Jurema portando 2,66%, o nim com 2,38% e a jurubeba com o valor de 2,23%. O biocarvão de resíduo de sisal aumentou substancialmente aproximando aos demais biocarvões 1,42%.



**Figura 24.** Análise comparativa dos teores de Nitrogênio nas biomassas e biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023

Conseqüentemente, a produção de biocarvão é frequentemente avaliada por meio de mudanças nas concentrações elementares de C, H, O e N e proporções associadas. Especificamente, as razões H/C e O/C são usadas para medir o grau de aromaticidade e maturação (BOURKE et al., 2007).

Os teores de nitrogênio apresentados pelos biocarvão, utilizados neste trabalho (Figura 24), são considerados baixos e foram similares aos decobertos por Sarfaraz et al. (2020). De acordo com esses autores, os teores reduzidos de nitrogênio sofrem influências do aumento da temperatura de carbonização, assim à pirólise da substância orgânica, ocasionando na perda de N por volatilização, nas formas de dióxido de nitrogênio, óxido nitroso e de amônia. Conforme Song e Guo (2012), para a conservação do teor de nitrogênio, os biocarvões oriundos de estrume animal poderiam ser produzidos a uma temperatura em torno de 300 °C. Na pirólise dos resíduos orgânicos, geralmente, a hemicelulose se degrada a cerca de 220 a 315 °C. Enquanto, a celulose de 315 a 400 °C, já a lignina, variando de 150 a 900 °C, devido a sua estrutura aromática altamente condensada (POLETTTO, 2017; PROTÁSIO et al., 2021; WATERS et al., 2017).

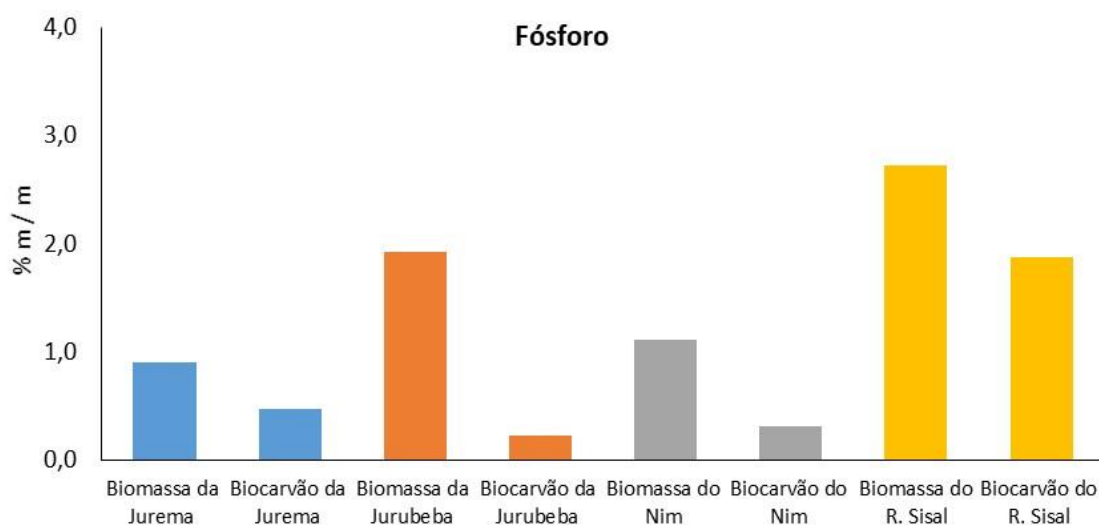
Rondon et al. (2007) testaram o efeito da adição de diferentes quantidades de biocarvão a variedades nodulantes e não nodulantes do feijão comum, *Phaseolus vulgaris*, inoculadas com cepas de *Rhizobium*, e mediram as mudanças na absorção de N. O biocarvão aumentou significativamente a fixação de N<sub>2</sub> em comparação com o

controle; mas a maior taxa de aplicação, 90g biocarvão kg<sup>-1</sup> no solo, não produziu a maior concentração de N no solo ou biomassa vegetal (RONDON et al., 2007). O estudo indica ainda que o biocarvão pode estimular a fixação de N<sub>2</sub> como resultado do aumento da disponibilidade de metais como níquel (Ni), ferro (Fe), boro (B), titânio (Ti) e molibdênio (Mo). As maiores taxas de aplicação de biocarvão diminuíram a magnitude do efeito e, se levadas ao extremo, podem interferir na fixação do N<sub>2</sub>. Biocarvão é altamente eficaz na sorção de compostos fenólicos, incluindo flavonóides (GUNDALE e DELUCA, 2006).

É importante entender qual(is) componente(s) dos ciclos de N e enzimas associadas nos processos de ciclagem de N (ou seja, mineralização, nitrificação, desnitrificação) são mais afetados pelas aplicações de biocarvão para que o biocarvão seja melhor gerenciado para mitigação das emissões de N<sub>2</sub>O do solo e redução de lixiviação de nitrato.

## Fósforo

Em análise comparativa dos níveis de fósforo da biomassa e do biocarvão, observa-se que os teores foram reduzidos nas quatro matérias primas em estudo. As biomassas da jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal apresentavam valores de 0,90%; 1,93%; 1,12%, e 2,73%. Porém, após a pirolise houve um decréscimo para 0,48%; 0,23%; 0,31%, e 1,88%, respectivamente (Figura 25).



**Figura 25.** Análise comparativa dos teores de Fósforo nas biomassas e biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023.

Semelhante ao ciclo de N, a atividade microbiana e a decomposição, regulam a mineralização de P e, assim, influenciam quanto P está disponível para absorção pela planta. Em contraste com a ciclagem de N, no entanto, a disponibilidade de P também é muito afetada por uma série de reações abióticas dependentes do pH que influenciam a proporção de reservatórios de P solúvel para insolúvel no solo (LEHMANN et al., 2003; TOPOLIANTZ et al., 2005).

A liberação de P do biocarvão tem sido reconhecida há muito tempo (TYRON, 1948), e o mecanismo para a liberação direta de P do biocarvão não é complexo.

Além de liberar diretamente o P solúvel, o biocarvão pode ter uma alta capacidade de troca iônica (LIANG et al., 2006), e pode alterar a disponibilidade de P fornecendo capacidade de troca aniônica ou influenciando a atividade de cátions que interagem com P.

Biocarvão é uma superfície excepcionalmente boa para sorver moléculas orgânicas polares ou não polares em uma ampla gama de massa molecular (SUDHAKAR e DIKSHIT, 1999; NOACK, 2000; PRESTON e SCHMIDT, 2006; BORNERMANN et al., 2007). Moléculas orgânicas envolvidas na quelação de íons  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $Ca^{2+}$  serão potencialmente sorvidas para superfícies de biocarvão hidrofóbicas ou carregadas (STEVENSON e COLE, 1999).

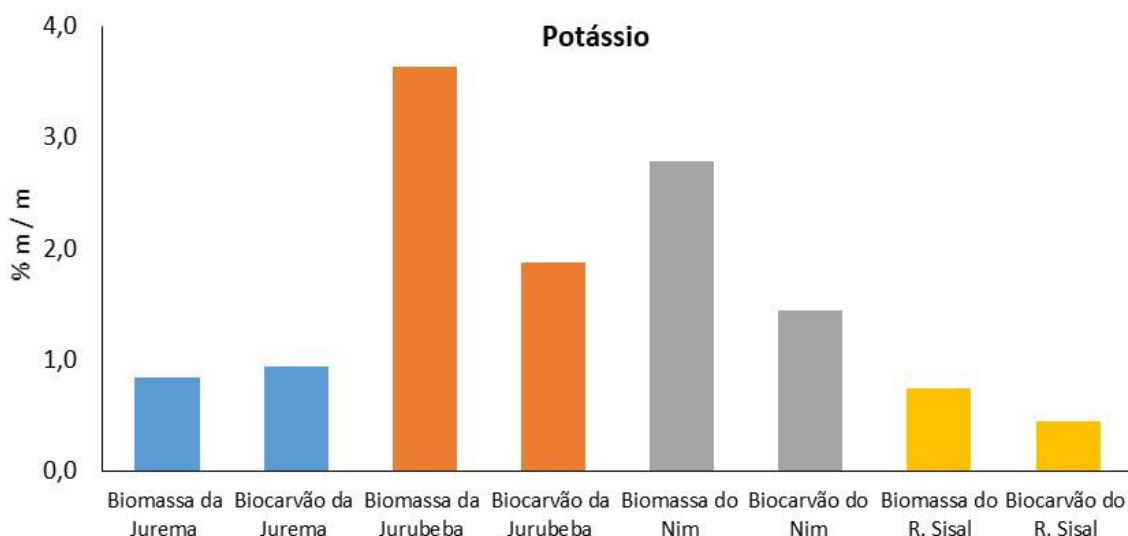
Durante a pirólise do material orgânico, uma mistura complexa de espécies de fósforo (P) é formada, que pode incluir constituintes amorfos, semicristalinos e cristalinos, juntamente com constituintes orgânicos (UCHIMIYA e HIRADA, 2014). No entanto, as formas orgânicas de P tenderão a desaparecer enquanto as formas inorgânicas de P serão subsequentemente formados e a cristalinidade aumentará com o aumento da temperatura de pirólise (ZWETSLOOT et al., 2015).

Biocarvões produzidos a partir de resíduos lignocelulíticos geralmente têm uma baixa quantidade de P disponível ( $<1 \text{ g kg}^{-1}$ , como estimado usando 2% de ácido fórmico), enquanto quantidades consideráveis de P disponível podem estar presentes em biocarvões produzidos de dejetos animais e humanos ( $>4 \text{ g kg}^{-1}$ ) (CAMPS-ARBESTAIN et al., 2015). A fração de P disponível do P total é geralmente menor em biocarvões derivados de resíduos vegetais ( $<40\%$ ) do que em biocarvões derivados de resíduos animais ( $>65\%$ ) (CAMPS-ARBESTAIN et al., 2015). Enquanto, Souza (2019) encontrou teores de fósforos muito maiores em biocarvões de resíduos de algodão e rejeitos de suínos que são rejeitos com maiores teores de P. Durante a pirólise, o teor

de fósforo tende a aumentar formando um elemento de liberação lenta, mais estável (DAI et al., 2016). Os teores de fósforo neste trabalho foram menores que o valor achado por Gunes et al. (2014), os quais, trabalhando com biocarvões de estrume de frango, conseguiram um teor de  $19,0 \text{ g kg}^{-1}$  de fósforo.

## Potássio

Com exceção da Jurema em que houve um acréscimo no teor de potássio, passando de 0,85% para 0,94%, comparando a composição da biomassa e do biocarvão, os demais materiais sofreram perdas na sua constituição. A biomassa da jurubeba apresentou o teor de 3,63% e redziu para 1,88%, quando transformada em biocarvão. Antes da pirólise, o nim apresentava 2,78% na sua biomassa. Após a carbonização teve redução na concentração do potássio no biocarvão, assim atingindo 1,45%. Os dados estão apresentados na Figura 26.



**Figura 26.** Análise comparativa dos teores de Potássio nas biomassas e biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023

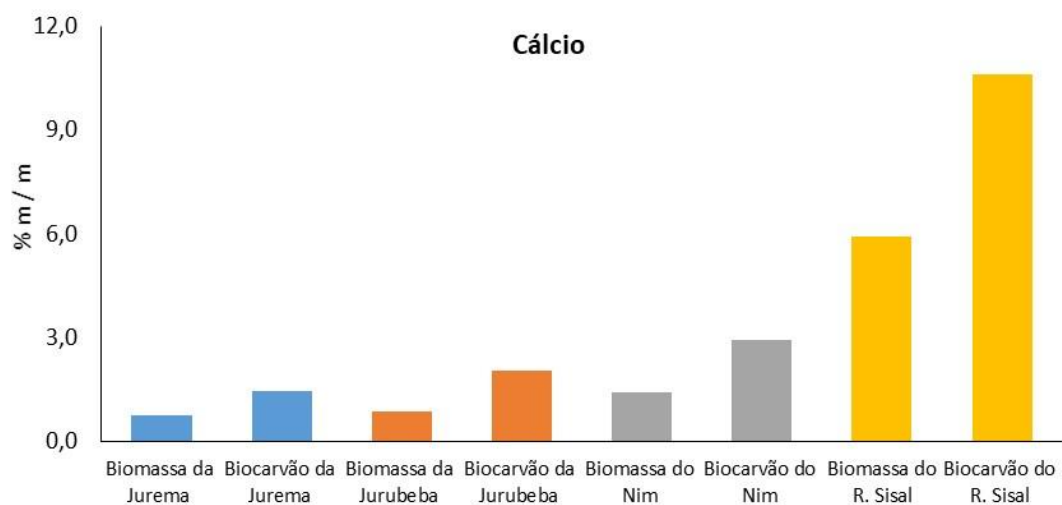
Além do fósforo, alguns estudos com potássio (K) revelam que os macroagregados proporcionam taxas maiores de K que os microagregados (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015; LIMWIKRAN et al., 2018).



O teor de potássio no biocarvão de estrume bovino foi de 5,40 g kg<sup>-1</sup>, menor que ao encontrado por Cantrell et al. (2012) e Gunamantha e Widana (2018), 14,4 e 21,26 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, utilizando-se mesmo material de origem. Essa diferença pode estar associada à composição inicial de nutrientes da matéria-prima, e ainda ao processo pirolítico empregado (SANTOS JUNIOR, 2022). Portanto, para os resultados obtidos neste estudo, em relação aos teores de K, os valores encontrados nas biomassas da jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal devem estar relacionados com a capacidade dessas plantas em acumular o potássio. As condições em que a pirólise foi desenvolvida, possibilitou a redução do teor de potássio original encontrado na biomassa, comparado ao potássio medido no biocarvão de sisal, jurubeba e nim. No biocarvão de jurema, o teor de potássio apresentou pequeno aumento, indicando maior estabilidade para este elemento, considerando a metodologia de tempo e temperatura de queima utilizados.

## Cálcio

Conforme figura 27, os teores de cálcio aumentaram em todas as amostras de biomassa que sofreram pirólise. A biomassa do resíduo de sisal tem uma composição de 5,92% e no biocarvão foi para 10,61%. Na biomassa da jurema foi encontrado 0,75% enquanto para o biocarvão houve aumento de 1,45%. Antes do processo de pirólise o material da jurubeba obteve 0,88%. Após a carbonização o valor obtido foi de 2,05%. A análise amostral da biomassa do nim aumentou de 1,43% para 2,94% no biocarvão.



**Figura 27.** Análise comparativa dos teores de Cálcio nas biomassas e biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal  
Fonte: Autoria própria, 2023

A soma de todos os valores produzidos nos biocarvões da jurema, nim e jurubeba (em que a concentração de cálcio costuma elevar) quase iguala o teor de cálcio encontrado na biomassa do resíduo de sisal. Quando produzido o biocarvão do resíduo de sisal o valor quase duplicou.

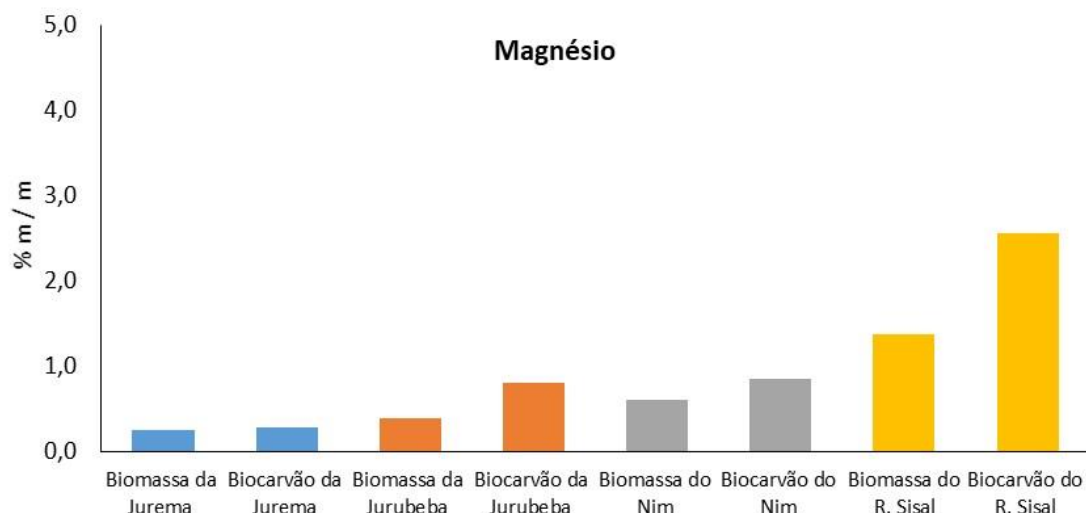
A natureza divalente do Ca e do Mg explica sua menor volatilização durante carbonização quando comparado com K e Na (KOWALSKI et al., 2007). De fato, quando pirolisado a temperaturas <500°C, Ca e Mg são principalmente retidos no biocarvão (OKUNO et al., 2005). Esses autores constataram que, durante pirólise lenta de serragem de pinus, Ca e Mg começaram a evoluir em temperaturas > 600°C, enquanto que durante pirólise rápida da mesma matéria-prima, 10-20% de Ca e Mg foram envolvidos em temperaturas <550°C. Isso foi atribuído à taxa muito maior de formação de radicais H durante a pirólise rápida do que durante a pirólise lenta, embora a exato mecanismo subjacente não é conhecido. A recuperação também dependia da presença de outros compostos como silicatos, por exemplo. A formação de Ca-silicatos é termodinamicamente mais favorável do que Mg-silicatos (OKUNO et al., 2005).

Muitas plantas contêm oxalato de cálcio fitólitos em suas folhas, casca e madeira e até 90% do cálcio total em plantas pode ocorrer como oxalato sais (NAKATA, 2003).

Minerais encontrados em biocarvões incluem silvita (KCl), quartzo (SiO<sub>2</sub>), sílica amorfa, calcita (CaCO<sub>3</sub>), hidroxiapatita (Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>) e outras fases menores, como fosfatos de Ca, anidrita (CaSO<sub>4</sub>). Vários nitratos e óxidos e hidróxidos de Ca, Mg, Al, titânio (Ti), Mn, zinco (Zn) ou Fe. A sílica amorfa é de particular interesse, pois normalmente está na forma de fitólitos que contêm e protegem a planta da degradação (WILDING et al., 1967; KRULL et al., 2003; SMITH e WHITE, 2004; PARR e SULLIVAN, 2005; PARR, 2006).

## **Magnésio**

Para o magnésio, conforme figura 28, os teores na biomassa e no biocarvão da Jurema foram de 0,26% e 0,29%, respectivamente. No biocarvão da jurubeba teve um aumento significativo, quase o dobro, de 0,39% para 0,81%. A biomassa do nim elevou de 0,61% para 0,86% e do sisal de 1,43% para 2,94%, após o procedimento de pirólise.



**Figura 28.** Análise comparativa dos teores de Magnésio nas biomassas e biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023

Dissimilaridades na solubilidade dependente do pH de K, Ca e Mg em biocarvões produzidos a partir de palha de milho foram descritos por SILBER et al., (2010). Nesse biocarvão específico, a concentração de Ca solúvel aumentou consideravelmente com a queda do pH, mas o efeito sobre o Mg foi menos acentuado e não efeito foi observado para K.

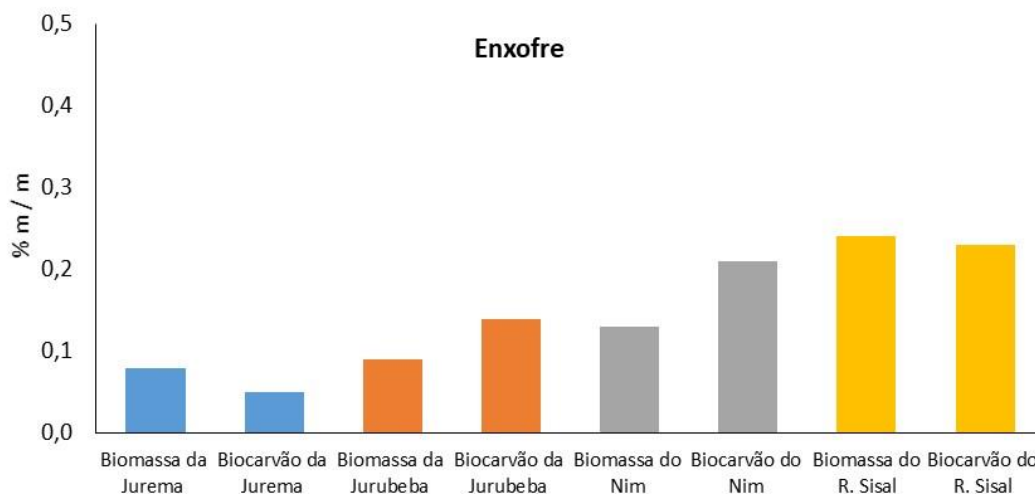
Calcita (e/ou Mg-calcita) e quartzo foram as duas fases cristalinas mais comuns identificadas nos biocarvões. A calcita é o principal constituinte das cinzas derivadas de muitas espécies de árvores (ETIÉGNI e CAMPBELL, 1991; ULERY et al., 1993), e em biocarvões (SINGH et al., 2010; PRAKONGKEP et al., 2015).

Neste estudo, o leve aumento na concentração de magnésio, comparado os teores observados na biomassa e no biocarvão, foram parecidos com os resultados obtidos para o elemento cálcio. Isso reforça que a temperatura de queima, alcançada neste trabalho, não foi suficiente para provocar perdas após a pirólise. O resíduo de sisal de destacou com maior teor de magnésio, sendo indicado como condicionador para solos com teores baixos tanto de cálcio, quanto de magnésio.

## Enxofre

A concentração de enxofre (S) no resíduo de sisal e biomassa de jurema foi mais abundante que a encontrada no biocarvão. Resultados diferentes foram

observados quando comparado com às outras matérias primas (jurubeba e nim), em que os valores de biomassa foram inferiores comparados aos dos biocarvões. Também em relação a este elemento, o biocarvão de sisal se destacou com os maiores valores observados entre os biocarvões analisados.



**Figura 29.** Análise comparativa dos teores de Enxofre nas biomassas e biocarvões de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023

O enxofre é um nutriente essencial para as plantas que, ao contrário do K, Ca e Mg, está sujeito à oxidação biológica e química reações de redução no solo. O enxofre na biomassa é encontrado como S ligado a C (por exemplo, cisteína, metionina), éster-S (por exemplo, armazenados em vacúolos quando o suprimento de sulfato está em excesso) e sulfato-S (DE KOK, 1993; KNUDSEN et al., 2004). C-ligado S se decompõe termicamente em temperaturas abaixo de 450–500°C durante a desvolatilização inicial de compostos organicamente associados S, enquanto o éster-S tende a se acumular e eventualmente se converter em sulfato-S (CHURKA BLUM et al., 2013; KNUDSEN et al., 2004), que é a forma termicamente mais estável de S (KHALIL et al., 2008; KNUDSEN et al., 2004).

Até 50% do enxofre total de oito tipos de biomassa foi perdido durante a pirólise a 500°C (LANG et al., 2005). Knudsen et al. (2004) estudaram a transformação de S durante a pirólise da típica palha de trigo dinamarquesa. Antes da pirólise, o S estava associado parcialmente como sulfato inorgânico (40 a 50% do S total) e parcialmente como proteínas (50 a 60%). Os resultados indicaram que 35 a 50% do S total foi liberado

para a fase gasosa durante a pirólise a 400°C como resultado da decomposição térmica do S orgânico.

Dadas as semelhanças entre os ciclos de S e N (Stevenson e Cole, 1999), existe um potencial significativo para o biocarvão influenciar a mineralização do S e a atividade de oxidação no solo (STEVENSON e COLE, 1999).

A mineralização do enxofre é favorecida em pH levemente ácido a neutro. Verificou-se que as taxas de mineralização de enxofre aumentam após o fogo em ecossistemas de floresta de pinheiros (Binkley et al., 1992), muito semelhante ao observado para N (SMITHWICK et al., 2005).

### 5.2.5. Micronutrientes

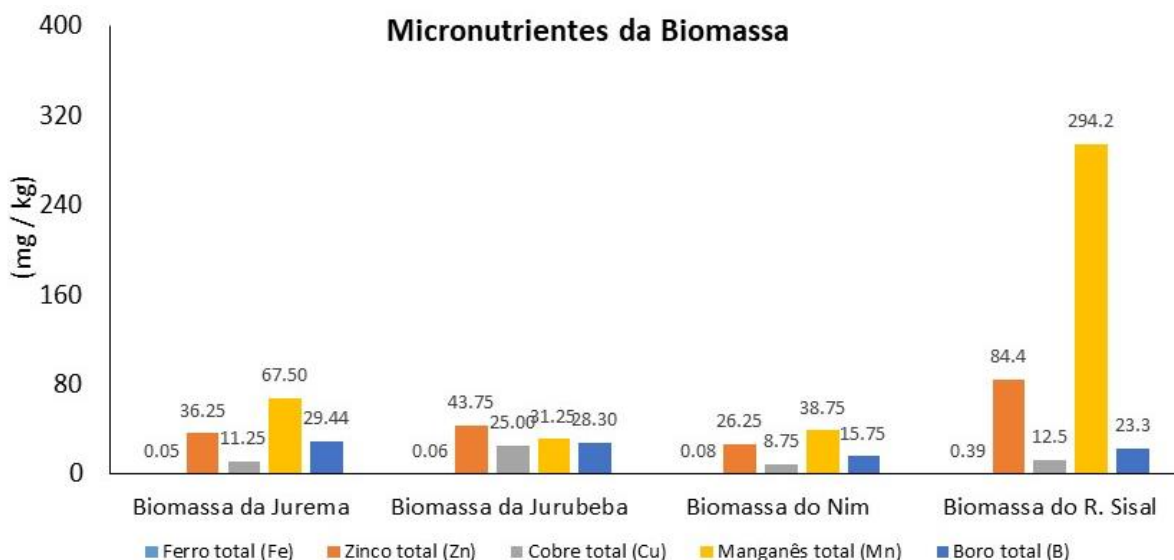
O manganês do biocarvão de resíduo de sisal foi de 334,00 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto na biomassa o valor encontrado foi de 294,2 mg kg<sup>-1</sup> (Figuras 30 e 31). Comparando o valor de zinco, o biocarvão apresentou 134,10 mg kg<sup>-1</sup> e a biomassa 84,40 mg kg<sup>-1</sup>. A concentração de boro da biomassa foi de 23,30 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto para o biocarvão foi de 29,70. O cobre teve 12,5 mg kg<sup>-1</sup> na biomassa, 25,00 mg kg<sup>-1</sup> para o biocarvão. Enquanto o de ferro foi de 0,37 % no biocarvão e a biomassa 0,39 %.

A biomassa da Jurema apresentou um total de Manganês de 67,50 mg kg<sup>-1</sup>, e 91,25 mg kg<sup>-1</sup> para o biocarvão. O teor de zinco foi de 36,25 mg kg<sup>-1</sup> na biomassa e 33,75 mg kg<sup>-1</sup> no biocarvão. O cobre teve na constituição da biomassa 16,25 mg kg<sup>-1</sup>, e no biocarvão 11,25 mg kg<sup>-1</sup>. Apresentou na biomassa 29,44 mg kg<sup>-1</sup> de boro, e no biocarvão 15,75 mg kg<sup>-1</sup> (Figuras 30 e 31). Para o elemento ferro foi de 0,11%, e no biocarvão 0,05%.

A concentração de manganês no biocarvão de jurubeba foi 65,00 mg kg<sup>-1</sup> em analogia a biomassa com teor de 31,25 mg kg<sup>-1</sup>. O zinco apresentou 67,50 mg kg<sup>-1</sup> no biocarvão e na biomassa 43,75 mg kg<sup>-1</sup> (Figuras 30 e 31). O cobre 43,75 mg kg<sup>-1</sup> e 25,00 mg kg<sup>-1</sup> para o biocarvão e biomassa, respectivamente. Em relação ao boro o valor em mg kg<sup>-1</sup> foi de 34,00 mg kg<sup>-1</sup> para o biocarvão e 28,30 mg kg<sup>-1</sup> para biomassa. A composição química de ferro foi de 0,42% para o biocarvão e de 0,06% para biomassa.

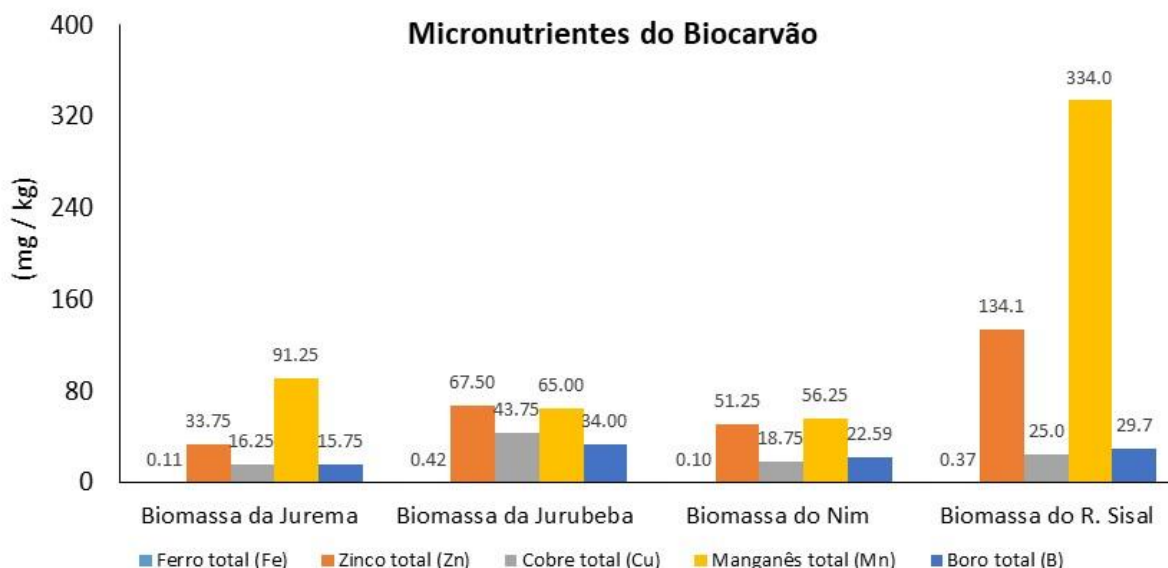
A análise realizada no nim possibilitou verificar uma concentração de 56,25 mg kg<sup>-1</sup> de manganês no biocarvão, enquanto foi encontrado 38,75 mg kg<sup>-1</sup> na biomassa (Figuras 30 e 31). Para o zinco a pirólise da biomassa que concentrava em 26,25 mg

kg<sup>-1</sup> e elevou para 51,25 mg kg<sup>-1</sup> no biocarvão (Figuras 30 e 31). O cobre teve um acréscimo de 10 mg kg<sup>-1</sup>, inicialmente na biomassa estava presente um teor de 8,75 mg kg<sup>-1</sup>. O Boro teve um aumento de 15,75 mg kg<sup>-1</sup> da biomassa para 22,59 mg kg<sup>-1</sup> no biocarvão (Figuras 30 e 31). Na biomassa estava presente um valor de 0,08% de Ferro, e no biocarvão teve 0,10% na sua constituição.



**Figura 30.** Análise comparativa da constituição de micronutrientes das biomassa de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal

Fonte: Autoria própria, 2023



**Figura 31.** Análise comparativa da constituição de micronutrientes dos biocarvões das amostras de jurema, jurubeba, nim e resíduo de sisal.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Ocorreu um acréscimo nos teores de ferro, zinco, cobre, manganês e boro com a realização do processo de pirólise. Mesmo com um aumento significativo dos teores de nutrientes encontrados, o valor do ferro foi muito baixo.

Além da matéria-prima, as condições do processo, principalmente temperatura de aquecimento mais alta, e a pressão parcial de O<sub>2</sub>, vapor e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) controlam as quantidades de cinzas minerais no biocarvão (BRIDGWATER e BOOCOOCK, 2006). Durante a degradação térmica, os íons de potássio (K) e cloro (Cl) são altamente móveis e começarão a vaporizar em temperaturas relativamente baixas (YU et al., 2005). O cálcio (Ca) está localizado principalmente nas paredes celulares e ligado a ácidos orgânicos (MARSCHNER, 1995). O silício (Si) está presente nas paredes celulares como sílica ou como opala fitólitos (MARSCHNER, 1995). Tanto o Ca quanto o Si são liberados durante a degradação em temperaturas muito mais altas do que K e Cl (BOURKE, 2006). O magnésio (Mg) está ligado ionicamente e covalentemente com moléculas orgânicas e só vaporiza em altas temperaturas. O fósforo (P) e o enxofre (S) estão associados a compostos orgânicos complexos dentro da célula e são relativamente estáveis em baixas temperaturas de degradação. O nitrogênio (N) está associado a várias moléculas orgânicas diferentes e pode ser liberado em temperaturas relativamente baixas (SCHNITZER et al., 2007). Outros elementos como o ferro (Fe) e o manganês (Mn) existem em um número de formas orgânicas e inorgânicas na biomassa e são amplamente retidos durante a formação do biocarvão.

O teor de cinzas está associado com os aspectos de quantitativos e qualitativos distintos de minerais encontrados na biomassa, assim minerais como P, K, Mg, Ca, Na, Fe entre outros, elevam o teor de cinzas (VALE et al., 2007).

Segundo Amonette e Joseph (2009), os fundamentais componentes da biomassa (Oxigênio, Hidrogênio e Carbono) são volatilizados durante o processo de desidratação e a carbonização (YANG et al., 2007), obtendo em um acréscimo do teor de carbono fixo. Inicialmente, o O<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub> são destituídos em forma de água; em seguida, em configuração de hidrocarbonetos, vapores, CO e CO<sub>2</sub>. (ANTAL e GRONLI, 2003; AMONETTE e JOSEPH, 2009).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os biocarvões apresentaram características distintas, devido a constituição das matérias-primas de origem serem diferentes. Embora, de maneira geral, os resultados indicam que os biocarvões estudados apresentam elevado teor de carbono e alta relação C/N, demonstrando ter potencial de uso a longo prazo o que favorece o estoque de carbono, caso seja adicionado ao solo.

A sua capacidade de retenção de água é elevada, principalmente no biocarvão de jurubeba, sendo esta uma grande vantagem dos biocarvões que podem melhorar o armazenamento de água dos solos ao serem misturados. Outra vantagem são os resultados de pH, confirmando ser um material alcalino que podem melhorar a acidez de solos com pH baixo. Neste quesito, o biocarvão de nim com pH 10 demonstra ser bastante promissor.

Os valores de macronutrientes e micronutrientes revelam que os biocarvões também são fontes de elementos químicos importantes para o crescimento das plantas, a exemplo do alto teor de nitrogênio observado no biocarvão de jurema, elevado teor de potássio observado no biocarvão da jurubeba e elevados teores de fósforo, cálcio, magnésio e enxofre, além de zinco e manganês observados no biovão de sisal. Outros estudos são importantes para investigar como ocorre a liberação destes elementos após a mistura dos biocarvões em diferentes solos.

A escolha de uma das fontes de biocarvão como condicionador de solos dependerá de qual parâmetro deseja melhorar, se físico ou químico. Devendo ser levado em consideração a disponibilidade da matéria-prima na região, procedimento de pirólise, taxa de rendimento para obtenção do biocarvão e granulometria das partículas de biocarvão, aspectos positivos que foram observados para o biocarvão de sisal.

Por fim, além dos aspectos elencados, é importante destacar o serviço ambiental que este processo apresenta que é a fixação de carbono no solo, filtragem e remediações das águas, e gestão dos resíduos, bem como a mitigação do efeito estufa.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, K. C. L. de M. Epidemiologia da podridão vermelha do sisal no Estado da Bahia. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, 2010.

AGUIAR, A., FERRAZ, A.; Revisão: Mecanismos envolvidos na biodegradação de materiais lignocelulósicos e aplicações tecnológicas correlatas. *Quim. Nova*, 34:1729-1738, 2011.

AKHTAR, S.S. *et al.* Interactive effect of biochar and plant growth-promoting bacterial endophytes on ameliorating salinity stress in maize. *Functional Plant Biology*, v.42, n. 8, p. 770–781, 2015.

AMONETTE, J. E.; JOSEPH, S. Characteristics of biochar: microchemical properties. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). *Biochar for environmental management science and technology*. London: Earthscan, 2009. p. 34-51.

ANTAL, M. J. and GRØNLI, M. (2003) 'The art, science, and technology of charcoal production', *Industrial Engineering and Chemical Research*, vol 42, pp1619–1640

ASTM D 1762-84, Standard Test Methods Small Clear Specimens of Timber. 1990

ASTM - D 3174 – 04 Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal.2004

ATKINSON, C. J.; FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil* v. 337, n. 1-2, p. 1–18 , 30 jun. 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11104-010-0464-5>>. Acesso em: 07 dez. 2022.

BAGREEV, A., BANDOSZ, T. J.; LOCKE, D. C. (2001) 'Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer', *Carbon*, vol 39, pp1971–1977.

BALDOCK, J. A.; SMERNIK, R. J. (2002) 'Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood', *Organic Geochemistry*, vol 33, pp1093–1109

BALLIETT, A. Terra Preta. Magic Soil of the Lost Amazon. *ACRES*, Austin, TX, V. 37, n. 2, 2007.

BARRÊTO, A.F.; ARAÚJO, E.; BONIFÁCIO, B.F. Eficiência de extratos de *Agave sisalana* (Perrine) sobre o ácaro rajado *Tetranychus urticae* (Koch) e ocorrência de fitotoxidez em plantas de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L. r *latifolium* Hutch). *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 5, p. 207-215, 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=000080&pid=S1806-6690201300040001200003&lng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000080&pid=S1806-6690201300040001200003&lng=pt). Acesso em 15 de abril 2022

BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory Pyrolysis. Elsevier Inc., 2.ed. 2013. p. 548.

BELTRÃO, N. E. M. A planta. In: ANDRADE, W. (Ed.). O Sisal do Brasil. 1.ed. Salvador: SINDIFIBRAS; Brasília: APEX-Brasil, 2006

BINKLEY, D., RICHTER, J., DAVID, M. B.; CALDWELL, B. (1992) 'Soil chemistry in a loblolly/longleaf pine forest with interval burning', Ecological Applications, vol 2, pp157–164

BIRD, M. I., MOYO, C., VEENENDAAL, E. M., LLOYD, J.; FROST, P. (1999) 'Stability of elemental carbon in savanna soil', Global Biogeochemical Cycles, vol 13, pp923–932

BLANCO-CANQUI, H., 2017. Biochar and Soil Physical Properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 81, 687. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>

BORNERMANN, L.; KOOKANA, R. S.; WELP, G. (2007) 'Differential sorption behavior of aromatic hydrocarbons on charcoals prepared at different temperatures from grass and wood', Chemosphere, vol 67, pp1033–1042

BOTURA, M.B.; SANTOS, J.D.G.; SILVA, G.D.; LIMA, H.G.; OLIVEIRA, J.V.A.; ALMEIDA, M.A.O.; BATATINHA, M.J.M.; BRANCO, A. In vitro ovicidal and larvicidal activity of Agave sisalana Perr. (sisal) on gastrointestinal nematodes of goats. Veterinary Parasitology, 2013; v. 192, p. 211–217. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.10.012>. Acesso em 15 de abril 2022

BOURKE, J.; MANLEY-HARRIS, M.; FUSHIMI, C.; DOWAKI, K.; NUNOURA, T.; ANTAL, M. J. (2007) 'Do all carbonized charcoals have the same chemical structure? 2. A model of the chemical structure of carbonized charcoal', Industrial Engineering and Chemical Research, vol 46, pp5954–5967

BOURKE, J. (2006) Preparation and Properties of Natural, Demineralized, Pure, and Doped Carbons from Biomass; Model of the Chemical Structure of Carbonized Charcoal, MS thesis, The University of Waikato, New Zealand, <http://adt.waikato.ac.nz/uploads/approved/adt-ow20070222.152711/public/02whole.pdf.pdf> , accessed 1 julho 2023

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de hortaliças não-convencionais. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/ Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. – Brasília: Mapa/ACS, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Especificações para padronização, classificação e comercialização interna do sisal bruto. Brasília, 1987. 7 p.

BRIDGWATER, A.V.; PEACOCKE, G.V. C. (2002) 'Fast pyrolysis processes for biomass', Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 4, pp1–73

BRIDGWATER, A.V. Progress in Thermochemical Biomass Conversion. Blackwell Science Oxford, 2001

BRIDGWATER, A.; BOOCOOCK, D.G. B. (2006) *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*, CPL Press, Newbury, UK

BRIDLE, T. R.; PRITCHARD, D. (2004) 'Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis', *Water Science and Technology*, vol 50, D. and Engelhard M. H. (2006) 'Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes', *Organic Geochemistry*, vol 37, pp1477–1488

BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W.; HAUMAIER, L.; ABETZ, C.; ZECH, W. (2005) 'Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy', *Geoderma*, vol 128, pp116–129

BROWN, R. A., KERCHER, A. K. NGUYEN, T. H., NAGLE, D. C., BALL, W. B. (2006) 'Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents', *Organic Geochemistry*, vol 37, pp321–333

BRUSSAARD, L., BOUWMAN, L. A., GEURS, M., HASSINK, J., ZWART, K. B. (1990) 'Biomass, composition and temporal dynamics of soil organisms of a silt loam soil under conventional and integrated management', *Netherlands Journal of Agricultural Science*, vol 38, pp282–302

BRUUN, E.W., Hauggaard-Nielsen, H., Ibrahim, N., Egsgaard, H., Ambus, P., Jensen, P.A., Dam-Johansen, K. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p.1182-1189, 2011.

BURRELL, L.D., ZEHETNER, F., RAMPAZZO, N., WIMMER, B., SOJA, G. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma* 282, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>

CALIXTO, G. Q. Extrato fenólico renovável a partir da carbonização da Jurema Preta (*Mimosa tenuiflora*) / Guilherme Quintela Calixto. - 2020. 72f.: il. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal, 2020.

CALLOW, R.K.; CORNFORTH, J.W. & SPENSLEY, P.C.A source of hecogenin. *Chemistry and Industry*, London, n.33: 699-700, 1951.

CALVELO PEREIRA R, KAAL J, CAMPS-ARBESTAIN M, PARDO LORENZO R, AITKENHEAD W, HEDLEY M, MACÍAS F, HINDMARSH J, MACIÁ-AGULLÓ JA (2011) Contribution to characterisation of biochar to estimate the labile fraction of carbon. *Organic Geochemistry* 42, 1331–1342. doi:10.1016/j.orggeochem.2011.09.002.

CAMPS-ARBESTAIN M, AMONETTE JE, SINGH B, WANG T, SCHMIDT HP (2015) A biochar classification system and associated test methods. In *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd edn. (Eds J Lehmann, S Joseph) pp. 165–194. Routledge, London

CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G.; UCHIMIYA, M.; NOVAK, J. M.; RO, K. S. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, v. 107, p. 419-428, 2012.

- CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G. 2007. Soil Sampling and Methods of Analysis. 1-1263p.
- CASTALDI, S., RIONDINO, M., BARONTI, S., ESPOSITO, MARZAIOLI, R., RUTIGLIANO, F.A., VACCARI, F.P., MIGLIETTA, F. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes. *Chemosphere*, v. 85, p. 1464-1471, 2011.
- CHEN, R.; LI, Q.; XU, X.; ZHANG, D. Comparative pyrolysis characteristics of representative commercial thermosetting plastic waste in inert and oxygenous atmosphere. *Fuel*, v. 246, p. 212221, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.129>
- CHENG C-H, LEHMANN J, THIES JE, BURTON SD, ENGELHARD MH (2006) Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry* 37, 1477–1488. doi:10.1016/j.orggeochem.2006.06.022.
- CHENG, C.-H., LEHMANN, J. AND ENGELHARD, M. (2008) 'Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol 72, pp1598–1610
- CHURKA BLUM S, LEHMANN J, SOLOMON D, CAIRES EF, ALLEONI LRF (2013) Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil. *Geoderma* 200–201, 156–164. doi:10.1016/j.geoderma.2013.02.003.
- COIMBRA, R. 1958. Notas de fitoterapia. Laboratório Clínico Silva Araújo, Rio de Janeiro.
- CORREIA, P. Dicionário das Plantas Úteis do Brasil, Ed. Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, v. 3, p. 545, 1984.
- COLEMAN, D. C. (1986) 'The role of microfloral and faunal interactions in affecting soil processes', in M. J. Mitchell and J. P. Naka (eds) *Microflora and Faunal Interactions in Natural and Agro-Ecosystems*, Martinus Nijhoff/Junk, Dordrecht, The Netherlands, pp317–348
- CORDULA, E.; MORIN, M. P.; ALVES, M. Morfologia de frutos e sementes de Fabaceae ocorrentes em uma área prioritária para a conservação da Caatinga em Pernambuco, Brasil. *Rodriguésia*, Rio de Janeiro, v. 65, n.2. 2014.
- COSTA, A.F. Farmacognosia. 3 ed. Lisboa: Fundação Calouste-Gulbenkian, v. 2. p. 712-713, 1975
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea Diagnóstico do Município de Serrinha Estado da Bahia / Organizado [por] Ângelo T. Vieira, Felicíssimo Melo, Hermínio Brasil V. Lopes, Hermínio Brasil V. Lopes, José C. Viégas Campos, José T Guimarães, Juliana M. da Costa, Luís Fernando C. Bomfim, Pedro Antonio de A. Couto, Sara Maria Pinotti Benvenuti . Salvador:CPRM/PRODEEM, 2005
- CROMBIE K, MAŠEK O, SOHI SP, BROWNSORT P, CROSS A (2013) The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy* 5, 122–131. doi:10.1111/gcbb.12030.

CZIMCZIK, C. I. AND MASIELLO, C.A. (2007) 'Controls on black carbon storage in soils', *Global Biogeochemical Cycles*, vol 21, pGB3005

DAI, L.; LI, H.; TAN, F.; ZHU, N.; HE, M.; HU, G. Biochar: a potential route for recycling of phosphorus in agricultural residues. *GCB Bioenergy*, v. 8, n. 5, p. 852-858, 2016.

DAMASCENO, J.C.A.; SOARES, A.C.F.; JESUS, F.N.; SANT'ANA, R.S. Sisal leaf decortication liquid residue for controlling *Meloidogyne javanica* in tomato plants. *Horticultura Brasileira*, v. 33, p. 155-162, 2015. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-05362015000200004](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362015000200004). <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362015000200004>. Acesso em: 25 de jun. 2022

DARI, B.; NAIR, V. D.; HARRIS, W. G.; NAIR, P. K. R.; SOLLENBERGER, L.; MYLAVARAPU, R. Relative influence of soil- vs. biochar properties on soil phosphorus retention. *Geoderma*, v. 280, p. 82–87, 2016.

DEMPSTER, D.N., GLEESON, D.B., SOLAIMAN, Z.M., JONES, D.L., MURPHY, D.V. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant and Soil*, v. 354, 311-324, 2011.

DE KOK LJ (1993) Sulfur nutrition and assimilation in higher plants. Workshop on Sulfur Metabolism in Higher Plants 1992. Garmisch-Partenkirchen, Germany. SPB Academic.

DELUCA, T. H., MACKENZIE, M. D., GUNDALE, M. J. AND HOLBEN, W. E. (2006) 'Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests', *Soil Science Society of America Journal*, vol 70, pp448–453

DELUCA, T. H. AND SALA, A. (2006) 'Frequent fire alters nitrogen transformations in ponderosa pine stands of the inland northwest', *Ecology*, vol 87, pp2511–2522

DELUCA, T. H., MACKENZIE, M. D., GUNDALE, M. J. AND HOLBEN, W. E. (2006) 'Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in forest ecosystems', *Soil Science Society America Journal*, vol 70, pp448–453

DEMIRBAS, A. AND ARIN, G. (2002) 'An overview of biomass pyrolysis', *Energy Sources*, vol 24, pp471–482

DIAS, J. M., ALVIM-FERRAZ, M. C. M., ALMEIDA, M. F., RIVERA-UTRILLA, J. AND SANCHEZ-POLO, M. (2007) 'Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review', *Journal of Environmental Management*, vol 85, pp833–846

DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade. p. 129-140, 2010.

DIAZ, LF, GOLUEKE, DG E SAVAGE, GM (1986) 'Balanço de energia na produção e uso de composto', em M. de Bertoldi, MP Ferranti, P. L'Hermite e F. Zucconi (eds) *Composto: Produção, Qualidade e Uso*, Atas de um simpósio organizado pela Comissão das Comunidades Européias, Udine, Itália, Elsevier, Holanda, pp6–19

DOMINGUES, L. F.; BOTURA, M. B.; CRUZ, A. C. F. G.; YUKI, C. C.; SILVA, G. D.; COSTA, M. S.; et al., ; Evaluation of anthelmintic activity of liquid waste of *Agave sisalana* (sisal) in goats. *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária*, v. 19, p. 270- 272, 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1984-29612010000400018](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-29612010000400018). <http://dx.doi.org/10.1590/S1984-29612010000400018>. Acesso em: 16 de ago. 2022

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. in Lehmann J, Joseph S (Eds) *Biochar for Environment Management*, Earthscan Publishers Ltd, London, Capítulo 2, 2009

DRUFFEL, E. R. M. (2004) 'Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle', *Marine Chemistry*, vol 92, pp197–200

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-Agrossilvipastoril (MT), Biocarvão feito com resíduos é testado como condicionador de solo - Portal Embrapa - 2012. Acesso em 13 abril 2022

EMBRAPA. JUREMA PRETA - Portal Embrapa – Disponível em : Jurema Preta - Portal Embrapa. Acesso em 18 de Junho de 2023

ETIÉGNI L, CAMPBELL AG (1991) Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology* 37, 173–178. doi:10.1016/0960-8524(91)90207-Z.

EZAWA,T.,YAMAMOTO, K. AND YOSHIDA, S. 2002 'Enhancement of the effectiveness of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi by inorganic soil amendments', *Soil Science and Plant Nutrition*, vol 48, pp897–900

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Caricapapaya L.*). *Acta Amazônica*. v. 36, p. 401-406, 2006.

FAO (United Nations Food and Agriculture Organization) (1983) *Simple Technologies for Charcoal Making*, FAO

FORESTRY Paper 41, FAO, Rome, [www.fao.org/docrep/S5328e/x5328e00.htm](http://www.fao.org/docrep/S5328e/x5328e00.htm), accessed 16 junho 2023

FAO STAT Database. Disponível em :<http://faostat.fao.org>. Acesso em 02 de outubro de 2022

FARMACOPÉIA DOS ESTADOS UNIDOS DO BRASIL. 1959. 2. ed. São Paulo, Ed. Gráfica Siqueira. p.543-544

FLORA DO BRASIL 2018 em construção. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em: 30 Mar. 2023.

FORBES, M. S., RAISON, R. J., SKJEMSTAD, J.O. (2006) 'Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems', *Science of the Total Environment*, vol 370, pp190–206

FORNI-MARTINS, E.R.; MARQUES, M.C.M.; LEMES, M.R. Biologia floral e reprodução de *Solanum paniculatum* L. (Solanaceae) no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira Botânica*, 21(2), 117-24, 1998

Franklin, R. E. (1951) 'Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons', *Proceedings of the Royal Society*, vol A209, pp196–218

FREITAS, M. C. M. B. Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa. In: IX Encontro Brasileiro de Substancia Humicas, 9., 2011, Aracaju-sergipe: Embrapa, 2011. 4 p. Disponível em: . Acesso em: 18 maio 2023.

FUERTES AB, CAMPS-ARBESTAIN M, SEVILLA M, MACIÁ-AGULLÓ JA, FIOL S, LÓPEZ R, SMERNIK RJ, AITKENHEAD WP, ARCE F, MACÍAS F (2010) Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover. *Soil Research* 48, 618–626. doi:10.1071/SR10010

FUKUSHI, Y.K.M. et al. Jurubeba (*Solanum scuticum*). In: VIEIRA, R.F.; CAMILLO, J.; CORADIN, L. Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: Plantas para o Futuro: Região Centro-Oeste. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade. Brasília, DF: MMA, 2016

FUKUYAMA, K., KASAHARA, Y., KASAHARA, N., OYA, A., NISHIKAWA, K. (2001) 'Small-angle X-ray scattering study of the pore structure of carbon fibers prepared from a polymer blend of phenolic resin and polystyrene', *Carbon*, vol 39, pp287–290

GALINATTO, S. P.; YODER, JONATHAN, K. J.; GRANATSTEIN, D. The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. *Energy Policy*, 39: 2011, 6344-6350.

GASPAR, Lúcia. Jurema. Pesquisa Escolar Online, Fundação Joaquim Nabuco, Recife. Disponível em: <<http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

GASKIN JW, STEINER C, HARRIS K, DAS KC, BIBENS B (2008) Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE* 51, 2061–2069. doi:10.13031/2013.25409.

GEE GW, BAUDER, J. W. Particle-size Analysis. In: KLUTE, A.; GEE, G. W.; BAUDER, J. W. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*. Madison: SSSA Book Series, 1986. Cap. 15. p. 383-411.

GLAB, T.; PALMOWSKA, J.; ZALESKI, T.; GONDEK, K. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, v. 281, p. 11–20, 2016.

GLASER, B., HAUMEIER, L., GUGGENBERGER, G. AND ZECH, W. (2001) 'The "Terra Preta" Phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics', *Naturwissenschaften*, vol 88, pp37–41

GLASER, B., LEHMANN, J. AND ZECH, W. (2002) 'Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review', *Biology and Fertility of Soils*, vol 35, pp219–230

GLASER, B.; WOODS, W.I. (Eds.). Amazonian Dark Earths: origin, properties, and management. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p.125-139. 2003.

GOLDBERG, E.D. (1985) *Black Carbon in the Environment*, John Wiley and Sons, Inc, New York, NY

GONDIM, T. M. S; SOUZA, L. C. Caracterização de Frutos e Sementes de Sisal. Circular técnica (EMBRAPA). Campina Grande, PB, Novembro, 2009

GUNDALE, M.J., DELUCA, T.H. (2006) 'Temperature and substrate influence the chemical properties of charcoal in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem', *Forest Ecology and Management*, vol 231, pp86–93

GRABER, E.R. Biochar for 21st century challenges: Carbon sink. Energy source and soil conditioner. 2009. Disponível em: . Acesso em: 20 set. 2022.

GROHMANN, F.; RAIJ, B. VAN. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos Argilosos. *Rev. Bras. Cienc. Solo*.1977; 1:52-53.

GUNAMANTHA, I. M.; WIDANA, G. A. B. Characterization the potential of biochar from cow and pig manure for geoecology application. *Earth and Environmental Science*, v. 131, n. 1, p. 1-6, 2018.

GUNES, A.; INAL, A.; TASKIN, M. B.; SAHIN, O.; KAYA, E. C.; ATAKOL, A. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv.) grown in alkaline soil. *Soil Use and Management*, v. 30, n. 2, p. 182-188, 2014.

HANKE, D. (2020). Seria o biocarvão uma alternativa potencial para o desenvolvimento da agricultura familiar? Uma tentativa de consolidação de tecnologias sociais com foco na dinâmica do C no solo. *Cadernos de Agroecologia*, 15(2)

HAMER, U., MARSCHNER, B., BRODOWSKI, S., AMELUNG, W. (2004) 'Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation', *Organic Geochemistry*, vol 35 pp823–830

HAUSTEEN, B. 1983. Flavonoids, a class of natural products of high pharmacological potency. *Biochem. Pharm.*, 32: 1141-1148.

HITOSHI, T., AI, F., HARUO, H. (2002) 'Development of advanced utilization technologies for organic waste: (Part 1) Greenhouse gas and nutrient salt adsorption properties of wood-based charcoal', *Denryoku Chuo Kenkyujo Abiko Kenkyujo Hokoku*, Research Report of Abiko Research Laboratory, no U02010

HOCKADAY, W. C. (2006) *The Organic Geochemistry of Charcoal Black Carbon in the Soils of the University of Michigan Biological Station*, PhD thesis, Ohio State University, US

HOCKADAY, W. C., GRANNAS, A. M., KIM, S. AND HATCHER, P. G (2006) 'Direct molecular evidence for the degradation and mobility of black carbon in soils from ultrahigh-resolution



mass spectral analysis of dissolved organic matter from a fire-impacted forest soil', *Organic Geochemistry*, vol 37, pp501–510

HOLANDA, E. B. N. Morfologia e propriedades mecânicas da fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósito com resina epóxi. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores - Acesso://www.abaf.org.br/wp-content/uploads/2020/10/relatorio-iba-2020.pdf no dia 29.12.2022

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI) Guidelines. Standardized Product Definition and international.org/sites/default/files/Guidelines\_for\_Biochar\_That\_Is\_Used\_in\_Soil\_Fial.pdf (acessado em 16 outubro de 2022)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, Japan, [www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html](http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html)

IPCC - Conferência Latino Americana Sobre Meio Ambiente e Responsabilidade Social. Mudança climática 2007: Mitigação e mudanças climáticas, Paris: IPCC, 2007. 36p. Relatório do IPCC/ONU

IQBAL, M. O., & YAHYA, E. B. In vivo assessment of reversing aminoglycoside antibiotics nephrotoxicity using *Jatropha mollissima* crude extract. *Tissue and Cell*, v. 72, p. 101525, 2021

ISHII, T.; KADOYA, K. (1994) 'Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus and vesicular-arbuscular mycorrhizal development', *Journal of the Japanese Society of Horticultural Science*, vol 63, pp529–535

JESUS, F. N.; DAMASCENO, J. C. A.; BARBOSA, D. H. S. G.; MALHEIRO, R.; PEREIRA, J. A.; SOARES, A. C. F. Control of the banana burrowing nematode using sisal extract. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 35, n. 2, p. 783 - 791, 2015. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0264-z>. Acesso em 15 de set. 2022

JOSEPH, S. D. et al. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*, Victoria, v. 48, n. 7, p. 501-515, 2010.

KEILUWEIT, M.; NICO, P. S.; JOHNSON, M. G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science and Technology*, v. 44, n. 4, p. 1247–1253, 2010

KERCHEK, A. K.; NAGLE, D. C. (2002) 'Evaluation of carbonized medium-density fiberboard for electrical applications', *Carbon*, vol 40, pp1321–1330

KHALIL RA, SELJESKOG M, HUSTAD JE (2008) Sulfur abatement in pyrolysis of straw pellets. *Energy and Fuels* 22, 2789– 2795. doi:10.1021/ef8001235

KISHIMOTO S, SUGIURA G (1985) Charcoal as a soil conditioner. In Symposium on Forest Products Research International: Achievements for the Future. Vol. 5, pp. 12/23/1–12/23/15. CSIR, Pretoria.

KLEBER M, HOCKADAY W, NICO PS (2015) Characteristics of biochar: macro-molecular properties. In Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd edn. (Eds J Lehmann, S Joseph). pp. 111–137. Routledge, London.

KNOEPP, J. D., DEBANO, L. F., NEARY, D. G. (2005) Soil Chemistry, RMRS-GTR 42-4, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT

KNUDSEN, J. N., JENSEN, P. A., LIN, W. G. FRANDSEN, F. J., DAM-JOHANSEN, K. (2004) 'Sulfur transformations during thermal conversion of herbaceous biomass', Energy and Fuels, vol 18, pp810–819

KOOKANA RS, SARMAH AK, VAN ZWIETEN L, KRULL E, SINGH B (2011) Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. Advances in Agronomy 112, 103–143. doi:10.1016/B978-0-12-385538-1.00003-2.

KOUL, O.; ISMAN, M. B.; KETKAR, C. M. Properties and uses of neem, *Azadirachta indica*. Canadian Journal of Botany, Ottawa, v.68, n.1, p.1-11, 1990.

KRULL, E.S.; BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J.O.; SMERNIK, R.J. Characteristics of biochar: Organo-chemical properties. IN: LEHMANN, J.; JOSEPH, S., eds. Biochar for Environmental Management: Science and Technology, London: Earthscan, 2009. p.67- 84.

KRULL, E. S., SKJEMSTAD, J. O., GRAETZ, D., GRICE, K., DUNNING, W., COOK, G. D., PARR, J. F. (2003) '13C-depleted charcoal from C3 and C4 grasses and the role of occluded carbon in phytoliths', Organic Geochemistry, vol 34, pp1337–1352

KUMAR, V., SHARMA, N., UMESH, M., SELVARAJ, M., AL-SHEHRI, B. M., CHAKRABORTY, P., ... & MAITRA, S. S. Emerging challenges for the agro-industrial food waste utilization: A review on food waste biorefinery. Bioresource Technology, p. 127790, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127790>

LABEGALINI, André. Obtenção de biochar a partir da pirólise rápida da torta de Pinhão-Manso: Uso como adsorvente e suporte. 117 f. (Dissertação, Química Ambiental) – Agroquímica, Universidade Federal de Lavras – MG [http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/1639/2/DISSERTACAO\\_Obten%C3%A7%C3%A3o%20de%20biochar%20a%20partir%20da%20pir%C3%B3lise....pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/1639/2/DISSERTACAO_Obten%C3%A7%C3%A3o%20de%20biochar%20a%20partir%20da%20pir%C3%B3lise....pdf). Acesso 09 de mai. 2022.

LAINE, J., YUNES, S. (1992) 'Effect of the preparation method on the pore size distribution of activated carbon from coconut shell', *Carbon*, vol 30, pp601–604

LAIRD, D.; FLEMING, B.Q.; WANG, R.H.; KARLEN, D. et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, v. 158, n. 3-4, p. 436–442, 2010.

LAL, R. (2004) 'Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security', *Science*, vol 304, pp1623–1627

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science*, v. 60, n. 2, p. 158–169, 2009.

LEE, Y. et al. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C. *Bioresour. Technol.*, v.148, p. 196–201, 2013.

LEHMANN J (2007) Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 381–387. doi:10. 1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2

LEHMANN, J., DA SILVA JR., J. P., STEINER, C., NEHLS, T., ZECH, W., GLASER, B. (2003) 'Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure, and charcoal amendments', *Plant and Soil*, vol 249, pp343–3578

LEHMANN, J. (2007) 'Bio-energy in the black', *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol 5, pp381–387

LEHMANN, J. AND JOSEPH, S.: Biochar for environmental management: An introduction, in *Biochar for environmental management science and sechnology*, edited by J. Lehmann and S. Joseph, Earthscan, UK., 2009. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781134489534/chapters/10.4324/9780203762264-8>. Acessado em 13/09/2022.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology e Biochemistry*, 43, 1812–1836. 2011.

LEHMANN J, GAUNT J, AND RONDON M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review. *Mitig. Adapt Strategy Global Change* 11: 403–27, 2006

LIANG, X.-Q., JI, Y. J., HE, M.-M., SU, M.-M., LIU, C., TIAN, G.-M., . A simple N balance assessment for optimizing the biochar amendment level in paddy soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 45, 1247–1258. 2014.

LIMWIKRAN, T., KHEORUENROMNE, I., SUDDHIPRAKARN, A., PRAKONGKEP, N., GILKES, R.J. Dissolution of K, Ca, and P from biochar grains in tropical soils. *Geoderma*, v. 312, p. 139–150, 2018.

LIU, Y., HU, H. X-ray diffraction study of bamboo fibres treated with NaOH. *Fibers Polym.* 19, pag.735–739, 2008

LÔBO, K.M.S.; ATHAYDE, A.C.R.; SILVA, A.M.A.; RODRIGUES, F.F.G.; LÔBO, I.S.; BEZERRA, D.A.C.; COSTA, J.G.M. 2010 Avaliação da atividade antibacteriana e prospecção fitoquímica de *Solanum paniculatum* Lam. e *Operculina hamiltonii* (G. Don) D. F. Austin & Staples, do semiárido paraibano. *Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu*, v.12, n.2, p.227-233

LORENZ, K. & LAL, R. (2014). Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbono sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 177, n.5, pp. 651-670.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, L. F.; ALMEIDA, A. Q. Influência das espécies exóticas arbóreas urbanas na área de cobertura da cidade de Serra Talhada – PE. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, Piracicaba, v. 8, n. 3, p.96-107, 2013.

LUO, Y., DURENKAMP, M., De Nobili, M., Lin, Q., Devonshire, B.J., Brookes, P.C. Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350°C or 700°C, in a silty-clay loam soil of high and low pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 57:513-523, 2013.

LUXMOORE, R. J. (1981) 'Microporosity, mesoporosity, and macroporosity of soil', *Soil Science Society of America Journal*, vol 45, pp671–672

MACHADO, Gilmara Oliveira et al. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.) Influence of temperature carbonization in physical, chemical and energy of charcoal from cinamomo. *AMBIÊNCIA*, v. 10, n. 1, p. 83-96, 2014.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, v.28, p.329-334, 2005. [http:// dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026](http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026)

MADARI, B. E. et al. Carvão Vegetal como condicionador de solo para Arroz de Terras Altas (Cultivar Primavera): um estudo prospectivo. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão. 06p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico, 125). 2006

MADARI, B.E.; PETTER, F.A.; CARVALHO, M.T.M.; MACHADO, D.M.; SILVA, O.M.; FREITAS, F.C; OTONI, R.F. Biomassa carbonizada como condicionante de solo para a cultura do arroz de terras altas, em solo arenoso, no Cerrado: efeito imediato para a fertilidade do solo e produtividade das plantas. Comunicado Técnico, Embrapa, Goiânia, Brazil, 197, pp 8, 2010

MANYÀ, J. J. Pyrolysis for Biochar Purposes: A Review to Establish Current Knowledge Gaps and Research Needs. *Environmental Science & Technology*, [s.l.], v. 46, n. 15, p.7939-7954, 7 ago. 2012. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es301029g>

MARSCHNER, H. (1995) *The Mineral Nutrition of Higher Plants*, Academic Press, San Diego, CA

MARTIN, A. R. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. *Polímeros*, São Carlos, v. 19, n. 1, pag. 40-46, 2009.

MARTÍNEZ, M. L., TORRES, M. M., GUZMÁN, C. A., MAESTRI, D. M. (2006) 'Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells', *Industrial Crops and Products*, vol 23, pp23–28

MARTINEZ, S. S. O Nim – *Azadirachta indica* – natureza, usos múltiplos, produção. Londrina: IAPAR, 142p, 2002.

MARY, G. S. et al. Production, characterization and evaluation of biochar from pod (*Pisum sativum*), leaf (*Brassica oleracea*) and peel (*Citrus sinensis*) wastes. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, New York, v. 5, n. 1, p. 43-53, Mar. 2016.

MASIELLO, C. A., DRUFFEL, E. R. M. (1998) 'Black carbon in deep-sea sediments', *Science*, vol 280, pp1911–1913

MATSUBARA, Y.-I., HASEGAWA, N. AND FUKUI, H. (2002) 'Incidence of *Fusarium* root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments', *Journal of the Japanese Society of Horticultural Science*, vol 71, pp370–374

MAYER, Z. A.; ELTON, Y.; STENNETT, D.; SCHROEDER, E.; APFELBACHER, A.; HORNING, A. Characterization of engineered biochar for Soil Management. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v.33, p.490-496, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.11788>

MBAGWU, J. S. C. (1989) 'Effects of organic amendments on some physical properties of a tropical Ultisol', *Biological Wastes*, vol 28, pp1–13

MCBEATH AV, SMERNIK RJ (2009) Variation in the degree of aromatic condensation of chars. *Organic Geochemistry* 40, 1161–1168. doi:10.1016/j.orggeochem.2009.09.006.

MEDINA, J. C. - "O sisal", Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, São Paulo 1954

MEGGIATO, JR. D. et al. Sisal fibers: Surface chemical modification using reagent obtained from renewable source, characterization of hemicellulose and lignin as model study. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, v. 55, pag 8576–8584, 2007

MELILLO, J. M., ABER, J. D. AND MURATORE, J. F. (1982) 'Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics', *Ecology*, vol 63, pp621–626

MILLER, R. M. AND JASTROW, J. D. (1990) 'Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation', *Soil Biology and Biochemistry*, vol 22, pp579–584

MIYASAKA, S., OHKAWARA, T., NAGAI, K., YAZAKI, H., SAKITA, M.N. Técnicas de produção e uso do Fino de Carvão e Licor Pirolenhoso In: ENCONTRO DE PROCESSOS DE PROTEÇÃO DE PLANTAS: Controle ecológico de pragas e doenças, 1., Botucatu. Resumo. p.161-176. 2001. Disponível em: . Acesso em 13 abril 2023

MUKHERJEE A, LAL R (2014) The biochar dilemma. *Soil Research* 52, 217. doi:10.1071/SR13359.

MUKHERJEE A, ZIMMERMAN AR, HARRIS W (2011) Surface chemistry variations among a series of laboratory produced biochars. *Geoderma* 163, 247–255. doi:10.1016/j.geoderma.2011.04.021.

MUKOME, F.N.D.; ZHANG, X.; SILVA, L.C.R.; SIX, J.; PARIKH, S.J. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 61, p. 2196-2204, 2013.

MWAIKAMBO, L. Y., & ANSELL, M. P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 84(12), 2222-2234. <https://doi.org/10.1002/app.10460> NETO, L. C. I., MARTINS, F. M. Anatomia dos órgãos vegetativos de *Agave sisalana* Perrine ex EN-GELM (Agavaceae). *Revista Caatinga*. 2012.

NAKASHIMA, G. T. USE of sugarcane trash for solid biofuel production: physicochemical characterization and influence of storage time.2016,p 59. Universidade Federal de São Carlos,Sorocaba,2016.

NEARY, D. G., KLOPATEK, C. C., DEBANO, L. F. AND FOLLIOTT, P. F. (1999) 'Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis', *Forest Ecology and Management*, vol 122, pp51–71

NOVAK JM, BUSSCHER WJ, LAIRD DL, AHMEDNA M, WATTS DW, NIANDOU MAS (2009) Impact of biochar amendment on fertility of a south-eastern coastal plain soil. *Soil Science* 174, 105–112. doi:10.1097/SS. 0b013e3181981d9a

NOVAK JM, LIMA I, XINGB, GASKIN JW, STEINER C DAS KC., SCHOMBERG H. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Ann. Environmental. Sci.* 2009:3(843); 195–206.

NEMA - Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Disponível em NEMA / UNIVASF. Acesso em 18 de Junho de 2023

OBIA, A.; MULDER, J.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G.; BØRRESEN, T. 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research* 155: 35–44.

OGAWA, M.,YAMBE,Y. AND SUGIURA,G. (1983) 'Effects of charcoal on the root nodule formation and VA mycorrhiza formation of soy bean', *The Third International Mycological Congress (IMC3)*, Abstract 578

OKUNO T, SONOYAMA N, HAYASHI JI, LI CZ, SATHE C, CHIBA T (2005) Primary release of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis of pulverized biomass. *Energy and Fuels* 19, 2164–2171. doi:10.1021/ ef050002a

OLIVEIRA, A.C. Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal. 2012. 74p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

OLIVEIRA, ARTHUR VINÍCIUS DE. 2021.Estudo da produção e caracterização de Biochar oriundo da pirólise do resíduo de Maçã e suas aplicações [recurso eletrônico] / Arthur Vinícius de Oliveira. 2021.

OLIVEIRA, D.M. 2017. Biocarvão e adubação fosfatada no crescimento de mudas de castanheira-do-brasil em latossolo amarelo da Amazônia Central. Tese de doutorado, Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho", Campus Botucatu. Botucatu, São Paulo. 96p.

OLIVEIRA, F. D. A. et al. Desenvolvimento e concentração de nitrogênio, fósforo e potássio no tecido foliar da berinjela em função da salinidade. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 6, n. 1, p. 37-45, 2011.

PANDOLFO, A. G., AMINI-AMOLI, M. AND KILLINGLEY, J. S. (1994) 'Activated carbons prepared from shells of different coconut varieties', *Carbon*, vol 32, pp1015–1019

PARR, J. F. (2006) 'Effect of fire on phytolith coloration', *Geoarchaeology – An International Journal*, vol 21, pp171–185 Parr, J. F. and Sullivan, L. A. (2005) 'Soil carbon sequestration in phytoliths', *Soil Biology and Biochemistry*, vol 37, pp117–124

PARR, J. F. AND SULLIVAN, L. A. (2005) 'Soil carbon sequestration in phytoliths', *Soil Biology and Biochemistry*, vol 37, pp117–124

PASTOR-VILLEGAS, J., PASTOR-VALLE, JF, MENESES RODRÍGUEZ, JM E GARCÍA, M. (2006) 'Estudo de carvões de madeira comercial para a preparação de adsorventes de carbono', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol 76, pp103–108

PAUL, E. A. (ed) (2007) *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*, third edition, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands

PEAKE LR, REID BJ, TANG X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*. 2014: 235–236; 182– 190.

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

PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T., MARIMON JR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.47, n.5, p.699-706, 2012.

PICANCIO, A. C. S. Gestão da qualidade aplicada à melhoria do processo de produção de carvão vegetal. 2011. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

POLETTO, M. Assessment of the thermal behavior of lignins from softwood and hardwood species. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 19, n. 1, p. 63-74, 2017.

PRAKONGKEP N, GILKES RJ, WIRIYAKITNATEEKUL W (2015) Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178, 732–740. doi:10.1002/ jpln.201500001.

PRAKONGKEP, N.; GILKES, R. J.; WIRIYAKITNATEEKUL, W. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 178, n. 5, p. 732–740, 2015.

PRATIWI, E.P.A., SHINOBI, Y., 2016. Rice husk biochar application to paddy soil and its effects on soil physical properties, plant growth, and methane emission. *Paddy Water Environ.* 14, 521–532. <https://doi.org/10.1007/s10333-015-0521-z>

PRESTON, C. M. AND SCHMIDT, M.W. I. (2006) 'Black (pyrogenic) carbon: A synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions', *Biogeosciences*, vol 3, pp397–420

PRESTON CM, SCHMIDT MWI (2006) Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. *Biogeosciences* 3, 397–420. doi:10.5194/bg-3-397-2006.

PRESTON, C. M. AND SCHMIDT, M.W. I. (2006) 'Black (pyrogenic) carbon: A synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions', *Biogeosciences*, vol 3, pp397–420

PROTÁSIO, T. P.; DA COSTA, J. S.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; DE ASSIS, M. R.; DA SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; DIAS JÚNIOR, A. F.; TRUGILHO, P. F. Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. *International Journal of Environmental Science and Technology*, p. 1-18, 2021.

RAIJ, B. V. Correção do solo. In: RAIJ, B. van. (Ed.). *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba: IPNI, p. 352-375. 2011.

REZENDE, E. I. P.; ANGELO, L. C.; DOS SANTOS, S. S.; MANGRICH, A. S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. *Rev. Virtual Quim.*, 3(5), 426-433, 2011.

RIBEIRO, S. R., FORTES, C. C., OLIVEIRA, S. C. C., CASTRO, C. F. S. Avaliação da atividade antioxidante de *solanum paniculatum* (solanaceae). *Arq. Ciênc. Saúde Unipar*, Umuarama, v. 11, n. 3, p. 179-183, set./dez. 2007.

RIBEIRO, V.; VIEIRA, I. L. B. F.; PASSOS, D. C. S. dos.; SILVA, E. M. de.; VALE, C. R. do.; FELICIO, L. R.; FERREIRA, D. H.; VIEIRA, P. M.; CARVALHO, S de. 2009. Ausência de mutagenicidade de *solanum paniculatum* L. em células somáticas de *Drosophila melanogaster*: SMART/ asa. *Rer Biol. Neotrop.* 6 (2): 27-33.

RILLIG, M. C., WRIGHT, S. F. AND EVINER, V.T. (2002) 'The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species', *Plant and Soil*, vol 238, pp325–333

ROBSON, A.D., ABBOTT, L. K. AND MALAJCZUK, N. (1994) 'Management of mycorrhizas in agriculture, horticulture, and forestry', in *Proceedings of the International Symposium on Management of Mycorrhizas in Agriculture, Horticulture, and Forestry*, 28 September–2 October 1992, Perth, Australia

ROGOVSKA, N., LAIRD, D.A., RATHKE, S.J., KARLEN, D.L. 2014. Biochar impact on Midwestern Mollisols and maize nutrient availability. *Geoderma* 230–231, 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.009>



RONDON, M., LEHMANN, J., RAMIREZ, J., HURTADO, M. (2007) 'Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions', *Biology and Fertility of Soils*, vol 43, pp699–708

ROSA, M. F. ; SOUZA FILHO, M S. M.; Valorização de resíduos da agroindústria. II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, 2011.

RUMPEL, C., CHAPLOT, V., PLANCHON, O., BERNADOU, J., VALENTIN, C., MARIOTTI, A. (2006) 'Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture', *Catena*, vol 65, pp30–40

SAITO, M. (1990) 'Charcoal as a micro habitat for VA mycorrhizal fungi, and its practical application', *Agriculture, Ecosystems, and the Environment*, vol 29, pp341–344

SAITO, M., MARUMOTO, T. (2002) 'Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi: The status quo in Japan and the future prospects', *Plant and Soil*, vol 244, pp273–279

SAMONIN, V. V., ELIKOVA, E. E. (2004) 'A study of the adsorption of bacterial cells on porous materials', *Microbiology*, vol 73, pp810–816

SANTOS JUNIOR, José Mendes dos Santos - PELLETS DE BIOCHAR COMO CONDICIONADOR DE SOLO NA PRODUÇÃO E NUTRIÇÃO DE *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. BRS PAIAGUÁS - José Mendes dos Santos Júnior, Montes Claros, 2022.

SANTOS, J. L. S. Biocarvão como condicionador da fertilidade e da microbiota de solo de Cerrado cultivado com soja. 102 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SANTOS NETO, O. D.; KARSBURG, I. V. e YOSHITOME, M. Y. Viabilidade e germinabilidade polínica de populações de Jurubeba (*Solanum paniculatum*). *Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta*, v.4, n.1 p.67-74, 2006.

SARFARAZ, Q.; DA SILVA, L. S.; DRESCHER, G. L.; ZAFAR, M.; SEVERO, F. F.; KOKKONEN, A.; DAL MOLIN, G.; SHAFI, M. I.; SHAFIQUE, Q.; SOLAIMAN, Z. M. Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. *Scientific Reports*, v. 10, n. 955, p. 1-9, 2020.

SAXENA, R.C. Naturally occurring pesticides and their potential. In: L. W. Shemilt (ed.). *Chemistry and World Food Supplies: The New Frontiers*, Pergamon Press, Oxford, 664p, 1983.

SCHNITZER, M. I., MONREAL, C. M., JANDL, G., LEINWEBER, P. (2007) 'The conversion of chicken manure to biooil by fast pyrolysis II. Analysis of chicken manure, biooils, and char by curie-point pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Cp Py-GC/MS)', *Journal of Environmental Science and Health B*, vol 42, pp79–95

SCHMIDT, M. W. I., NOACK, A. G. (2000) 'Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges', *Global Biogeochemical Cycles*, vol 14, pp777–794

SCHNITZER, M. I., MONREAL, C. M., JANDL, G. AND LEINWEBER, P. (2007) 'The conversion of chicken manure to biooil by fast pyrolysis II. Analysis of chicken manure, biooils, and char by curie-point pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Cp Py-GC/MS)', *Journal of Environmental Science and Health B*, vol 42, pp79–95

SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 410-422, 2015. dx.doi.org/10.1002/jpln.201100143

SHENBAGAVALLI, S.; MAHIMAIRAJA, S. Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil. *International Journal of Advanced Biological Research*, 2: 249-255, 2012.

SIEBENEICHLER, E. A.; DA COSTA, L. M.; FIGUEREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A. Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, v. 8, n. 2, p. 82–94, 2017

SILBER A, LEVKOVITCH I, GRABER ER (2010) pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications. *Environmental Science and Technology* 44, 9318–9323. doi:10.1021/es101283d.

SILVA, L.B. et al. Estudo comparativo da madeira de *Mimosa ophthalmocentra* Mart. ex Benth e *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Fabaceae-mimosoideae) na Caatinga nordestina. *Acta Bot. Bras.*, Feira de Santana, vol.25, n.2. Apr./June. 2011.

SILVA, O. R. R.; BELTRÃO, N. R. R. F. - "O Agronegócio do Sisal no Brasil", Embrapa, Brasília 1999.

SILVA, O. R. R. F. da; et al. Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro, Circular Técnica n. 123, Embrapa, Campina Grande, PB, 2008.

SINGH B, SINGH BP, COWIE AL (2010) Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 48, 516. doi:10.1071/SR10058.

SKJEMSTAD, J. O., GRAETZ, R. D. (2003) 'The impact of burning on the nature of soil organic matter in Australia', *Agronomia*, vol 37, pp85–90

SMERNIK, R. J., KOOKANA, R. S., SKJEMSTAD, J.O. (2006) 'NMR characterization of <sup>13</sup>C-benzene sorbed to natural and prepared charcoals', *Environmental Science and Technology*, vol 40, pp1764–1769

SMITH, F. A., WHITE, J.W. C. (2004) 'Modern calibration of phytolith carbon isotope signatures for C3/C4 paleograssland reconstruction', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol 207, pp277–304

SOHI, S.P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105: 47-82, 2010

SONG, W.; GUO, M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 94, p. 138-145, 2012

SOTO, J.; DIAZ, J.; RAMIREZ, M. Diagnostico florístico y fitosanitario de las especies arbóreas presentes en la parroquia Francisco Eugenio Bustamante, Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, Maracaibo, v. 31, p.341-361, 2014.

SOUZA, M. H. 2019. Caracterização e efeitos de biocarvões para uso agrônômico em solo arenoso. Tese de doutorado. Universidade federal de mato grosso, faculdade de agronomia e zootecnia. Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, 150p.

STALS, M.; THIJSSSEN, E.; VANGRONSVELD, J.; CARLEER, R.; SCHREURS, S.; YPERMAN, J. Flash pyrolysis of heavy metal contaminated biomass from phytoremediation: Influence of temperature, entrained flow and wood/leaves blended pyrolysis on the behaviour of heavy metals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 87, n. 1, p. 1–7, 2010.

STEINBEISS, S., GLEIXNER, G. & ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 41, p. 1301– 1310, 2009.

STEVENSON, F.J., COLE, M.A. (1999) *Cycles of the Soil*, second edition, John Wiley and Sons, Inc, New York, NY

SUÁREZ-GARCÍA F, MARTÍNEZ-ALONSO A, FERNÁNDEZ LLORENTE M, TASCÓN JMD (2002) Inorganic matter characterization in vegetable biomass feedstocks. *Fuel* 81(9), 1161–1169. doi:10.1016/S0016-2361(02)00026-1.

SUDHAKAR, Y., DIKSHIT, A.K. (1999) 'Kinetics of endosulfan sorption onto wood charcoal', *Journal of Environ Science and Health B*, vol 34, pp587–615

TACCINI, M.M. Study of the methodologies of the United Nations Framework Council on Climate, MSc Dissertação, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brazil, pp 87, 2010

TAG, A. T. TAGHIZADEH-TOOSI, A.; CLOUGH, T. J.; SHERLOCK, R. R.; CONDRON, L. M. Effects of Feedstock Type and Pyrolysis Temperature on Potential Applications of Biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016.

THIES, J. E.; RILLING, M.C. Characteristics of Biochar: Biological Properties (Chapter 6). In: LEHMANN, J., JOSEPH, S., eds. *Biochar for environmental management: science and technology*. London: Earthscan; p. 85-102, 2009.

Tiessen, H. and Stewart, J.W. B. (1988) 'Light microscopy of stained microaggregates: The role of organic matter and microbes in soil aggregation', *Biogeochemistry*, vol 5, pp312–322  
Tisdall, J. M. and Oades, J. M. (1982) 'Organic matter and water-stable aggregates in soils', *Journal of Soil Science*, vol 33, pp141–163

TOPOLIANTZ, S., PONG, J.-F., BALLOF, S. (2005) 'Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics', *Biology and Fertility of Soils*, vol 41, pp15–21

TRELIM. Informações gerais sobre o sisal. Disponível em: . Acesso em: 14 de setembro de 2023.

TSUZUKI, E.; MORIMITSU, T.; MATSUI, T. Effect of chemical compounds in pyrolytic acid on root growth in rice plant. *Japan Journal Crop Science*, Bankyoku, Tokyo, v.66, n.4, p.15-16, 2000.

UCHIMIYA M, HIRADATE S (2014) Pyrolysis temperature dependent changes in dissolved phosphorus speciation of plant and manure biochars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62, 1802–1809. doi:10.1021/jf4053385

ULERY AL, GRAHAM RC, AMRHEIN C (1993) Wood-ash composition and soil pH following intense burning. *Soil Science* 156, 358–364. doi:10.1097/00010694-19 931000-00008

USOWICZ, B., LIPIEC, J., ŁUKOWSKI, M., MARCZEWSKI, W., USOWICZ, J. 2016. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow. *Soil Tillage Res.* 164, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.009>

UZOMA, K.C., M. INOUE, H. ANDRY, H. FUJIMAKI, Z. ZAHOR, AND E. NISHIHARA. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use Manage.* 27:205-212. 2011.

VALE, A. T. do et al. Characterization of biomass energy and carbonization of coffee grains (*Coffea arabica*, L) and (*Cedrelinga catenaeformis*), duke wood residues. *Cerne*, Lavras, v. 13, p. 416-420, 2007

VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, v.10, n.2, p.151-160, 1986.

VASSILEVA CG (2013b) An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105, 19–39. doi:10.1016/j.fuel.2012.10.001

VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A.C.; VELDE, M. van der; DIAFAS, I. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: European Commission. 149p. 2010

VILELA, V. L. R.; FEITOSA, T. F.; LÔBO, K; M. da. S.; BEZERRA, D. A. C.; ATHAYDE, A. C. R. Potencial anti-helmíntico da raiz de *Solanum paniculatum* L. (1762) em ovelhas do semiárido paraibano. *Acta Veterinaria Brasilica*. v.3, n.1, p.20-24. 2009.

Xie T, Reddy KR, Wang C, Yargicoglu E, Spokas K (2015) Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 45, 939–969. doi:10.1080/10643389.2014.924180.

Wardle, D. A., Zackrisson, O. and Nilsson, M.-C. (1998) 'The charcoal effect in boreal forests: mechanisms and ecological consequences', *Oecologia*, vol 115, pp419–426

Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T.W. and Rillig, M. C. (2007) 'Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms', *Plant and Soil*, vol 300, pp9–20

WATERS, C. L.; JANUPALA, R. R.; MALLINSON, R. G.; LOBBAN, L. L. Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 126, p. 380-389, 2017

WHITE, C. (1991) 'The role of monoterpenes in soil nitrogen cycling processes in ponderosa pine', *Biogeochemistry*, vol 12, pp43–68

WILDING, L. P., BROWN, R. E., HOLOWAYCHUK, N. (1967) 'Accessibility and properties of occluded carbon in biogenic opal', *Soil Science*, vol 103, pp56–61

WILDMAN J, DERBYSHIRE F (1991) Origins and functions of macroporosity in activated carbons from coal and wood precursors. *Fuel* 70, 655–661. doi:10.1016/0016-2361(91)90181-9.

WU, W. X. et al. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass & Bioenergy*, v. 47, p. 268–276, 2012

YAMATO, M., OKIMORI, Y., WIBOWO, I. F., ANSHIORI, S., OGAWA, M. (2006) 'Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra

YAN, J.-H.; XU, R.-K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, v. 27, n. 1, p. 110– 115, 2011.

YANG, H.; SHENG, K. Characterization of biochar properties affected by different pyrolysis temperatures using visible-near-infrared spectroscopy. *International Scholarly Research Network, ISRN Spectroscopy*, Volume 2012,7 p. doi:10.5402/2012/712837.

YU, C., TANG, Y., FANG, M., LUO, Z., CEN, K. (2005) 'Experimental study on alkali emission during rice straw pyrolysis', *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, vol 39, pp1435–1444

YUAN JH, XU RK (2011) The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic ultisol. *Soil Use and Management* 27, 110–115. doi:10.1111/j.1475-2743.2010.00317.

YUAN, J. H.; XU, R. K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 3, p. 3488–3497, 2013

ZABANIOTOU, A., STAVROPOULOS, G. AND SKOULOU, V. (2008) 'Activated carbon from olive kernels in a two-stage process: Industrial improvement', *Bioresource Technology*, vol 99, pp320–326.

ZAVALLONI, C., ALBERTI, G., BIASIOL, S., VEDOVE, G.D., FORNASIER, F., LIU, J., PERESSOTTI, A. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: a short-term study. *Applied Soil Ecology*, v. 50, p. 45-51, 2011.

ZHANG, D. LIU, J.;LIU, R. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere*, v. 142, p. 106–113, 2016.

ZHENG, J., CHEN, J., PAN, G., LIU, X., ZHANG, X., LI, L., BIAN, R., CHENG, K., JINWEI, Z., 2016. Biochar decreased microbial metabolic quotient and shifted community composition four years after a single incorporation in a slightly acid rice paddy from southwest China. *Sci. Total Environ.* 571, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.135>

ZIMMERMAN, A.R., GAO, B. & AHN, M.Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biocharamended soils. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 43, p. 1169–1179, 2011.

ZORNOZA, R. MORENO-BARRIGA, F.; ACOSTA, J. A.; MUÑOZ, M. A.; FAZ, A. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. *Chemosphere*, v. 144, p. 122–130, 2016.

ZULLO, M.A.T., et al. Sapogeninas esteroídicas em sisal. *Bragantia*, v.48, pag. 21–25, 1989

ZWETSLOOT MJ, LEHMANN J, SOLOMON D (2015) Recycling slaughterhouse waste into fertilizer: how do pyrolysis temperature and biomass additions affect phosphorus availability and chemistry? *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95, 281–288. doi:10.1002/jsfa.6716.