

**EVANDRO MARCOS BIESDORF**

**CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FOLIAR SENESCIDA  
DE MACAÚBA (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel

Coorientadores: Simone Palma Favaro  
Leo Duc H. C. S. da Conceição

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B589c  
2021

Biesdorf, Evandro Marcos, 1992-  
Caracterização e aproveitamento de biomassa foliar senescida de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius) / Evandro Marcos Biesdorf. – Viçosa, MG, 2021.  
1 tese eletrônica (90 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Agronomia, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.017>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Biomassa vegetal. 2. Energia - Fontes alternativas.  
3. Resíduos como combustível . I. Pimentel, Leonardo Duarte,  
1979-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia.  
III. Título.

CDD 22. ed. 333.9539


Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

**CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FOLIAR SENESCIDA  
DE MACAÚBA (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 14 de dezembro de 2021.

Assentimento:



---

Evandro Marcos Biesdorf  
Autor



---

Leonardo Duarte Pimentel  
Orientador

Aos meus pais, Valdir Biesdorf e Silvia Biesdorf, por toda confiança e incentivo.

Ao meu irmão Eivelton Maciel Biesdorf, por quem tenho grande orgulho e  
admiração.

Para meu amor Ana Beatriz por ter me apoiado e incentivado durante todo o período  
de doutoramento.

**Ofereço e dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, Senhor de todas as coisas, por me fazer lembrar de sua palavra todos os dias, por ter me salvado e por estar comigo. Sou grato pelo que Ele tem feito em minha vida.

Aos meus pais Valdir Biesdorf e Silvia Biesdorf por terem me proporcionado educação, amor, ética, perseverança e a compreensão do valor do trabalho para o homem e para a sociedade. Agradeço pelos inúmeros ensinamentos - não simplesmente em palavras, mas com seus testemunhos vivos.

Ao meu irmão Elivelton Maciel Biesdorf por ser meu companheiro em todos os momentos, sejam bons ou ruins, por me alegrar em todas as ligações ao telefone e me inspirar com sua garra e determinação natural. Obrigado, meu irmão, pelo encorajamento de sempre!

Agradeço ao meu amor, Ana Beatriz Lucena, por ter me encorajado, apoiado e dedicado tempo, carinho e companheirismo durante todo o período de doutoramento.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo privilégio de realizar minha pós-graduação junto à instituição, proporcionando grandes oportunidades de crescimento profissional.

Ao meu orientador D.Sc. Leonardo Duarte Pimentel por ter acreditado em minha capacidade desde o primeiro encontro, ainda no mestrado, e por me apoiar a continuar o doutorado mesmo quando aumentou a dificuldade na condução dos experimentos.

Agradeço à pesquisadora D.Sc. Simone Palma Favaro por dedicar seu tempo e conhecimento para me apoiar na condução da pesquisa, análise, interpretação e redação da tese, se mostrando atenciosa e totalmente disponível para me auxiliar mesmo em meio à pandemia COVID-19.

Agradeço imensamente ao pesquisador D.Sc. Leo Duc Haa Carson Schwartzhaupt da Conceição por atender aquele estudante que um dia o procurou na EMBRAPA CERRADOS pedindo apoio para conseguir finalizar o doutoramento, ocasião em que o D.Sc. Leo recepcionou e prontamente se dispôs a auxiliar.

Agradeço à também à colega de doutoramento Silvia Ferreira de Sá por ter apoiado na coleta de dados, bem como aos amigos Paulo Henrique Salla, Angélica de Fátima Barros, Otto Herbert Dietrich, Wagner Barbosa, Maria Antonia Machado Barbosa e Laise Teixeira da Costa, os quais sempre me ajudaram a sanar as dúvidas em relação à análise de dados e me auxiliaram na condução experimental a nível de campo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço ao povo brasileiro, que por meio de seus impostos, me proporcionou uma formação qualidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**Muito obrigado!**

Tudo posso naquele que me fortalece.

Filipenses 4:13

## BIOGRAFIA

Evandro Marcos Biesdorf, filho de Valdir Biesdorf e Silvia Biesdorf, nasceu em 16 de fevereiro de 1992 em Campo Grande/MS por ocasião de melhores estruturas médicas visto que seus pais haviam se conhecido e moravam no recém-criado município de Gaúcha do Norte, localizado à 545 km de Cuiabá, Estado do Mato Grosso.

Viveu até os oito anos de idade em Gaúcha do Norte/MT, oportunidade em que iniciou seus primeiros contatos com a literatura, ciências e matemática na Escola Estadual Gervásio dos Santos Costa. Foi nesta instituição que, com o apoio de seus pais, iniciou sua carreira de estudos e obteve a base educacional, familiar e ética, que orientariam sua trajetória.

Nos anos 2000, aos 8 anos de idade, mudou-se com sua família para Primavera do Leste/MT, cidade localizada a 240 km de Cuiabá, MT, vindo a estudar em quatro instituições públicas de ensino diferentes naquela municipalidade: Escola Estadual Monteiro Lobato, Escola Municipal Mauro Wendelino Weiss, Escola Municipal Getúlio Vargas e Escola Estadual Alda Gawlinski Scopel.

Graduou-se em agronomia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT) em 2015, tendo participado de intercâmbio na França durante um ano ininterrupto, oportunidade em que realizou parte de seus estudos na Université Stendhal em Grenoble e no Institut Supérieur d'Agriculture em Lille obtendo o nível intermediário da língua francesa. Nessa ocasião, visitou ainda o European Synchrotron Radiation Facility (ESRF).

Em 2015, ingressou no programa de pós-graduação em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), oportunidade em que obteve, em 2017, o título de *Magister Scientiae* por suas descobertas acerca da alelopatia do cultivo de sorgo sobre soja cultivada em sucessão.

Em dezembro de 2021, se submeteu à defesa de tese, obtendo o título de *Doctor Scientiae* por seu trabalho de caracterização da biomassa foliar senescida de macaúba e por suas descobertas inéditas sobre o potencial de aproveitamento dessa biomassa.



## RESUMO

BIESDORF, Evandro Marcos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2021. **Caracterização e aproveitamento de biomassa foliar senescida de macaúba** (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius). Orientador: Leonardo Duarte Pimentel. Coorientadores: Simone Palma Favaro e Leo Duc Haa Carson Schwartzhaupt da Conceição.

A macaúba é alternativa sustentável para superação da crise energética global, pois além de sua alta capacidade de produção de óleo, produz expressiva quantidade de folhas que podem servir como fonte agroenergética e nutricional ao sistema de exploração. Contudo, a ausência de estudos acerca da influência da disponibilidade hidro-nutricional sobre as características quantitativas e qualitativas dessa biomassa foliar tem impedido avanços e compreensões importantes no manejo tecnológico dessa cultura. Objetivou-se, em caráter inédito, avaliar a influência do ambiente edáfico sobre as características da biomassa foliar senescida de distintos acessos de macaúba e identificar o potencial de aproveitamento dessa biomassa como biocombustível ou como fonte natural de restituição/reciclagem de nutrientes. Observou-se que o acúmulo de biomassa foliar senescida é influenciado pelo ambiente edáfico. Ambientes com alta disponibilidade hídrica e nutricional proporcionaram, anualmente, aumentos de até 64% no acúmulo de biomassa, além de maiores quantidades remanescentes de N, K, Ca, S e Zn. Concluiu-se que sistemas intensivos de exploração de macaúba detém maior aptidão para exploração energética ( $121 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) do que o sistema extrativista. Porém, independentemente do sistema de cultivo (intensivo, semi-intensivo ou extrativista, a biomassa foliar senescida de macaúba serve como estratégia de reciclagem de nutrientes e aumento do teor de matéria orgânica no ambiente, visto que possui potencial para reciclar/restituir anualmente até 46,2%, 5,7% e 5,5% da quantidade acumulada de N, P e K, respectivamente.

**Palavras-chave:** Fitomassa. Energia. Resíduos.

## ABSTRACT

BIESDORF, Evandro Marcos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2021. **Characterization and utilization of senescence leaf biomass of macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius)**. Advisor: Leonardo Duarte Pimentel. Co-advisers: Simone Palma Favaro and Leo Duc Haa Carson Schwartzhaupt da Conceição.

Macauba is a sustainable alternative to overcome the global energy crisis, because in addition to its high oil production capacity, it produces a significant number of leaves that can serve as an agroenergetic and nutritional source for the exploitation system. However, the lack of studies on the influence of hydro-nutritional availability on the quantitative and qualitative characteristics of this leaf biomass has prevented important advances and understandings in the technological management of this crop. The objective was, in an unprecedented way, to evaluate the influence of the edaphic environment on the characteristics of senescent leaf biomass of different macauba accessions and to identify the potential for using this biomass as biofuel or as a natural source of nutrient restitution/recycling. It was observed that the accumulation of senescent leaf biomass is influenced by the edaphic environment. Environments with high water and nutritional availability provided, annually, increases of up to 64% in the accumulation of biomass, in addition to higher remaining amounts of N, K, Ca, S and Zn. It was concluded that intensive macauba exploration systems have greater aptitude for energy exploration ( $121 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) than the extractive system. However, regardless of the cultivation system (intensive, semi-intensive or extractive, macauba senescent leaf biomass serves as a strategy for recycling nutrients and increasing the organic matter content in the environment, since it has the potential to recycle/return annually up to 46.2%, 5.7% and 5.5% of the accumulated amount of N, P and K, respectively.

**Keywords:** Phytomass. Energy. Waste.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	12
REFERÊNCIAS .....	14
CAPÍTULO I .....	17
DISPONIBILIDADE HIDRO-NUTRICIONAL E SENESCÊNCIA FOLIAR EM MACAÚBA ( <i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. Ex Martius) .....	17
1 RESUMO .....	18
2 ABSTRACT .....	19
3 INTRODUÇÃO .....	20
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	23
4.1. Caracterização do local de implantação do experimento .....	23
4.2. Design experimental .....	25
4.3. Simulação do ambiente com alta disponibilidade hídrica .....	25
4.4. Simulação do ambiente com alta disponibilidade nutricional .....	26
4.5. Avaliações experimentais .....	26
4.5.1. Biomassa foliar senescida anualmente (Biomassa) .....	26
4.5.2. Quantidade de macro e micronutrientes na biomassa foliar senescida de macaúba .....	27
4.5.3. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e Energia Potencial (EP) ..	27
4.5.4. Produtividade de frutos (Frutos) .....	28
4.6. Análise estatística .....	28
5 RESULTADOS .....	29
5.1. Biomassa foliar senescida anualmente (Biomassa) e produtividade de frutos (Frutos) .....	29
5.2. Quantidade de macro e micronutrientes contidas na biomassa foliar senescida de macaúba .....	30
5.3. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e energia potencial (EP) .....	34
6 DISCUSSÃO .....	36
7 CONCLUSÕES .....	40
8 AGRADECIMENTOS .....	41
9 REFERÊNCIAS .....	42
CAPÍTULO II .....	47
POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FOLIAR SENESCIDA DE MACAÚBA ( <i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. Ex Martius) .....	47
1 RESUMO .....	48

2	ABSTRACT.....	49
3	INTRODUÇÃO.....	50
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	53
4.1.	Caracterização do local de implantação do experimento .....	53
4.2.	Design experimental.....	55
4.3.	Estabelecimento dos sistemas de exploração.....	55
4.3.1.	Estabelecimento do sistema intensivo de exploração de macaúba.....	55
4.3.2.	Estabelecimento do sistema semi-intensivo de exploração de macaúba.....	56
4.3.3.	Estabelecimento do sistema extrativista de exploração de macaúba.....	56
4.4.	Avaliações .....	57
4.4.1.	Quantidade de biomassa foliar senescida acumulada (Biomassa), seu poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e rendimento energético (EP) .....	57
4.4.2.	Composição elementar CNH e análise química imediata .....	58
4.4.3.	Biomassa foliar senescida remanescente (BF), nutrientes remanescentes, taxa de decomposição (R), tempo de meia vida (T <sub>1/2</sub> ) e estimativa da restituição/reciclagem de nutrientes .....	58
4.5.	Análise estatística.....	60
5	RESULTADOS .....	62
5.1.	Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e energia potencial (EP) da biomassa foliar senescida de macaúba (Biomassa) .....	62
5.2.	Composição elementar CNH e análise química imediata .....	63
5.3.	Biomassa foliar senescida remanescente (BF), nutrientes remanescentes, taxa de decomposição (K), tempo de meia-vida (T <sub>1/2</sub> ) e restituição/reciclagem de nutrientes .....	66
6	DISCUSSÃO.....	73
7	CONCLUSÕES.....	80
8	AGRADECIMENTOS.....	81
9	REFERÊNCIAS .....	82
	CONCLUSÕES GERAIS.....	89

## INTRODUÇÃO GERAL

A produção e o consumo de energia no mundo estão entre as grandes preocupações atuais da humanidade ([MOLLAHOSSEINI et al., 2017](#)). O interesse por tecnologias limpas e sustentáveis tem sido o ponto de partida para o aumento da busca por fontes renováveis ([PIWOWAR & DZIKUĆ, 2019](#); [SOUZA et al., 2020](#)), as quais servem como alternativas no enfrentamento das mudanças climáticas, promovem a diminuição da dependência das fontes fósseis e não renováveis de energia ([SHAHSAVARI & AKBARI, 2018](#)), proporcionando ainda diversificação de renda aos produtores.

Nessa perspectiva, a indústria moderna tem priorizado a utilização de fontes energéticas renováveis de energia ([GNANSOUNOU et al., 2009](#); [AMER & DAIM, 2011](#); [FAZIO & MONTI, 2011](#); [AHMAD & TAHAR, 2014](#)). Assim, culturas como macaúba, cana de açúcar e dendê tem sido intensamente estudadas em função do seu alto potencial energético e versatilidade de utilizações ([AHMAD et al., 2019](#); [WANG et al., 2019](#); [VENTURINI et al., 2020](#)).

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius) tem se destacado como fonte promissora de matéria-prima sustentável para a geração de energia ([ABREU et al., 2017](#)) devido à elevada produtividade de óleo e à possibilidade de agregar serviços ambientais ao processo produtivo, como a recuperação de pastagens degradadas ([FAVARO & MIRANDA et al., 2013](#)). Soma-se a isso, a possibilidade de cultivo da macaúba em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta ([FAVARO & MIRANDA et al., 2013](#); [COLOMBO et al., 2018](#); [GRANJA et al., 2019](#)).

Assim, o grande potencial da macaúba como cultura energética deriva da alta produtividade de frutos com alta percentagem de óleo, e também pela aptidão como cultura modelo de recuperação e conversão de áreas degradadas em modelos de produção sustentáveis, com aptidão à utilização de mão de obra local e geração de empregos ([FAVARO & MIRANDA et al., 2013](#); [SILVA CÉSAR et al., 2015](#)).

Em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, por exemplo, o cultivo da macaúba favorece o bem-estar animal, recicla nutrientes de camadas profundas do solo e aumenta a estabilidade econômica, diversificando a renda dos produtores e isso sem qualquer abertura de novas áreas ([CASTRO et al., 2017](#)).

Contudo, a macaúba é uma planta que produz grande quantidade de folhas, as quais, após processo natural de translocação de nutrientes e senescência, se acumulam no estipe e sob a projeção da planta em grandes quantidades ([GRUPIONI et al., 2020](#)) ([Figura 1](#)).

Este acúmulo natural provoca dificuldade de acesso ao cacho no momento da colheita, dificuldades na aplicação pulverizada de defensivos na planta, ferimentos em animais, acidentes com trabalhadores de campo decorrentes da presença de espinhos nas folhas e fonte de inóculo de patógenos e artrópodes-praga ([FRIZZAS et al., 2020](#)).

Este cenário é agravado pela ausência de caracterização e quantificação deste fenômeno biológico atualmente existente, o que tem impedido a identificação de práticas de manejo sustentáveis e aumentado os custos de produção da cultura ([FRIZZAS et al., 2020](#)).

**Figura 1** - Representação da biomassa foliar resultante da senescência ao longo do ciclo produtivo de palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata*)



Fonte: o autor.

Atualmente, o manejo empregado nos cultivos de macaúba para essa biomassa foliar senescida se resume à retirada e acúmulo deste material nas laterais das áreas de produção, entrelinhas do cultivo ([TOLÊDO, 2010](#)) ou ainda a combustão a céu aberto, posicionando-se na contramão à proposta de sustentabilidade na produção.

Nesse contexto, o advento de novos modelos de produção, novas tecnologias no campo e o desejo global por aproveitamento de resíduos e biomassas como insumos renováveis tanto na indústria energética quanto na própria área de produção abre um cenário muito favorável à descoberta de novas práticas de manejo dessa biomassa, possibilitando-a ser melhor aproveitada, assim como já acontece com a biomassa de cana de açúcar ([SOUZA \*et al.\*, 2020](#); [MOREIRA \*et al.\*, 2020](#)) e outros resíduos vegetais agrícolas.

Para isso, é necessária a compreensão do fenômeno da senescência foliar da macaúba, seus ciclos, sua intensidade, sua interação com a produtividade de frutos, manejo agrônomico e a composição da biomassa, visto que é a exata compreensão destas características que define a escolha de manejo ideal dessa biomassa ([FRANDSEN, 2005](#); [DEBONI \*et al.\*, 2019](#)).

Objetivou-se avaliar a influência do ambiente edáfico sobre as características quantitativas e qualitativas da biomassa foliar senescida de acessos típicos de macaúba oriundos da região sudeste e centro oeste brasileiras e, a partir disso, identificar o potencial de aproveitamento dessa biomassa tanto como biocombustível, quanto como fonte natural de restituição/reciclagem de nutrientes, explorando esse potencial nos principais sistemas de cultivo atualmente existentes (sistema intensivo, semi-intensivo e sistema extrativista).

## REFERÊNCIAS

- ABREU, W. C. D.; MOURA, C. V.; COSTA, J.; MOURA, E. M. D. Strontium and nickel heterogeneous catalysts for biodiesel production from macaw oil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 28, n. 2, p. 319-327, 2017. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20160181>
- AHMAD, F. B.; ZHANG, Z.; DOHERTY, W. O.; O'HARA, I. M. The prospect of microbial oil production and applications from oil palm biomass. **Biochemical Engineering Journal**, v. 143, p. 9-23, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.12.003>

AHMAD, S.; TAHAR, R. M. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. **Renewable energy**, v. 63, p. 458-466, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.001>

AMER, M.; DAIM, T. U. Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. **Energy for sustainable development**, v. 15, n. 4, p. 420-435, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.001>

CASTRO, C. A. D. O.; RESENDE, R. T.; KUKI, K. N.; CARNEIRO, V. Q.; MARCATTI, G. E.; CRUZ, C. D.; MOTOIKE, S. Y. High-performance prediction of macauba fruit biomass for agricultural and industrial purposes using Artificial Neural Networks. **Industrial Crops and Products**, v. 108, p. 806-813, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.031>

COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C.; DIAZ, B. G.; FERRARI, R. A. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. **OCL**, v. 25, n. 1, p. D108, 2018. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017038>

DEBONI, T. L.; SIMIONI, F. J.; BRAND, M. A.; LOPES, G. P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable energy**, v. 135, p. 1291-1302, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.039>

[FAVARO, S. P.; MIRANDA, C..H. B. Aproveitamento de espécies nativas e seus coprodutos no contexto de biorrefinaria. Embrapa Agroenergia, Documentos 14, p. 38, 2013.](#)

FAZIO, S.; MONTI, A. Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 12, p. 4868-4878, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.014>

FRANSEN, F. J. Utilizing biomass and waste for power production - a decade of contributing to the understanding, interpretation and analysis of deposits and corrosion products. **Fuel**, v. 84, n. 10, p. 1277-1294, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.08.026>

[FRIZZAS, M.; DIANESE, A. D. C.; OLIVEIRA, C. M.; JUNQUEIRA, N. Aspectos fitossanitários da macaúba \[Acrocomia aculeata \(Jacq.\) Lodd ex. Martius\]: principais pragas e doenças. Embrapa Cerrados-Documents \(INFOTECA-E\). 2020. 38p](#)

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A.; VILLEGAS, J.; PANICHELLI, L. Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances. **Bioresourcetechnology**, v. 100, n. 21, p. 4919-4930, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.067>

GRANJA, M.M.C.; MOTOIKE, S.Y.; ANDRADE, A.P.S.; CORREA, T.T.; PICOLI, E.A.T.; KUKI, K.N. Explant origin and culture media factors drive the somatic embryogenesis response in *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Martius an emerging oil crop in the tropics. **Industrial Crops and Products**, v. 117, n. 1, p.1-12, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.074>



GRUPIONI, C. M.; SANTOS, F. L.; VELLOSO, N. S.; VALENTE, D. S. M.; CARVALHO PINTO, F. D. A. Macaw palm supply chain: Evaluation of a semi-mechanized fruit harvesting system. **Industrial Crops and Products**, v. 151, p. 112444, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112444>

MOLLAHOSSEINI, A.; HOSSEINI, S. A.; JABBARI, M.; FIGOLI, A.; RAHIMPOUR, A. Renewable energy management and market in Iran: A holistic review on current state and future demands, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 774-788, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.236>

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SILVERT, C.; DIETRICH, O. H. S., PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Above-and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121628>

PIWOWAR, A.; DZIKUĆ, M. Development of renewable energy sources in the context of threats resulting from low-altitude emissions in rural areas in Poland: a review. **Energies**, v. 12, n. 18, p. 3558, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12183558>

SHAHSAVARI, A.; AKBARI, M. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 275-291, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>

SILVA CÉSAR, A.; AZEDIAS ALMEIDA, F.; SOUZA, R. P.; SILVA, G. C.; ATABANI, A. E. The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) a non-edible biodiesel feedstock in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1213-1220, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.125>

SOUZA, G. K.; DIÓRIO, A.; DE LIMA, H. H. C.; DOS SANTOS MANIEZZO, R.; RINALDI, A. W.; PEREIRA, N. C.; POMINI, A. M. Assessment of Natural and Post-Extraction Biomass from *Acrocomia totai* leaves: a Renewable Source of Energy. **BioEnergy Research**, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10208-6>

[TOLÊDO, D. P. Avaliação técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão manso como alternativa de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel. \*\*Dissertação\*\* \(Mestrado em Ciências Florestais\) - Universidade Federal de Viçosa, 2010. 105p.](#)

VENTURINI, O. J.; JÚNIOR, J. C. F.; PALACIO, J. C. E.; BATLLE, E. A. O.; CARVALHO, M.; LORA, E. E. S. **Indicators for sustainability assessment of biofuels: Economic, environmental, social, and technological dimensions**. In: *Biofuels for a More Sustainable Future*. Elsevier, 2020, p. 73-113. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815581-3.00004-X>

WANG, M.; DEWIL, R.; MANIATIS, K.; WHEELDON, J.; TAN, T.; BAEYENS, J.; FANG, Y. Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 74, p. 31-49, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.04.004>

## **CAPÍTULO I**

### **DISPONIBILIDADE HIDRO-NUTRICIONAL E SENESCÊNCIA FOLIAR EM MACAÚBA (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius)**

## 1 RESUMO

A macaúba é fonte promissora de matéria-prima sustentável para a geração de energia, principalmente pela sua alta produtividade de óleo. Além do óleo, essa planta produz uma grande quantidade de folhas, as quais, após processo de senescência, acumulam-se presas na copa ao longo do estipe, o que dificulta o manejo da colheita e soma custos extras nos sistemas de exploração. Nesse contexto, compreender o fenômeno da senescência de folhas em macaúba e sua relação com o ambiente edáfico de cultivo é fundamental para identificar formas de manejo adequado desse fenômeno. Objetivou-se caracterizar a influência de diferentes condições hídricas e nutricionais do ambiente edáfico de cultivo sobre a intensidade de acúmulo de biomassa foliar senescida, quantidade de nutrientes residuais e poder calorífico. Para isso, acessos de distintas regiões tropicais, em idade reprodutiva, foram, durante dois anos, cultivados sob diferentes condições hídricas e nutricionais e tiveram a biomassa foliar senescida avaliada quanto a quantidade acumulada, quantidade residual de macro e micronutrientes essenciais e poder calorífico. Observou-se que o ambiente com alta disponibilidade hídrica favoreceu o acúmulo de biomassa foliar, independentemente do acesso. Além disso, a alta disponibilidade hídrica e nutricional resultou em quantidades remanescentes superiores de N, K, Ca, S e Zn na biomassa foliar senescida. Em contrapartida, a diferença entre as condições hídrica e nutricional no ambiente edáfico de cultivo não influenciaram o poder calorífico da biomassa ( $19,2 \text{ GJ t}^{-1}$ ) independentemente do acesso testado. Conclui-se que a intensidade de acúmulo de biomassa foliar e a composição mineral dessa biomassa é fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica no solo. Por outro lado, o poder calorífico da biomassa foliar senescida, independentemente do acesso, não é influenciado pelas condições hídrica ou nutricional do ambiente de cultivo.

**Palavras-chave:** Ritmo circadiano. Agroenergia. Fitomassa. Resíduos. Folha.

## 2 ABSTRACT

Macauba is a promising source of sustainable raw material for energy generation, mainly due to its high oil productivity. However, just as it produces oil, it produces a large number of leaves which, after the senescence process, accumulate stuck in the crown along the stem, which makes harvest management difficult and adds extra costs to the exploration systems. In this context, understanding the phenomenon of leaf senescence in macaúba and its relationship with the edaphic environment of cultivation is essential to identify ways of adequately managing this phenomenon. The aim of this study was to characterize the influence of different water and nutritional conditions in the edaphic cultivation environment on the intensity of senescent leaf biomass accumulation, amount of residual nutrients and calorific value. For this, genotypes from different tropical regions, of reproductive age, were cultivated for two years under different water and nutritional conditions and had leaf biomass evaluated in terms of accumulated amount, residual amount of essential macro and micronutrients and calorific value. It was observed that an environment with high water availability favored the accumulation of leaf biomass, regardless of genotype. Furthermore, the high water and nutritional availability resulted in higher remaining amounts of N, K, Ca, S and Zn in the senescent leaf biomass. On the other hand, the difference between the water and nutritional conditions in the edaphic cultivation environment did not influence the calorific value of the biomass ( $19.2 \text{ GJ t}^{-1}$ ) regardless of the tested genotype. It is concluded that the intensity of leaf biomass accumulation and the mineral composition of this biomass is strongly influenced by soil water availability. On the other hand, the calorific power of the senescent leaf biomass, regardless of the genotype, is not influenced by the water or nutritional conditions of the cultivation environment.

**Keywords:** Circadian rhythm. Agroenergy. Phytomass. Waste. Leaf.

### 3 INTRODUÇÃO

A necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis aumentou o interesse mundial por fontes renováveis de energia, principalmente através do aproveitamento de biomassas e resíduos vegetais ([HYTÖNEN et al., 2019](#)).

Nesse contexto, culturas nativas, com alto potencial energético e habilidade para ocupar terrenos marginais, recuperar áreas degradadas e compõem sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta ([FAVARO & MIRANDA et al., 2013](#)), como a macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius), tem se destacado ([AHMAD et al., 2019](#); [WANG et al., 2019](#); [VENTURINI et al., 2020](#)).

A macaúba tem alcançado proeminência global, pois detém potencial para utilização nas indústrias agroenergética, agroalimentar, cosmética e de medicamentos, em função de sua alta produtividade de óleo (4 t ha<sup>-1</sup> ano de óleo) e grande quantidade de coprodutos de valor econômico ([EVARISTO et al., 2016](#)).

No entanto, a macaúba, assim como produz grande quantidade de óleo, produz grande quantidade de biomassa foliar que, após processo natural de translocação de nutrientes e senescência, se acumula ao longo do estipe, na copa e sobre o solo ([GRUPIONI et al., 2020](#)).

Este comportamento provoca dificuldades no acesso ao cacho para a colheita e tratos culturais, dificuldade de aproximação dos trabalhadores e ocasiona ferimentos em animais no pastejo e problemas na pulverização foliar durante o manejo fitossanitário ([FRIZZAS et al., 2020](#)) dado o grande número de espinhos presente nesta biomassa vegetal ([SOUZA et al., 2020](#)) ([Figura 1](#)), o que revela a necessidade de estudos que caracterize e compreendam a relação deste comportamento com as condições de cultivo.

**Figura 1** - Representação da biomassa foliar resultante da senescência ao longo do ciclo produtivo de palmeira macaúba



Fonte: o autor.

Para muitas espécies de plantas, há ampla comprovação de que o acúmulo de biomassa foliar é afetado pela seca ([PINHEIRO & CHAVES, 2011](#)), altas temperaturas ([MATHUR \*et al.\*, 2014](#)), escassez de nutrientes nos meios de crescimento ([KALAJI \*et al.\*, 2014](#)) e pelo estresse de metal pesado ([MAŁKOWSKI \*et al.\*, 2019](#)).

Contudo, para macaúba, apesar das conclusões importantes de [Motta \*et al.\* \(2002\)](#) e confirmadas por [Bhering \*et al.\* \(2010\)](#), as quais apontaram que a ocorrência natural de macaúba está associada a solos com alta saturação por bases, de textura média a argilosa, e preferencialmente nas áreas com alta disponibilidade hídrica, não há estudo que tenha apresentado conclusões acerca da inter-relação entre acúmulo de biomassa foliar senescida e disponibilidade hídrica e nutricional.

Assim, é fundamental compreender se as diferentes condições de solo têm influência significativa nas características da biomassa, pois isso permitirá lançar as bases para o aprimoramento de práticas de manejo e abrirá novas perspectivas de utilização desta biomassa pelos produtores.

Isso porque as propriedades caloríficas de biomassas vegetais são conhecidas por serem fortemente influenciadas pela sua composição ([SCHELL et al., 2003](#); [XUE et al., 2015](#)) a qual, por sua vez, é comprovadamente influenciada pelas condições de crescimento, como luz solar, localização geográfica, clima, tipos de solo, água disponível, pH do solo e nutrientes ([VASSILEV et al., 2010](#)).

Além disso, informações sobre o conteúdo de nutrientes residuais da biomassa foliar senescente possibilitariam avaliar o impacto das condições hídricas e nutricionais sobre a reciclagem de nutrientes através das folhas senescentes e indiretamente evidenciariam a intensidade de translocação interna de nutrientes na planta, constituindo-se em inferências valiosas no âmbito do cultivo sustentável ([BURY et al., 2021](#); [HYTÖNEN et al., 2019](#); [WHITE JR, VIATOR & WEBBER, 2020](#)).

Portanto, é essencial compreender a influência do ambiente edáfico sobre as características qualitativas e quantitativas da biomassa foliar senescida de macaúba, seus ciclos de acumulação, sua intensidade e sua interação com a produtividade de frutos, visto que a exata compreensão destas características abrirá novas perspectivas sobre o cultivo da macaúba ([FRANSEN, 2005](#); [DEBONI et al., 2019](#)), assim como foi realizado para o cultivo de guanxuma (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) ([BURY et al., 2021](#)), para seringueira (*Hevea brasiliensis* L.) ([HYTÖNEN et al., 2019](#)), cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.) ([WHITE JR., VIATOR & WEBBER, 2020](#)) e diversas biomassas na China ([TAN et al., 2019](#)).

Vale ressaltar ainda que o advento de modelos de produção sustentáveis impulsiona positivamente toda a cadeia agroenergética visto que a compreensão dessas interações inaugura novos modelos de manejo, integrando-as em um contexto sustentável e racional, assim como já é realidade com a biomassa residual de cana de açúcar ([SILVA CÉSAR et al., 2015](#); [SOUZA et al., 2020](#); [MOREIRA et al., 2020](#)).

Objetivou-se, de forma inédita, caracterizar a influência de diferentes condições hídricas e nutricionais do ambiente edáfico sobre a intensidade de acúmulo de biomassa foliar senescida, quantidade de nutrientes residuais e poder calorífico em diferentes acessos de macaúba sob clima tropical.

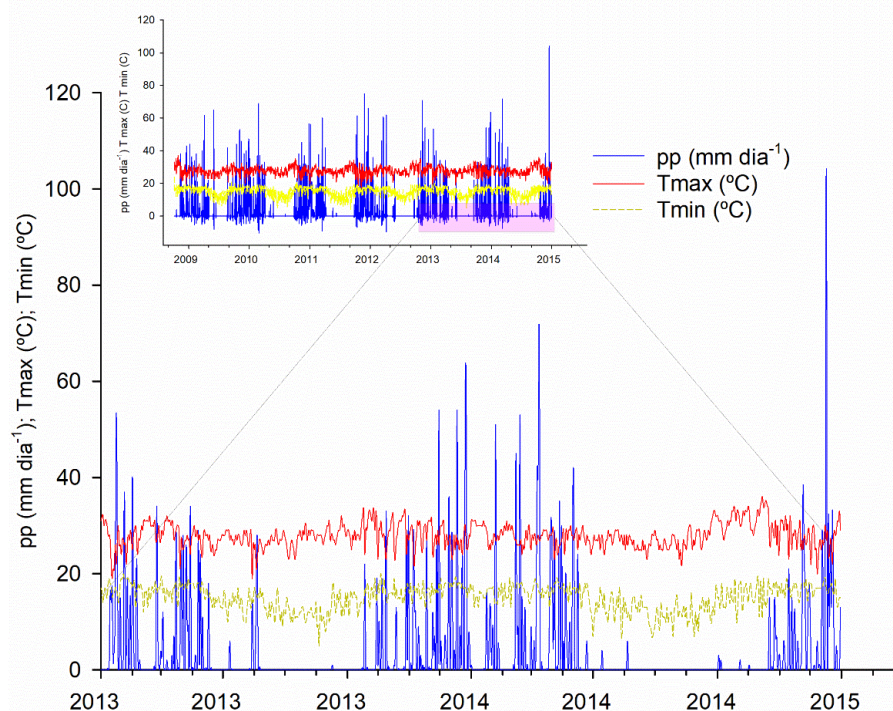
## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização do local de implantação do experimento

O experimento foi realizado ao longo de duas safras (2013 a 2015) sob condições de campo em ambiente de clima tropical, nas coordenadas 15° 60' 02,12" S e 47° 73' 42,44" W, no município de Planaltina, Distrito Federal do Brasil.

O clima do local escolhido para a realização do experimento, de acordo com a classificação de Köppen, é Aw - Clima Tropical com estação seca apresentando dois períodos definidos sendo uma estação chuvosa, entre outubro e abril, quando caem mais de 90% das chuvas, e uma estação seca, com ausência quase total de chuvas e que se prolonga de maio a setembro ([CARDOSO, 2014](#)) ([Figura 2](#)).

**Figura 2** - Valores diários de precipitação pluviométrica (pp) (mm dia<sup>-1</sup>), temperatura máxima do dia (tmax) (°C) e temperatura mínima do dia (tmin) (°C) desde o plantio das palmeiras e durante a condução experimental. Dados obtidos a partir da estação meteorológica localizada na própria área experimental



Fonte: o autor.

A vegetação original da área de realização do experimento era do tipo cerrado típico. O solo do local de realização do experimento é caracterizado como Latossolo vermelho e amarelo (LVA), profundo e bem drenado ([EMBRAPA, 2018](#)), com relevo



plano. As características do solo no início do experimento eram aquelas constantes na [Tabela 1](#).

**Tabela 1** - Caracterização química na camada de 0-0,2 m e de 0,2-0,4 m de profundidade da área de condução do experimento, safra (2013/2014)

Fator	Profundidade (m)	
	0-0,2	0,2-0,4
pH (H <sub>2</sub> O)	5,45	4,98
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,85	4,48
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	2,27	1,88
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,72	3,53
K (mg dm <sup>-3</sup> )	66,57	52,18
S (mg dm <sup>-3</sup> )	12,67	23,70
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,12	1,75
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,87	0,60
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,12	0,33
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,25	5,80
CTC (cmol <sub>c</sub> cm <sup>-3</sup> )	9,40	8,28
V (%)	44,00	30,00
m (%)	4,00	13,00
Ca/Mg	3,72	3,08
Ca/K	18,05	13,18
Mg/K	4,92	4,48
Ca/CTC	33,25	21,25
Mg/CTC	9,25	7,50
Na/CTC	0,00	0,00
K/CTC	1,75	1,25
H+Al/T	55,75	70,00
B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,575	0,50
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,70	0,73
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	128,10	129,15
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	14,45	9,85
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	4,60	2,60

V (%): saturação por bases; m (%): saturação por alumínio. Caracterização do solo feita de acordo com a metodologia de [Donagema et al. \(2011\)](#). Fonte: o autor.

## 4.2. Design experimental

O experimento ocupou uma área de 0,7 hectares. Foram testados dois acessos de macaúba de diferentes regiões tropicais com cinco anos de idade (em idade reprodutiva) cultivados em espaçamento 5 x 5 m (400 pl ha<sup>-1</sup>) sob três diferentes condições hidro-nutricionais do ambiente edáfico.

Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 2x3, com quatro repetições para cada tratamento e cinco plantas por parcela. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições.

O primeiro fator testado correspondeu às duas distintas origens endêmicas das palmeiras testadas, denominando-se como AcDF, o acesso proveniente do planalto central brasileiro e AcSP, o acesso proveniente da região sudeste brasileira.

O segundo fator testado correspondeu a três distintos ambientes edáficos de cultivo, a que foram submetidos os acessos testados, sendo *i*) ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA), *ii*) ambiente com alta disponibilidade nutricional e alta disponibilidade hídrica (CA + CI) e *iii*) ambiente controle em condições de restrição hídrica e nutricional (testemunha) (CO).

## 4.3. Simulação do ambiente com alta disponibilidade hídrica

Para simular ambiente com alta disponibilidade hídrica, foi utilizado sistema de irrigação por microaspersão (90% de eficiência), utilizando-se dois microaspersores por planta.

O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) adotado foi igual a 1, valor este estimado em função do valor de outras palmeiras, visto que não existe determinações deste coeficiente para a macaúba, como existe para coqueiro ([MIRANDA et al., 2007](#)), palma de óleo ([ANTONINI et al., 2015](#)) e pupunheira ([BASSOI et al., 2002](#)).

O momento de irrigação foi definido pelo uso do fator de disponibilidade de águas no solo ( $f$ ), assumindo  $f = 0,5$ . A lâmina de água aplicada, em cada irrigação, foi obtida pelo produto resultante da  $E_{t0}$  com o  $K_c$  calculada com dados obtidos da estação meteorológica da própria área experimental.

#### 4.4. Simulação do ambiente com alta disponibilidade nutricional

Para simular ambiente com alta disponibilidade nutricional, utilizou-se a recomendação de [Pimentel et al. \(2011\)](#), ocasião em que as parcelas deste tratamento receberam aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> (300 g por cova) de NPK (04-30-16) na ocasião do plantio, aplicação de 40 kg ha<sup>-1</sup> (100 g por cova) de sulfato de amônio aos 60 e 120 dias após o plantio e anualmente durante a condução experimental receberam 480 kg ha<sup>-1</sup> (1,2 kg por planta) de NPK (10-05-15) divididas em 3 aplicações iguais intercaladas a cada 30-45 dias, entre novembro e fevereiro (estação chuvosa na região), além de suplementação única com 120 kg ha<sup>-1</sup> (300g por planta) com FTE apenas na primeira aplicação.

O tratamento controle não recebeu nenhuma suplementação nutricional ou hídrica durante a condução do experimento, salvo a correção inicial do solo a que todas as parcelas foram submetidas no momento do plantio em 2008, ocasião em que todas as parcelas experimentais foram submetidas à correção da acidez do solo em área total (3,0 t ha<sup>-1</sup> de calcário, 2,0 t ha<sup>-1</sup> de gesso).

#### 4.5. Avaliações experimentais

##### 4.5.1. Biomassa foliar senescida anualmente (Biomassa)

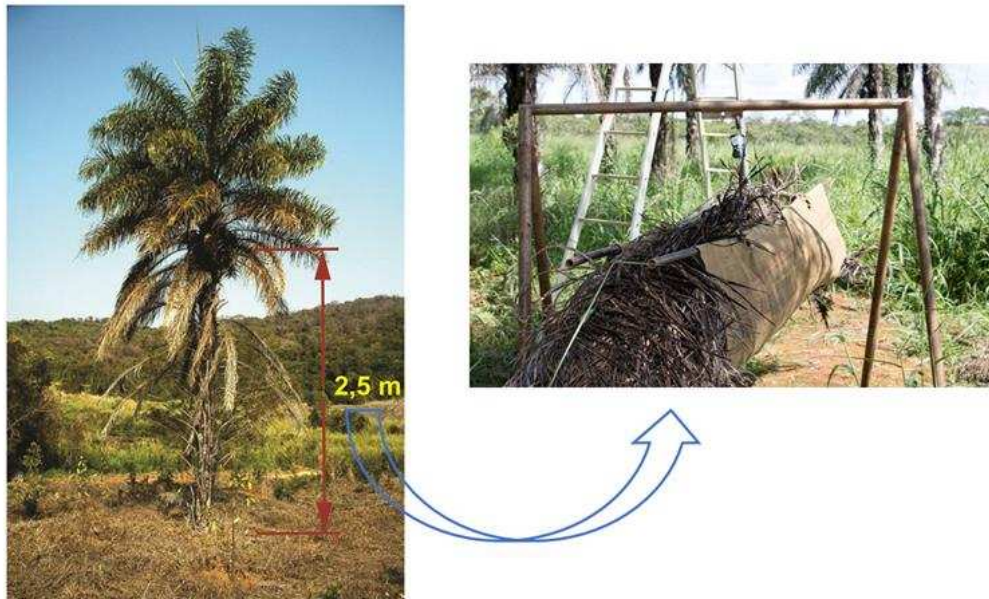
Para determinação da quantidade de biomassa produzida, foram realizadas coletas semestrais da biomassa foliar senescida ao longo de duas safras (março de 2013 a março de 2015). Com a identificação das quantidades semestrais, foram obtidos os valores de biomassa foliar senescida produzida a cada ano, tendo permitido, assim, obter o valor de biomassa foliar senescida anualmente.

O critério de identificação das folhas a serem coletadas foi o visual, ou seja, coletando-se aquelas folhas que no momento da visita a planta estivessem completamente secas, conforme padrão descrito na [Figura 3](#).

Ressalta-se que as folhas senescidas que já se encontravam acumuladas sobre o solo e presas nas plantas das parcelas antes do início das observações foram removidas.

Assim, as coletas foram realizadas manualmente tanto das folhas acumuladas no solo sob a projeção da planta quanto daquelas secas presas no estipe da planta na data da coleta, as quais, juntas, foram pesadas com auxílio de uma balança de campo ([Figura 3](#)) e expressas em base seca (b.s).

**Figura 3** - Descrição da coleta e pesagem da biomassa foliar senescida de macaúba em condições de campo durante o experimento



Fonte: o autor.

#### **4.5.2. Quantidade de macro e micronutrientes na biomassa foliar senescida de macaúba**

A identificação da quantidade de macro e micronutrientes foi realizada através da quantificação dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) conforme metodologia de [Donagema et al. \(2011\)](#) a partir da biomassa foliar senescida da safra 2014/2015. Após a identificação dos teores, foram obtidos os valores totais acumulados destes nutrientes através da multiplicação do teor pela quantidade de biomassa foliar produzida anualmente por hectare.

#### **4.5.3. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e energia potencial (EP)**

A caracterização energética foi realizada através da determinação do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e energia potencial (EP) possível de ser obtida por hectare anualmente.

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ), foram utilizadas amostras do terço distal das folhas representativas de cada unidade experimental, tendo sido estas amostras secas, trituradas e homogeneizadas e analisadas em calorímetro de combustão (C2000 Basic, IKA) conforme a norma NBR 11956 ([ABNT, 1990](#)).

O poder calorífico inferior (PCI) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ) foi calculado conforme [Parikh, Channiwala & Ghosal \(2005\)](#), através da [Equação 1](#) em que PCI é o poder calorífico inferior, PCS é o poder calorífico superior, H é o percentual de hidrogênio.

$$PCI = PCS - 600 \left( \frac{9H}{100} \right) \quad \text{Equação 1}$$

A energia potencial (EP) foi obtida pelo produto entre o poder calorífico superior (PCS) e o valor obtido na quantificação anual da biomassa foliar senescida (Biomassa), conforme a [Equação 2](#).

$$EP = PCS \times Biomassa \quad \text{Equação 2}$$

Em que EP é a energia potencial, expressa em gigajoule (GJ) por hectare ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ), PCS é o poder calorífico superior, em  $\text{GJ t}^{-1}$ , e Biomassa é o valor da biomassa foliar senescida (Biomassa) ( $\text{t ha}^{-1}$ ).

#### **4.5.4. Produtividade de frutos (Frutos)**

A produtividade de frutos foi avaliada na safra 2014/2015. Para isso, o cacho foi cortado no início da incisão com o estipe da planta e os frutos derriçados manualmente. Em seguida, com auxílio de uma balança, pesou-se de forma separada os frutos (sem contabilizar a ráquis), obtendo-se o valor de produtividade de frutos ( $\text{t ha}^{-1}$ ) em base úmida.

#### **4.6. Análise estatística**

Todos os dados foram analisados utilizando o software estatístico Rstudio ([RSTUDIO, 2020](#)). A normalidade dos dados foi testada com teste de Shapiro-Wilk. Os dados que não apresentaram normalidade foram transformados utilizando-se a transformação  $1/X$  ou  $1/\sqrt{x}$ . A influência dos fatores foi utilizada análise de variância seguido do teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

## 5 RESULTADOS

### 5.1. Biomassa foliar senescida anualmente (Biomassa) e produtividade de frutos (Frutos)

A quantidade de biomassa foliar senescida (Biomassa) e a produtividade de frutos (Frutos) foram influenciadas significativamente ( $p < 0,05$ ) apenas pelo ambiente edáfico de cultivo, independentemente do acesso analisado ([Tabela 2](#)).

**Tabela 2** - Resumo da análise de variância para biomassa foliar senescida anual (Biomassa) e produtividade de frutos (Frutos) dos diferentes acessos de macaúba cultivados em diferentes ambientes edáficos sob clima tropical

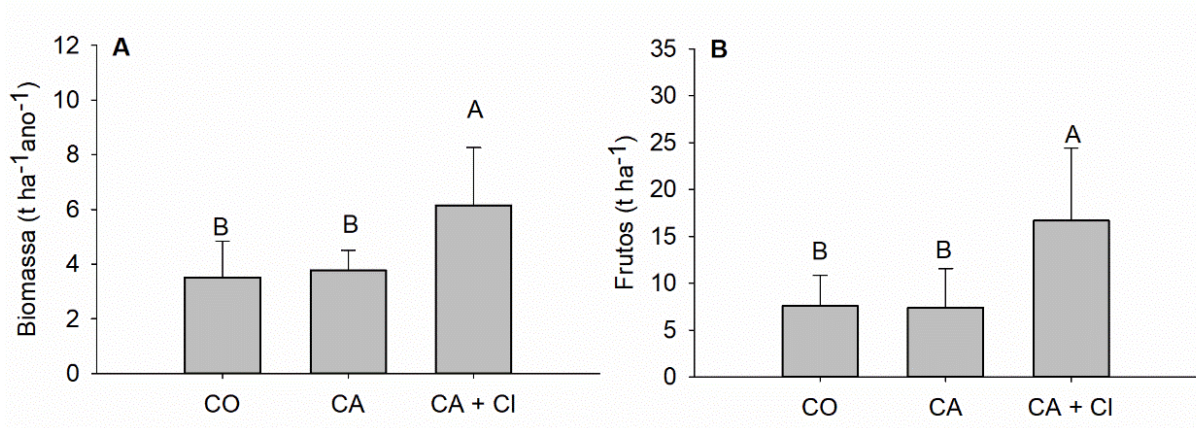
FV <sup>(1)</sup>	GL <sup>(2)</sup>	Quadrados Médios	
		Biomassa (t ha <sup>-1</sup> )	Frutos (t ha <sup>-1</sup> )
Bloco <sup>(3)</sup>	3	4,530	31,29
Acesso (A) <sup>(4)</sup>	1	2,903	1,72
Ambiente (B) <sup>(5)</sup>	2	12,82**	225,08**
A x B <sup>(6)</sup>	2	3,71	9,44
Res (AxB) <sup>(7)</sup>	15	1,85	33,69
CV (%) <sup>(8)</sup>		28,9	55,08

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, <sup>(1)</sup> refere-se aos fatores de variação estudados na análise de variância fatorial; <sup>(2)</sup> graus de liberdade dos fatores de variação; <sup>(3)</sup> Efeito da blocagem; <sup>(4)</sup> efeito da origem do acesso; <sup>(5)</sup> efeito do ambiente edáfico; <sup>(6)</sup> interação entre os fatores A e B; <sup>(7)</sup> resíduo da interação; <sup>(8)</sup> coeficiente de variação. Fonte: o autor.

Verificou-se que as palmeiras cultivadas em ambientes de alta disponibilidade nutricional e hídrica (CA + CI) acumularam maior ( $p < 0,05$ ) quantidade de biomassa foliar senescida ([Figura 4A](#)) e alcançaram maiores produtividades de frutos (Frutos) ([Figura 4B](#)) em comparação às demais palmeiras não submetidas à esta combinação, inclusive sobre aquelas cultivadas em ambiente que contou apenas com alta disponibilidade nutricional, independentemente do acesso estudado.

Acerca do acúmulo de biomassa e produtividade de frutos, foi possível notar que ambientes com baixa disponibilidade hídrica, mesmo se eutróficos (CA), apresentaram valores semelhantes ( $p < 0,05$ ) àqueles do ambiente controle (CO) ([Figura 4A](#); [Figura 4B](#)) o que indicou que a intensidade do acúmulo de biomassa e a produtividade de frutos possui uma relação direta e fortemente influenciável pela disponibilidade hídrica do solo.

**Figura 4** - Biomassa foliar senescida anual (Biomassa) (A) e produtividade de frutos (Frutos) (B) de acessos de macaúba testados sob diferentes ambientes edáficos (ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA); ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional (CA + CI) e ambiente controle com baixa disponibilidade hídrica e nutricional (testemunha) (CO)). Barras seguidas da mesma por letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ )



Fonte: o autor.

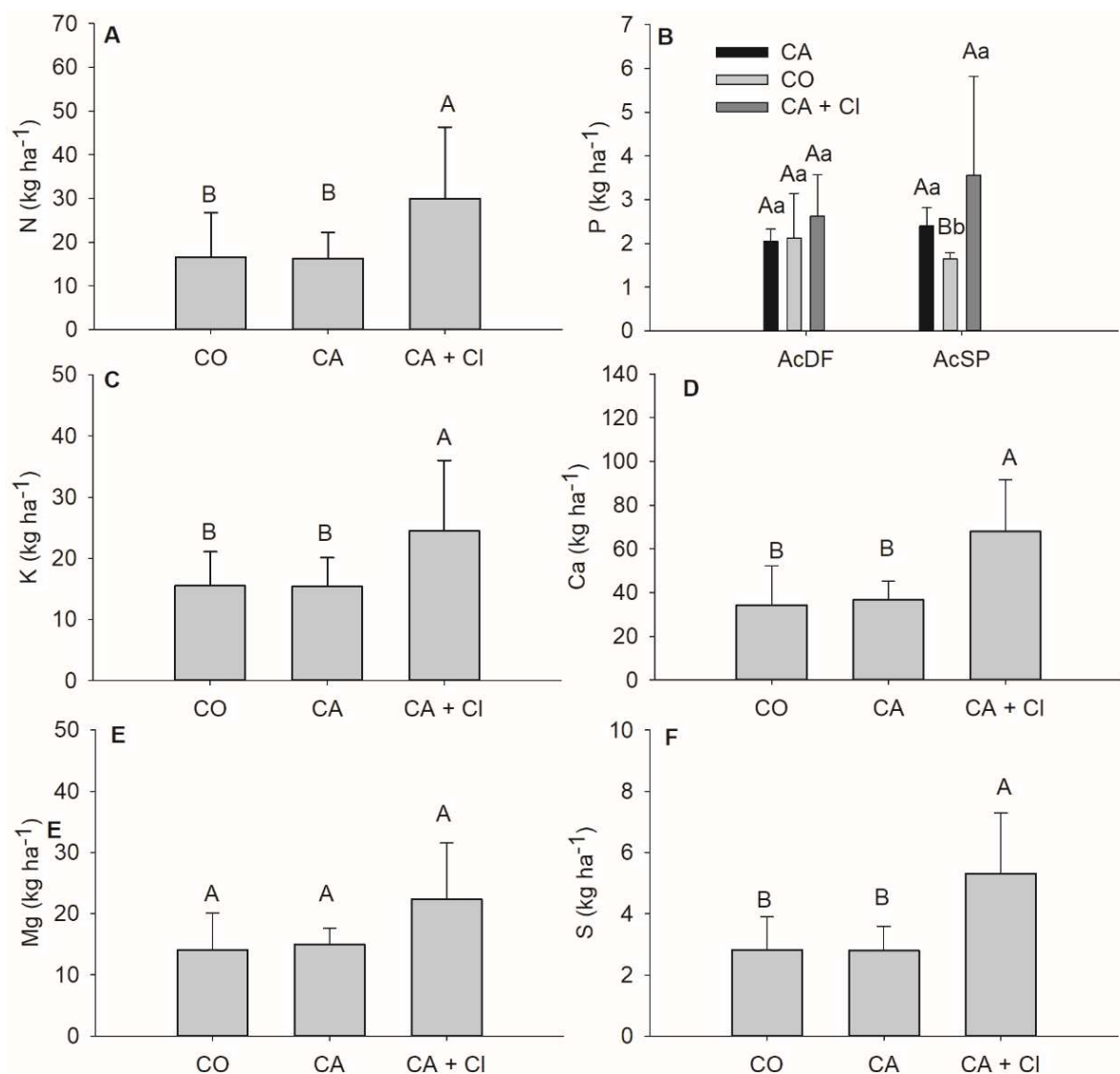
## 5.2. Quantidade de macro e micronutrientes contidas na biomassa foliar senescida de macaúba

Plantas de macaúba cultivadas em ambiente de alta disponibilidade hídrica e nutricional (CA + CI) tiveram quantidades remanescentes de N, K, Ca, S e Zn na biomassa foliar senescida superiores àquelas plantas cultivadas sob restrição hídrica ([Figuras 5A](#), [5C](#), [5D](#), [5F](#) e [6E](#)), independentemente se em ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA) ou no ambiente controle (CO).

Por outro lado, os valores das quantidades remanescentes de P, B e Mn apresentaram interação entre acesso e o ambiente edáfico de cultivo ([Tabela 3](#)). Observou-se que o acesso da região sudeste brasileira (AcSP) apresentou menor

quantidade remanescente de P, B e Mn na biomassa foliar senescida quando cultivado em condições hídricas e nutricionais limitadas quando comparado com o acesso endêmico da região central do Brasil ([Figuras 5B](#), [6A](#) e [6D](#)).

**Figura 5** - Quantidade residual anual de macronutrientes da biomassa foliar senescida de exemplares de macaúba ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), em função dos diferentes ambientes edáficos (ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA); ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional (CA + CI) e ambiente controle (baixa disponibilidade hídrica e nutricional) (testemunha) (CO)). Barras com a mesma tonalidade acompanhadas por letras maiúsculas ou minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ )



Fonte: o autor.



**Tabela 3** - Resumo das análises de variância para a quantidade residual anual de macro e micronutrientes contida na biomassa foliar senescida de macaúba por hectare cultivados com macaúba em espaçamento 5 x 5 m, em função dos diferentes acessos de macaúba (acesso originário do planalto central brasileiro e acesso originário do sudeste brasileiro) e ambientes edáficos de cultivo (ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA), ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional (CA + CI) e ambiente controle (CO)) em esquema fatorial

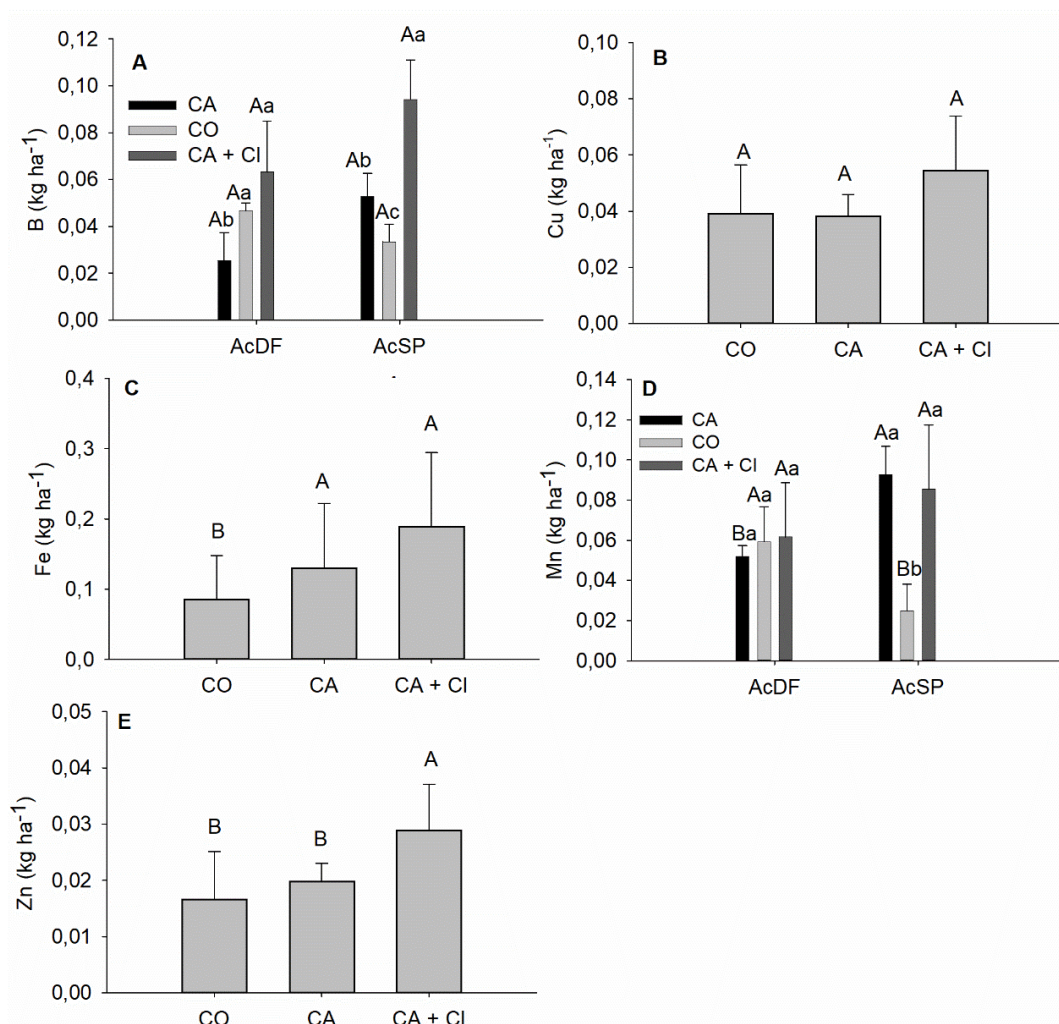
FV <sup>(1)</sup>	GL <sup>(2)</sup>	Quadrados Médios										
		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		(1/kg ha <sup>-1</sup> )	(1/kg ha <sup>-1</sup> )	(1/kg ha <sup>-1</sup> )	(1/kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )	$\frac{1}{\sqrt{kg ha^{-1}}}$	(1/kg ha <sup>-1</sup> )
Bloco <sup>(3)</sup>	3	0,0004	0,0071	0,0005	0,0001	33,67	3,038	0,0002	0,0001	1,558	62,3	0,0000
Acesso (A) <sup>(4)</sup>	1	0,0009	0,0003	0,0006	0,0000	3,49	0,004	0,0007	0,0000	0,055	68,9	0,0000
Ambiente (B) <sup>(5)</sup>	2	0,0026*	0,0879**	0,0019*	0,0007**	165,09	16,701**	0,0038**	0,0006	4,370*	439,9**	0,0003**
A x B <sup>(6)</sup>	2	0,0010	0,0566*	0,0013	0,0000	34,15	3,803	0,0008*	0,0006	1,416	582,1**	0,0001
Res (AxB) <sup>(7)</sup>	15	0,0006	0,0113	0,0004	0,0000	48,16	1,520	0,0001	0,0002	0,884	46,8	0,0000
CV (%) <sup>(8)</sup>		40,20	23,64	31,63	36,0	40,4	33,7	26,1	33,8	29,21	34,2	30,9

\*significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, <sup>(1)</sup> refere-se aos fatores de variação estudados na análise de variância fatorial; <sup>(2)</sup> refere-se ao grau ou graus de liberdade dos fatores de variação; <sup>(3)</sup> Blocos; <sup>(4)</sup> Diferentes acessos testados (acesso originário do Planalto Central Brasileiro e acesso originado do Sudeste Brasileiro); <sup>(5)</sup> diferentes ambientes edáficos de cultivo (ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional (CA + CI), ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA) e ambiente controle com baixa disponibilidade hídrica e nutricional (CO)); <sup>(6)</sup> interação entre os diferentes acessos testados e os diferentes ambientes edáficos; <sup>(7)</sup> refere-se ao resíduo da interação entre os acessos testados e os ambientes de cultivo; <sup>(8)</sup> coeficiente de variação. Fonte: o autor.

As quantidades remanescentes de Mg e Cu não foram alteradas significativamente em função do acesso e do manejo do ambiente edáfico ([Tabela 3](#); [Figuras 5E e 6B](#)).

Em relação à quantidade remanescente de Fe, notou-se influência significativa do ambiente edáfico. Porém, neste caso, independentemente da farta disponibilidade hídrica, a disponibilidade natural do elemento no solo se apresentou como o fator que mais influenciou a quantidade remanescente deste nutriente na biomassa foliar senescida ([Figura 6C](#)).

**Figura 6** - Quantidade residual anual de micronutrientes contida na biomassa foliar senescida de macaúba ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), em função dos diferentes acessos de macaúba e ambientes edáficos de cultivo (ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA); ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional (CA + CI) e ambiente controle com baixa disponibilidade hídrica e nutricional (testemunha) (CO)). Barras com a mesma tonalidade acompanhadas por letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ )



Fonte: o autor.

### 5.3. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e energia potencial (EP)

Não foi observada influência significativa nem do acesso, nem do ambiente edáfico e nem interação entre estes fatores sobre os valores de PCS e PCI ([Tabela 4](#)), os quais se situaram na faixa de 19,2 GJ t<sup>-1</sup> e 16,3 GJ t<sup>-1</sup>, respectivamente.

Em consequência disso, notou-se que aquelas parcelas que tiveram maior acúmulo de biomassa foliar senescida foram também aquelas que alcançaram os maiores valores de EP (GJ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Ou seja, a alta disponibilidade hídrica e nutricional, em conjunto, possui influência significativa ( $p < 0,05$ ) os o potencial energético (EP) do aproveitamento de biomassa foliar senescida em macaúba ([Tabela 4](#)).

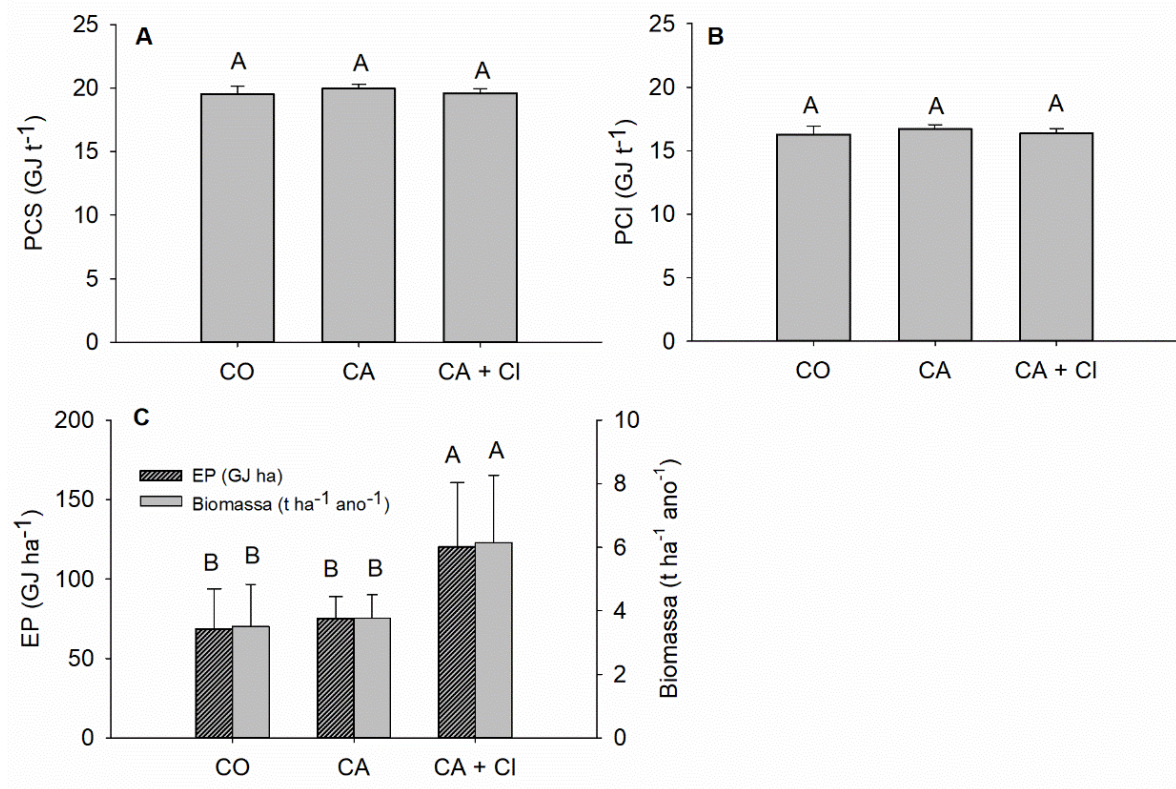
**Tabela 4** - Resumo das análises de variância para poder calorífico superior (PCS) (GJ t<sup>-1</sup>), poder calorífico inferior (PCI) (GJ t<sup>-1</sup>) e energia potencial (EP) (GJ ha<sup>-1</sup>) contida na biomassa foliar senescida em função dos diferentes acessos de macaúba e ambiente edáfico

FV <sup>(1)</sup>	Quadrados Médios			
	GL <sup>(2)</sup>	PCS (GJ t <sup>-1</sup> )	PCI (GJ t <sup>-1</sup> )	EP (GJ ha <sup>-1</sup> )
Bloco <sup>(3)</sup>	3	0,07	0,34	775,00
Acesso (A) <sup>(4)</sup>	1	0,79	0,79	212,00
Ambiente (B) <sup>(5)</sup>	2	0,40	0,40	6351,00**
A x B <sup>(6)</sup>	2	0,08	0,08	1876,00
Res (AxB) <sup>(7)</sup>	15	0,22	0,22	731,00
CV (%) <sup>(8)</sup>		2,4	2,4	30,7

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, <sup>(1)</sup> refere-se aos fatores de variação estudados na análise de variância fatorial; <sup>(2)</sup> refere-se ao grau ou graus de liberdade dos fatores de variação; <sup>(3)</sup> Blocos; <sup>(4)</sup> Diferentes acessos testados (acesso típico do Planalto Central Brasileiro e acesso típico do Sudeste Brasileiro); <sup>(5)</sup> diferentes ambientes edáficos de cultivo; <sup>(6)</sup> interação entre os diferentes acessos e os diferentes ambientes edáficos; <sup>(7)</sup> refere-se ao resíduo da interação entre acesso e ambiente edáfico de cultivo testados; <sup>(8)</sup> coeficiente de variação. Fonte: o autor.

Ainda sobre os valores de EP, verificou-se que o ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional alcançou resultado significativamente maior ( $p < 0,05$ ) que aqueles apresentados tanto no ambiente que tinha apenas alta disponibilidade nutricional, quanto no ambiente controle ([Figuras 7C e 7D](#)) o que indica que irrigação e adubação em macaúba intensificam a produtividade de frutos, quantidade de biomassa foliar senescida e favorece a exploração energética da biomassa foliar senescida por unidade de área.

**Figura 7** - Poder calorífico superior (PCS) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ) (A), poder calorífico inferior (PCI) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ) (B) e comportamento da energia potencial (EP) ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) em função do volume de biomassa foliar senescida (Biomassa) ( $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) (C) de macaúba nos diferentes ambientes edáficos testados (ambiente com alta disponibilidade nutricional (CA); ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional (CA + CI) e ambiente controle com baixa disponibilidade hídrica e nutricional (testemunha) (CO)). Barras com a mesma tonalidade acompanhadas por letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ )



Fonte: o autor.

## 6 DISCUSSÃO

O fato de as palmeiras de macaúba cultivadas em ambiente com alta disponibilidade hídrica terem acumulado maior quantidade de biomassa foliar senescida ([Figura 4A](#)) pode ser atribuído ao favorecimento ao crescimento vegetativo ocasionado pela maior disponibilidade hídrica, bem como ao provável aumento da translocação interna de nutrientes ([HERNÁNDEZ \*et al.\*, 2018](#); [VRIGNON-BRENAS \*et al.\*, 2019](#)).

Sobre este assunto, [Taiz & Zeiger \(2017\)](#) afirmam que 90% da massa de folhas é resultado da disponibilidade hídrica aportada às plantas durante o seu desenvolvimento, disponibilidade hídrica essa que atua favorecendo o transporte de nutrientes na planta.

[Mota & Cano \(2016\)](#) e [Bicalho \*et al.\* \(2016\)](#) concluíram que a macaúba possui mecanismos eficientes de tolerância ao déficit hídrico somada a uma grande capacidade de aproveitamento na reidratação. Logo, isso explica o fato de o ambiente de alta disponibilidade hídrica ter acumulado mais biomassa foliar senescida ([Figura 4A](#)). Uma das explicações para isso pode ser obtida do trabalho de [Ibrahim \*et al.\* \(2010\)](#), os quais informaram que um dos principais motivos do acréscimo de folhas em plantas é o aumento da absorção de CO<sub>2</sub> pela influência positiva da disponibilidade hídrica sobre a abertura estomática.

Os resultados observados de acúmulo de biomassa foliar senescida ([Figura 4A](#)) também indicaram que a disponibilidade hídrica no solo pode ser considerada um dos principais fatores edáficos regulatórios ao acúmulo de biomassa foliar senescida em macaúba.

Estes resultados permitiram notar que, em macaúba, a restrição hídrica foi mais limitante ao crescimento vegetal e ao acúmulo de biomassa do que a disponibilidade de nutrientes ([Figura 4A](#)). Esse comportamento pode ser explicado, de acordo com [Chaves & Oliveira \(2004\)](#) pelo fato de que a restrição hídrica em plantas resulta em aumento da resistência dos poros estomáticos à perda de água e com isso, aumenta a dificuldade de difusão de CO<sub>2</sub> no mesófilo, comprometendo a assimilação do carbono e o aproveitamento do potencial nutricional disponibilizado pelo ambiente.

Entre os estudos que corroboram com essa inferência, destacam-se o de [Cornic \(2000\)](#), [Chaves, Flexa & Pinheiro \(2009\)](#) e o de [Renninger & Phillips \(2016\)](#), os quais apontam que um dos primeiros processos fisiológicos afetados pelo estresse

hídrico é a condutância estomática ([CORNIC, 2000](#)) que culmina em aumento da resistência estomática, aumento da temperatura e limitação do potencial de ganho de carbono.

Os resultados de produtividade de fruto ([Figura 4B](#)) demonstraram que, assim como os resultados em termos de acúmulo de biomassa foliar, é a interação positiva entre disponibilidade de água junto com disponibilidade nutricional, mais do que apenas a disponibilidade nutricional quando individualmente considerada, que governa o rendimento produtivo em macaúba. Além disso, indica ainda a existência de relação positiva direta entre acúmulo de folhas senescentes e produtividade de frutos.

Dessa forma, é possível perceber que o rendimento de frutos em palmeira macaúba depende em grande parte da disponibilidade hídrica e quanto maior a produtividade de frutos, maior também é a quantidade de folhas senescentes obstruindo/dificultando o acesso ao cacho.

Salienta-se que estas constatações podem e devem ser analisadas com detalhe em trabalhos subsequentes que analisarão as trocas gasosas em tempo real da palmeira. No entanto, estas informações permitem importantes percepções sobre a cultura da macaúba.

Em relação às quantidades remanescentes de macro e micronutrientes na biomassa foliar senescente, os resultados deste trabalho confirmaram as conclusões de [Pimentel et al. \(2015\)](#) os quais também identificaram que a disponibilidade hídrica aumentou a eficiência na absorção e no acúmulo de minerais nas folhas. Em contrapartida, a ausência de influência significativa da origem endêmica da macaúba demonstrou que o acúmulo de biomassa foliar senescente em macaúba é preponderantemente mais relacionada com o ambiente edáfico do que com a diferença de acesso ([Tabela 3](#)) ([Figuras 5A, 5C, 5D, 5F e 6E](#)).

O N, Ca, S e Zn, no solo, são fortemente transportados por fluxo de massa ([MALAVOLTA, 2006](#); [MARSCHNER, 2012](#); [MONTROYA et al, 2016](#)) e isso explica a constatação de os maiores valores remanescentes destes nutrientes terem se concentrado na biomassa foliar senescente das plantas cultivadas em ambiente com alta disponibilidade hídrica ([Figuras 5A, 5C, 5D, 5F e 6E](#)), visto que a alta disponibilidade hídrica aumentou o transporte desses nutrientes por esta via no solo até o contato com as raízes.

Apesar disso, conquanto tenha sido observado efeito significativo da disponibilidade hídrica sobre a quantidade de biomassa foliar senescida, produtividade de frutos e conteúdo de macro e micronutrientes na biomassa foliar senescida, tanto o poder calorífico superior (PCS), quanto o poder calorífico inferior (PCI) não foram influenciados pela alta ou baixa disponibilidade hídrica ou nutricional ([Tabela 4](#)).

Essa resposta energética observada proporciona conclusões relevantes visto que, com isso, a cadeia produtiva e industrial de macaúba das regiões tropicais passam a dispor de valor conhecido do poder calorífico da biomassa foliar senescida ( $19,2 \text{ GJ t}^{-1}$ ) ([Figura 7A](#)), o qual pode ser utilizado como índice adequado quando da estimativa prévia do rendimento energético da utilização da biomassa foliar senescida de macaúba, através da multiplicação deste valor com a quantidade acumulada de biomassa foliar senescida ( $\text{t ha}^{-1}$ ).

Além disso, o resultado apresentado em termos de PCS e PCI da biomassa foliar senescida de macaúba se mostrou superior àquele observado na palha de cana-de-açúcar ( $17 \text{ GJ t}^{-1}$ ) ([STICKLEN, 2008](#)) indicando que pode existir potencial de utilização desta biomassa na indústria de biocombustíveis.

Indicativos adicionais acerca do potencial de utilização dessa biomassa foram constatados pelo valor alcançado de rendimento energético (EP) da biomassa foliar senescida ( $122 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) ([Figura 7D](#)), valor que é 28,3% do valor alcançado atualmente com o bagaço da cana de açúcar ([STICKLEN, 2008](#); [SANTOS, BORÉM & CALDAS, 2018](#); [SIMÕES et al., 2018](#); [PAULA et al. 2011](#)) abrindo novos caminhos inclusive para o melhor aproveitamento desta biomassa foliar senescida em lavouras de macaúba.

Assim, os resultados observados neste experimento revelaram que a disponibilidade hídrica tem influência significativa ( $p < 0,05$ ) sobre a quantidade de biomassa foliar senescida em macaúba e indicaram existir relação direta entre biomassa foliar senescida e produtividade de frutos em macaúba. Em paralelo, indicaram também que a disponibilidade hídrica aumenta a quantidade de minerais acumulados na folha permitindo indícios de forte reciclagem de nutrientes que pode ser obtida pelo adequado manejo subsequentes da biomassa foliar senescida ([TABALDI et al., 2012](#); [GAZOLA et al., 2019](#)).

Foi possível perceber também que independentemente de a disponibilidade nutricional ou hídrica variar, o poder calorífico da biomassa foliar senescida não apresenta variação significativa ( $p < 0,05$ ) proporcionando importantes subsídios para estudos subsequentes que avaliem o potencial dessa biomassa como fonte energética, ou ainda como fonte de reciclagem de nutrientes do solo.

Por fim, salienta-se que apesar deste trabalho ter caráter exploratório, ele conseguiu demonstrar a influência da disponibilidade hídrica e nutricional sobre o acúmulo anual de biomassa foliar senescida, produtividade de frutos e sobre as características intrínsecas da biomassa foliar senescida. Os resultados revelaram evidências de que pode haver um potencial energético/nutricional subaproveitado, abrindo novas perspectivas e abordagens para o aproveitamento sustentável desta biomassa.



## 7 CONCLUSÕES

Ambientes com alta disponibilidade hídrica e nutricional permitem acúmulos de maior quantidade de biomassa foliar senescida ao longo da safra ( $6,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) do que ambientes sob condições hídricas limitadas ( $3,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), mesmo em solos eutróficos ( $3,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

O acúmulo de biomassa foliar senescida é fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica do ambiente, de tal forma que sob mesma condição nutricional, acessos de macaúba cultivados em ambiente com alta disponibilidade hídrica acumulam 64% a mais de biomassa foliar e quantidades remanescentes superiores de N, K, Ca, S e Zn que plantas cultivadas em ambiente de baixa disponibilidade hídrica.

Apesar disso, a alta ou baixa disponibilidade hídrica ou nutricional não são capazes de alterar significativamente o poder calorífico superior e inferior da biomassa foliar senescida da macaúba que se situam na faixa de  $19,2 \text{ GJ t}^{-1}$  e  $16,3 \text{ GJ t}^{-1}$ , para PCS e PCI, respectivamente, independentemente do acesso testado.

Por fim, a disponibilidade hídrica no solo é um dos principais fatores edáficos regulatórios ao acúmulo de biomassa foliar senescida em macaúba com maior quantidade residual de nutrientes.

## **8 AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## 9 REFERÊNCIAS

- AHMAD, F. B.; ZHANG, Z.; DOHERTY, W. O.; O'HARA, I. M. The prospect of microbial oil production and applications from oil palm biomass. **Biochemical Engineering Journal**, v. 143, p. 9-23, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.12.003>
- [ANTONINI, J.C.A.; VELOSO, R. F.; MALAQUIAS, J. V. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo na fase produtiva da palma de óleo \(\*Elaeis guineensis\* Jacq.\) nas condições de clima tropical de savana. \*\*Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento \(INFOTECA-E\) 325, Embrapa Cerrados, 2015. 22p.\*\*](#)
- [ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. \*\*NBR 11956: Coque - Determinação do poder calorífico superior - Método de ensaio.\*\* Rio de Janeiro, 1990. 6 p.](#)
- [BASSOI, L. H.; FLORI, J. E.; SILVA, E. E. G.; SILVA, J. A. M. \*\*Manejo de irrigação da pupunheira para produção de palmito no Vale do São Francisco.\*\* Embrapa Semiárido-Comunicado Técnico \(INFOTECA-E\), 2002.](#)
- [BHERING, L. L.; VILELA, M. D. F.; AQUINO, F. D. G.; LAVIOLA, B. G.; JUNQUEIRA, N. T. V.; CARGNIN, A. \*\*Mapeamento de maciços naturais de ocorrência de macaúba \(\*Acrocomia aculeata\*\) visando à exploração sustentável.\*\* In: Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, 1., 2010, João Pessoa. Anais... Inclusão social e energia. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010. p.143-148.](#)
- BICALHO, E. M.; ROSA, B. L.; SOUZA, A. E. D.; RIOS, C. O.; PEREIRA, E. G. Do the structures of macaw palm fruit protect seeds in a fire-prone environment? **Acta Botanica Brasilica**, v. 30, p. 540-548, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-33062016abb0077>
- BURY, M.; RUSINOWSKI, S.; SITKO, K.; KRZYŻAK, J.; KITCZAK, T.; MOŹDŻER, E.; POGRZEBA, M. Physiological status and biomass yield of *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby cultivated on two distinct marginal lands in Southern and Northern Poland. **Industrial Crops and Products**, v. 167, p. 113502, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113502>
- CARDOSO, M. R. D. Classificação climática de köppen-geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v.8, n.16, p. 40-55, 2014. <https://doi.org/10.5654/actageo2014.0004.016>
- CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of botany**, v. 103, n. 4, p. 551-560, 2009. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- CHAVES, M. M.; OLIVEIRA, M. M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. **Journal of experimental botany**, v. 55, n. 407, p. 2365-2384, 2004. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh269>
- CORNIC, G. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture--not by affecting ATP synthesis. **Trends in plant science**, v. 5, p. 187-188, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01625-3](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01625-3)

DEBONI, T. L.; SIMIONI, F. J.; BRAND, M. A.; LOPES, G. P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable energy**, v. 135, p. 1291-1302, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.039>

[DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. Manual de métodos de análise de solo. \(2ª.ed.\). Rio de Janeiro: Embrapa-Solos; 2011. \(Documentos/Embrapa Solos, 132\).](#)

[EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018, 355p.](#)

EVARISTO, A. B.; MARTINO, D. C.; FERRAREZ, A. H.; DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; GROSSI, J. A. S. Energy potential of the macaw palm fruit residues and their use in charcoal production. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 571-577, 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509822757>

[FAVARO, S. P.; MIRANDA, C..H. B. Aproveitamento de espécies nativas e seus coprodutos no contexto de biorrefinaria. Embrapa Agroenergia, Documentos 14, p. 38, 2013.](#)

FRANSEN, F. J. Utilizing biomass and waste for power production—a decade of contributing to the understanding, interpretation and analysis of deposits and corrosion products. **Fuel**, v. 84, n. 10, p. 1277-1294, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.08.026>

[FRIZZAS, M.; DIANESE, A. D. C.; OLIVEIRA, C. M.; JUNQUEIRA, N. Aspectos fitossanitários da macaúba \[\*Acrocomia aculeata\* \(Jacq.\) Lodd ex. Martius\]: principais pragas e doenças. Embrapa Cerrados-Documents \(INFOTECA-E\). 2020. 38p](#)

GAZOLA, R. D. N.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M.; GAZOLA, R. P. D.; CELESTRINO, T. D. S.; SILVA, A. C. D.; SILVA, P. H. M. D. Potassium fertilization of eucalyptus in an entisol in low-elevation cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, 2019. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180085>

GRUPIONI, C. M.; SANTOS, F. L.; VELLOSO, N. S.; VALENTE, D. S. M.; CARVALHO PINTO, F. D. A. Macaw palm supply chain: Evaluation of a semi-mechanized fruit harvesting system. **Industrial Crops and Products**, v. 151, p. 112444, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112444>

HERNÁNDEZ, K. A.; OWENS, V. N.; BOE, A.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J. L.; LEE, D.; ABERLE, E. Above-and belowground prairie cordgrass response to applied nitrogen on marginal land. **BioEnergy Research**, v. 11, n. 2, p. 440-448, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9908-1>

HYTÖNEN, J.; NURMI, J.; KAAKKURIVAARA, N.; KAAKKURIVAARA, T. Rubber tree (*Hevea brasiliensis*) biomass, nutrient content, and heating values in southern Thailand. **Forests**, v. 10, n. 8, p. 638, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10080638>

IBRAHIM, M. H.; JAAFAR, H. Z. E.; HARUN, M. H.; YUSOP, M. R. Changes in growth and photosynthetic patterns of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings exposed to short-term CO<sub>2</sub> enrichment in a closed top chamber. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 32, n. 2, p. 305-313, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0408-y>

KALAJI, H.M.; OUKARROUM, A.; ALEXANDROV, V.; KOUZMANOVA, M.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; GOLTSEV, V. Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by in vivo chlorophyll a fluorescence measurements. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 81, p. 16-25, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029>

[MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.](#)

MAŁKOWSKI, E.; SITKO, K.; ZIELEŹNIK-RUSINOWSKA, P.; GIEROŃ, Ź.; SZOPIŃSKI, M. Heavy Metal Toxicity: Physiological Implications of Metal Toxicity in Plants. In: Sablok G. (eds). **Plant Metallomics and Functional Omics**. Springer, Cham, 2019. p. 253-301. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19103-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19103-0_10)

[MARSCHNER, P. Mineral nutrition of higher plants \(3 ed.\) London: Academic Press, 2012. 651p.](#)

MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: Response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 137, p. 116-126, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>

[MIRANDA, F. R.; GOMES, A. R.; OLIVEIRA, C. H.; MONTENEGRO, A. A.; BEZERRA, F. M. Evapotranspiration and crop coefficients for green-dwarf coconut in the coastal area of Ceará State, Brazil. \*\*Ciência Agronômica\*\*, v. 38, n.2, p. 129, 2007.](#)

MONTOYA, S. G.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N.; COUTO, A. D. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927-938, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2558-7>

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SILVERT, C.; DIETRICH, O. H. S., PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Above-and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121628>

MOTA, C. S.; CANO, M. A. O. Matter accumulation and photosynthetic responses of macaw palm to cyclical drought. **Revista Caatinga**, v. 29, p. 850-858, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n409rc>

MOTTA, P. E. F. D.; CURI, N.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. D.; GOMES, J. B. V. Ocorrência de macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.7, p.1023-1031, jul. 2002.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>

PAULA, L, E, D, R.; TRUGILHO, P, F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M, L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200012>

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; MOTOIKE, S. Y.; MANFIO, C. E.; SANTOS, R. C. D. Effect of nitrogen and potassium rates on early development of macaw palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1671-1680, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140352>

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S.Y.; PEDROSO NETO, J.C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1ª aproximação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.32, n.265, p.20-30, 2011.

PINHEIRO, C.; CHAVES, M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data?. **Journal of experimental botany**, v. 62, n. 3, p. 869-882, 2011. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq340>

RENNINGER, H. J.; PHILLIPS, N. G. Palm physiology and distribution in response to global environmental change. In: **Tropical tree physiology**, Springer, Cham, 2016, p. 67-101. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_4)

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R**. RStudio, PBC, Boston, MA, 2020. URL <http://www.rstudio.com/>

[SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. \*\*Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Etanol- Tecnologias e Perspectivas\*\*. Editora UFV: Brazil, 2018.](#)

SHELL, DJ; FARMER, J.; NEWMAN, M.; MCMILLAN, JD. Dilute-sulfuric acid pretreatment of corn stover in pilot-scale reactor. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 105, n. 1, p. 69-85, 2003. <https://doi.org/10.1385/ABAB:105:1-3:69>

SILVA CÉSAR, A.; AZEDIAS ALMEIDA, F.; SOUZA, R. P.; SILVA, G. C.; ATABANI, A. E. The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) a non-edible biodiesel feedstock in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1213-1220, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.125>

SIMÕES, D.; CERVI, R.G.; BATISTELA, G. C.. Quantitative Analysis of the Economic Risk of Sugarcane Cultivation for Bioethanol Production: A Case Study in Brazil. **BioResources**, v. 13, n. 3, p. 6497-6509, 2018. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.6497-6509>

SOUZA, G. K.; DIÓRIO, A.; DE LIMA, H. H. C.; DOS SANTOS MANIEZZO, R.; RINALDI, A. W.; PEREIRA, N. C.; POMINI, A. M. Assessment of Natural and Post-Extraction Biomass from *Acrocomia totai* leaves: a Renewable Source of Energy. **BioEnergy Research**, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10208-6>

STICKLEN, M. B. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. **Nature Reviews**, v. 9, p. 433-443, 2008. <https://doi.org/10.1038/nrg2336>

TABALDI, L. A.; VIEIRA, M. D. C.; ZÁRATE, N. A. H.; SILVA, L. R. D.; GONÇALVES, W. L. F.; PILECCO, M.; PADOVAN, M. P. Cover crops and their effects on the biomass yield of *Serjania marginata* plants. **Ciência Rural**, v. 42, p. 614-620, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000400006>

[TAIZ, L.; ZEIGER, E. \*\*Fisiologia vegetal\*\*, 7ªed., Porto Alegre: Editora Artmed, 2017. 918p.](#)

TAN, F.; HE, L.; ZHU, Q.; WANG, Y.; HU, G.; HE, M. Characterization of Different Types of Agricultural Biomass and Assessment of Their Potential for Energy Production in China. **BioResources**, v. 14, n. 3, p. 6447-6464, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.6447-6464>

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>

VENTURINI, O. J.; JÚNIOR, J. C. F.; PALACIO, J. C. E.; BATLLE, E. A. O.; CARVALHO, M.; LORA, E. E. S. **Indicators for sustainability assessment of biofuels: Economic, environmental, social, and technological dimensions**. In: JINGZHENG R.; SCIPIONI, A.; MANZARDO, A.; LIANG, H. (Eds). *Biofuels for a More Sustainable Future*. Elsevier, 2020. p. 73-113. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815581-3.00004-X>

VRIGNON-BRENAS, S.; GAY, F.; RICARD, S.; SNOECK, D.; PERRON, T.; MARESCHAL, L.; MALAGOLI, P. Nutrient management of immature rubber plantations. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 39, n. 1, p. 11, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0554-6>

WANG, M.; DEWIL, R.; MANIATIS, K.; WHEELDON, J.; TAN, T.; BAEYENS, J.; FANG, Y. Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 74, p. 31-49, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.04.004>

WHITE JR, P. M.; VIATOR, R. P.; WEBBER, C. L. Temporal and varietal variation in sugarcane post-harvest residue biomass yields and chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 154, p. 112616, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112616>

XUE, Y.; ZHOU, S.; BROWN, RC; KELKAR, A.; BAI, X. Fast pyrolysis of biomass and waste plastic in a fluidized bed reactor. **Fuel** , v. 156, p. 40-46, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.033>

## **CAPÍTULO II**

### **POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE BIOMASSA FOLIAR SENESCIDA DE MACAÚBA (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius)**



## 1 RESUMO

A crise energética global, somada ao aumento do custo mundial dos fertilizantes tem impulsionado a substituição de fontes fósseis de energia por alternativas renováveis e a descoberta de novas práticas de manejo da fertilidade dos solos. Nesse cenário, o cultivo da macaúba pode ser uma alternativa em função do alto potencial energético que não se restringe apenas à utilização de seus frutos, mas passa pelo aproveitamento da biomassa foliar. Contudo, não há estudos quantificando e qualificando o potencial contido na biomassa foliar senescida de macaúba e isso tem impedido o setor produtivo de conhecer o real potencial desse material biológico e dificultado o dimensionamento dos complexos agroindustriais voltados à exploração energética e nutricional desse material. Assim, de forma inédita, objetivou-se analisar o potencial de aproveitamento da biomassa foliar senescida de acessos distintos de macaúba como biocombustível e como fonte natural de restituição/reciclagem de nutrientes nos principais sistemas de cultivo atualmente existentes. Avaliou-se a composição mineral, ritmo de degradação no solo, rendimento energético e potencial de restituição/reciclagem de nutrientes. Notou-se que a biomassa foliar senescida de macaúba apresenta aptidão tanto para utilização como fonte agroenergética, quanto para servir como fonte de restituição/reciclagem mineral à camada superficial do solo. Constatou-se que sistemas intensivos de cultivo de macaúba foram aqueles que apresentaram maior aptidão para exploração energética da biomassa foliar senescida de macaúba, em razão de acumularem até 64% a mais de biomassa anualmente que os demais sistemas de exploração. Por outro lado, independentemente do sistema de cultivo, a biomassa foliar senescida de macaúba apresentou potencial de reciclagem/restituição de nutrientes às camadas superiores do solo. Concluiu-se que a biomassa foliar senescida de macaúba possui potencial para utilização na indústria agroenergética e como fonte natural de reposição de nutrientes, porém, a destinação ideal depende do tipo de sistema de cultivo adotado.

**Palavras-chave:** Bioenergia. Ciclagem de nutrientes. Senescência foliar. Nutrição mineral.

## 2 ABSTRACT

The global energy crisis, added to the increase in the worldwide cost of fertilizers, has driven the replacement of fossil energy sources by renewable alternatives and the discovery of new practices for managing soil fertility. In this scenario, the cultivation of macauba can be an alternative due to the high-energy potential that is not restricted to the use of its fruits, but involves the use of leaf biomass. However, there are no studies quantifying and qualifying the potential contained in macauba leaf biomass and this has prevented the productive sector from knowing the real potential of this biological material and hampered the dimensioning of agro-industrial complexes aimed at the energetic and nutritional exploitation of this material. Thus, in an unprecedented way, the objective was to analyze the potential of using senesced leaf biomass from different accessions of macauba as biofuel and as a natural source of nutrient restitution/recycling in the main currently existing cropping systems. Mineral composition, soil degradation rate, energy yield and potential for nutrient recovery/recycling were evaluated. It was noted that the senescence leaf biomass of macauba presents aptitude both for use as an agro-energy source and to serve as a source of mineral restitution/recycling to the surface layer of the soil. It was found that intensive macauba cultivation systems were those that showed the greatest aptitude for energy exploration of macauba leaf biomass, as they accumulate up to 64% more biomass annually than other exploration systems. On the other hand, regardless of the cultivation system, the senescence leaf biomass of macauba showed potential for recycling/returning nutrients to the upper layers of the soil. It was concluded that macauba senesced leaf biomass has potential for use in the agro-energy industry and as a natural source of nutrient replacement; however, the ideal destination depends on the type of cultivation system adopted.

**Keywords:** Bioenergy. Nutrient cycling. Leaf senescence. Mineral nutrition.

### 3 INTRODUÇÃO

A crise energética se transformou em um problema global e ameaça a retomada econômica pós-pandemia ([HOURCADE, DASGUPTA & GHERSI, 2021](#); [ONCIOIU \*et al.\*, 2021](#), [LE BILLON \*et al.\*, 2021](#); [SIDDI, 2021](#)).

Entre as evidências reais dessa crise, destaca-se que em 2021, enquanto o Brasil lidou com escassez hídrica, o Reino Unido teve falta de combustíveis e a China paralisou fábricas para reduzir consumo de energia ([HOANG \*et al.\*, 2021](#)).

Além disso, a combinação de preços internacionais elevados, alta demanda, escassez da oferta mundial e problemas logísticos influenciaram significativamente os custos de produção agropecuária em 2021, em especial os custos dos fertilizantes que atingiram aumentos de até 100% em alguns países ([ILINOVA, DMITRIEVA & KRASLAWSKI, 2021](#)).

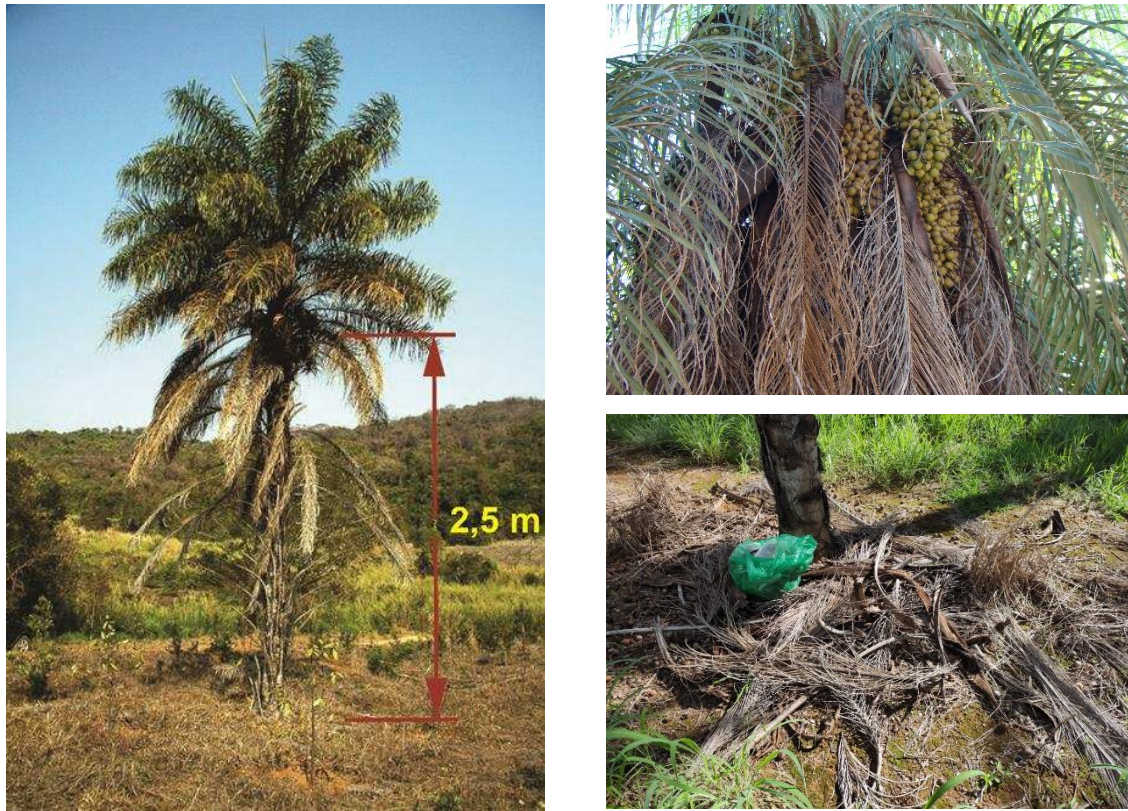
Em consequência, tem aumentado a utilização de fontes renováveis de energia, entre os quais biomassas e resíduos vegetais agrícolas que demonstram grande potencial para superação destes desafios ([EVARISTO \*et al.\*, 2016](#); [ROCKSTRÖM \*et al.\*, 2017](#); [KHAN \*et al.\*, 2021](#)).

Assim, culturas energéticas como a macaúba (*Acrocomia aculeata*) que produz naturalmente grande quantidade de óleo por hectare (mais de 4 t ha<sup>-1</sup>) ([MONTROYA \*et al.\*, 2016](#)), apresenta elevada rusticidade à seca, solos ácidos e fogo ([BICALHO \*et al.\*, 2016](#); [PIRES \*et al.\*, 2013](#)), que detém capacidade em ocupar áreas marginais e que não compete por áreas com culturas agroalimentares tem tido uma atenção especial pela pesquisa agroenergética e industrial ([LANES \*et al.\*, 2015](#); [BERGMANN \*et al.\*, 2013](#); [NAVARRO-DÍAZ \*et al.\*, 2014](#); [SINGH \*et al.\*, 2013](#)).

Contudo, o potencial da macaúba como cultura estratégica para superação dos atuais desafios mundiais não se restringe à utilização do seu óleo como fonte energética, ao contrário, existe grande potencial inexplorado e reservado também a sua biomassa foliar senescida ([SINGH, ARORA & SINGH, 2021](#)).

Isto porque a macaúba produz grande quantidade de óleo e de biomassa foliar que, após processo natural de translocação de nutrientes e senescência, se acumula no estipe, na copa e sobre o solo ([GRUPIONI \*et al.\*, 2020](#)), com tal intensidade que provoca inclusive dificuldades no acesso ao cacho durante a colheita e tratos culturais ([SOUZA \*et al.\*, 2020](#)) ([Figura 1](#)).

**Figura 1** - Representação da biomassa foliar resultante da senescência ao longo do ciclo produtivo de palmeira macaúba



Fonte: o autor.

Diante da ausência de informações acerca do aproveitamento possível dessa biomassa foliar senescida, a cadeia produtiva e industrial de macaúba pode estar perdendo um material de grande potencial para suprimento energético e nutricional das cadeias de produção.

Logo, isso revela a necessidade/oportunidade de mais estudos sobre o potencial desse material nos mais diversos sistemas de cultivo (sistema intensivo, semi-intensivo e extrativista), de modo a identificar as melhores destinações para cada sistema de cultivo, seja como fonte de energia ([SAWANGKEAW & NGAMPRESERTSITH, 2013](#); [LAURENT et al., 2015](#)), seja como fonte de reutilização/reciclagem de nutrientes minerais na camada superficial do solo ([CARVALHO et al., 2013](#); [LEAL et al., 2013](#); [TRIVELIN et al., 2013](#); [ANDREOTTI et al., 2015](#)).

Em cana-de-açúcar, por exemplo, os estudos de aproveitamento da biomassa vegetal já se encontram bem avançados, com a identificação de seu potencial como biomassa energética e como fonte de restituição nutricional ao solo ([FRANCO \*et al.\*, 2013](#); [NTIMBANI, FARZAD & GÖRGENS, 2021](#); [FORMANN \*et al.\*, 2020](#); [LEFEBVRE \*et al.\*, 2020](#); [VOLPI \*et al.\*, 2021](#)).

No entanto, em macaúba, o potencial de utilização da biomassa foliar senescida continua inexplorado, situação que deve ser superada, sobretudo para proporcionar à indústria e às áreas produtoras, possíveis soluções práticas que poderão contribuir na superação da crise energética e do alto custo dos fertilizantes ([OLIVEIRA \*et al.\*, 2017](#); [OLIVEIRA \*et al.\*, 2020](#)).

Dessa maneira, é importante identificar potenciais dessa biomassa foliar senescida para cada sistema de cultivo, de modo a possibilitar decisões prévias, livres e informadas sobre o adequado manejo para cada um dos sistemas. A opção de reter a palha na superfície do solo ou utilizá-la na indústria energética, por exemplo, poderia oferecer benefícios, conforme o caso, para a qualidade do solo, sustentabilidade ambiental, geração de renda, redução de custos de produção e aumentos de produtividade na cultura ([CARVALHO \*et al.\*, 2013](#); [VITTI \*et al.\*, 2011](#); [CARVALHO \*et al.\*, 2017](#)).

Assim, a identificação do potencial de utilização da biomassa foliar senescida de macaúba é um importante primeiro passo para (i) avançar nas tecnologias associadas à produção de bioenergia, (ii) responder ao crescente interesse dos agricultores em identificar a melhor forma de utilização dessa biomassa, possibilitando-os de compreender os aspectos técnicos, econômicos e ambientais do uso desse material e (iii) apresentar o potencial de exploração da biomassa para os diversos sistemas de cultivo atualmente empregados na cultura.

Portanto, objetivou-se, de forma inédita, analisar o potencial de aproveitamento da biomassa foliar senescida de acessos distintos de macaúba, tanto como biocombustível, quanto como fonte natural de restituição/reciclagem de nutrientes, explorando esse potencial nos principais sistemas de cultivo atualmente existentes (sistema intensivo, semi-intensivo e sistema extrativista).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização do local de implantação do experimento

O experimento foi realizado ao longo de duas safras (2013 a 2015) no planalto central brasileiro, no município de Planaltina, Distrito Federal do Brasil (15° 60' 02,12" S e 47° 73' 42,44" W) utilizando plantas em idade reprodutiva (5 anos de idade, plantadas em 2008).

A vegetação original da área de realização do experimento era do tipo cerrado típico. O solo do local de realização do experimento é Latossolo vermelho e amarelo (LVA), profundo e bem drenado ([EMBRAPA, 2018](#)), com relevo plano. As características do solo no momento das avaliações realizadas entre 2013 e 2015 eram aquelas constantes na [Tabela 1](#).

**Tabela 1** - Caracterização química na camada de 0-0,2 m e de 0,2-0,4 m de profundidade da área de condução do experimento, safra (2013/2014)

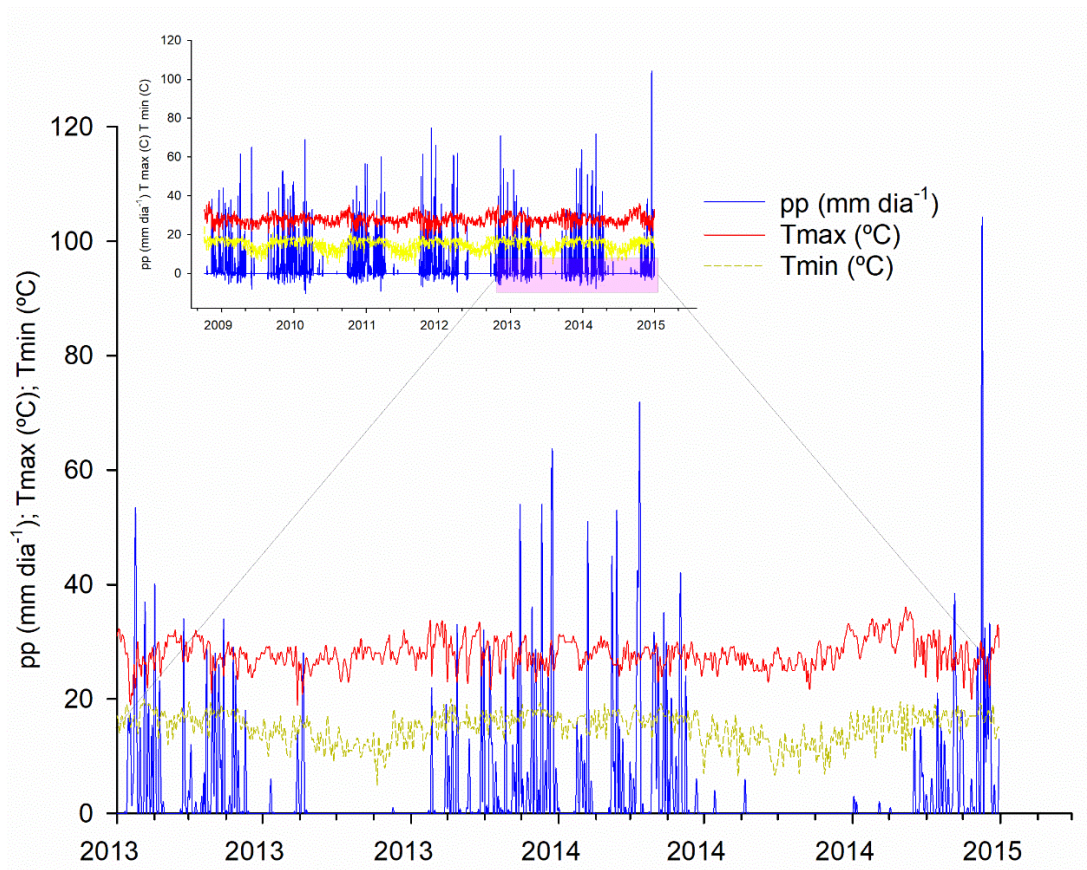
Fator	Profundidade (m)	
	0-0,2	0,2-0,4
pH (H <sub>2</sub> O)	5,45	4,98
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,85	4,48
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	2,27	1,88
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,72	3,53
K (mg dm <sup>-3</sup> )	66,57	52,18
S (mg dm <sup>-3</sup> )	12,67	23,70
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,12	1,75
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,87	0,60
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,12	0,33
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,25	5,80
CTC (cmol <sub>c</sub> cm <sup>-3</sup> )	9,40	8,28
V (%)	44,00	30,00
m (%)	4,00	13,00
Ca/Mg	3,72	3,08
Ca/K	18,05	13,18
Mg/K	4,92	4,48
Ca/CTC	33,25	21,25
Mg/CTC	9,25	7,50
Na/CTC	0,00	0,00
K/CTC	1,75	1,25
H+Al/T	55,75	70,00
B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,57	0,50
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,70	0,73
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	128,10	129,15
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	14,45	9,85
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	4,60	2,60

V (%): saturação por bases; m (%): saturação por alumínio. Caracterização do solo feita de acordo com a metodologia de [Donagema et al. \(2011\)](#).

O clima da Região dos Cerrados do Planalto Central, de acordo com a classificação de Köppen é Aw - Clima Tropical ([CARDOSO, 2014](#)) com estação seca apresentando dois períodos definidos sendo uma estação chuvosa, entre outubro e abril, quando caem mais de 90% das chuvas, e uma estação seca, com ausência quase total de chuvas e que se prolonga de maio a setembro ([Figura 2](#)).

A área ocupada para realização do experimento foi submetida à correção da acidez do solo em área total ( $3,0 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário,  $2,0 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso) na ocasião do plantio das mudas em 2008.

**Figura 2** - Valores diários de precipitação pluviométrica (pp) ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), temperatura máxima do dia (tmax)( $^{\circ}\text{C}$ ) e temperatura mínima do dia (tmin) ( $^{\circ}\text{C}$ ) desde o plantio das palmeiras e durante a condução experimental. Dados obtidos a partir da estação meteorológica localizada na própria área experimental



Fonte: o autor.

## 4.2. Design experimental

O experimento ocupou uma área de 0,7 hectares. Foram testados acessos nativos de duas distintas regiões brasileiras com cinco anos de idade (em idade reprodutiva) cultivados em espaçamento 5 x 5 m (400 pl ha<sup>-1</sup>), os quais foram avaliados em três diferentes sistemas de exploração, sob delineamentos em blocos casualizados em esquema fatorial 2x3 com quatro repetições para cada tratamento e cinco plantas por parcela.

O primeiro fator testado correspondeu aos dois distintos acessos testados, denominado AcDF o acesso proveniente do planalto central brasileiro e AcSP o acesso proveniente da região sudeste brasileira.

O segundo fator testado correspondeu a três distintos sistemas de exploração de macaúba atualmente utilizados, sendo *i*) sistema intensivo de produção, caracterizado pela suplementação nutricional anual acompanhado de suplementação hídrica constante (CA + CI); *ii*) sistema semi-intensivo, caracterizado pela nutricional anual, mas sem irrigação (CA); e *iii*) sistema de cultivo extrativista, caracterizado por não utilizar irrigação e nem adubação direcionada (CO).

## 4.3. Estabelecimento dos sistemas de exploração

### 4.3.1. Estabelecimento do sistema intensivo de exploração de macaúba

O sistema intensivo de exploração de macaúba contou com sistema de irrigação e adubação. Na irrigação, foi utilizado sistema de irrigação por microaspersão com eficiência de aplicação de 90% utilizando-se dois microaspersores por planta.

O perfil de controle da irrigação foi de 0,5 metros, referente à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura. A área molhada, por ocasião da aplicação da lâmina de água, foi de 43% da área total ocupada por planta. A evapotranspiração de referência ( $E_{t0}$ ) foi estimada pela equação de Penman-Monteith, calculada com dados obtidos da estação meteorológica da própria área experimental.

O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) adotado foi igual a 1, valor este estimado em função do valor de outras palmeiras, visto que não existe determinações deste coeficiente para a macaúba, como existe para coqueiro ([MIRANDA et al., 2007](#)), palma de óleo ([ANTONINI, VELOSO & MALAQUIAS, 2015](#)) e pupunheira ([BASSOI et al., 2002](#)).



O momento de irrigação foi definido pelo uso do fator de disponibilidade de águas no solo ( $f$ ), assumindo  $f = 0,5$ . A lâmina de água aplicada, em cada irrigação, foi obtida pelo produto resultante da  $E_t$  com o  $K_c$ , considerando a eficiência do sistema de 90%.

Na adubação, foram utilizadas as recomendações de [Pimentel et al. \(2011\)](#). As parcelas receberam aplicação de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  (300 g por cova) de NPK (04-30-16) na ocasião do plantio, seguida da aplicação de  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  (100 g por cova) de sulfato de amônio aos 60 e 120 dias após o plantio e durante a condução experimental receberam  $480 \text{ kg ha}^{-1}$  (1,2 kg por planta) de NPK (10-05-15), divididas em 3 aplicações iguais anuais intercaladas a cada 30-45 dias, entre novembro e fevereiro (estação chuvosa na região), além de suplementação única com  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  (300g por planta) com FTE (Fritted Trace Elements) BR 12 (9% de Zn, 1,8% de B, 0,8% de Cu, 2% de Mn, 3,5% de Fe e 0,1% de Mo).

#### **4.3.2. Estabelecimento do sistema semi-intensivo de exploração de macaúba**

O sistema semi-intensivo de produção de macaúba contou apenas com sistema de adubação anual com doses e aplicações idênticas àquelas realizadas no sistema intensivo de produção, porém, não foi submetida à irrigação.

#### **4.3.3. Estabelecimento do sistema extrativista de exploração de macaúba**

As parcelas submetidas ao sistema extrativista de exploração não foram submetidas a irrigação e nem adubação anuais, salvo a correção inicial do solo a que todas as parcelas foram submetidas no momento do plantio em 2008, ocasião em que todas as parcelas experimentais foram submetidas à correção da acidez do solo em área total ( $3,0 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário,  $2,0 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso).

#### 4.4. Avaliações

##### 4.4.1. Quantidade de biomassa foliar senescida acumulada (Biomassa), seu poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e rendimento energético (EP)

A determinação da biomassa foliar senescida ( $t\ ha^{-1}$ ) foi realizada através de coletas semestrais realizadas ao longo de 2013 a 2015. Salienta-se que para se obter a correta condução experimental, a biomassa que já se encontrava acumulada sobre o solo e nas plantas das parcelas antes do início das observações foi removida.

As coletas foram realizadas manualmente tanto das folhas acumuladas no solo sob a projeção da planta quanto daquelas secas presas no estipe da planta na data da coleta, as quais, juntas, foram pesadas com auxílio de uma balança de campo e corrigidas para base seca. O critério de identificação das folhas a serem coletadas foi o visual, ou seja, coletando-se aquelas folhas que no momento da visita a planta estivessem completamente secas.

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS) ( $GJ\ t^{-1}$ ) da biomassa foliar senescida, foram utilizadas amostras do terço distal das folhas representativas de cada unidade experimental coletadas daquelas que se encontravam senescidas e presas ao estipe, tendo sido estas amostras secas, trituradas, homogeneizadas e analisadas em calorímetro de combustão (C2000 Basic, IKA) conforme a norma NBR 11956 ([ABNT, 1990](#)).

O poder calorífico inferior (PCI) ( $GJ\ t^{-1}$ ) foi calculado de acordo com [Parikh, Channiwala & Ghosal \(2005\)](#), conforme [Equação 1](#) em que PCI é o poder calorífico inferior, PCS é o poder calorífico superior, H é o percentual de hidrogênio (considerado como 6%, uma vez que a maioria das biomassas lignocelulósicas apresentam percentual de hidrogênio entre 5,5 e 6,5).

$$PCI = PCS - 600 \left( \frac{9H}{100} \right) \quad \text{Equação 1}$$

O rendimento energético (EP) foi obtido pelo produto entre o poder calorífico superior (PCS) e o valor de biomassa produzido, conforme a [Equação 2](#).

$$EP = PCS \times Biomassa$$

Equação 2

Em que EP é o rendimento energético, expresso em gigajoule por hectare (GJ ha<sup>-1</sup>), PCS é o poder calorífico superior (GJ t<sup>-1</sup>), e Biomassa é o valor da biomassa foliar senescida (Biomassa) (t ha<sup>-1</sup>).

#### 4.4.2. Composição elementar CNH e análise química imediata

A análise elementar de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) da biomassa foliar senescida e macaúba foi realizada utilizando a metodologia descrita pela [CEN/TS 15104 \(2011\)](#). Para isso, amostras de resíduos de 2,0 cm<sup>3</sup> ± 0,5 cm<sup>3</sup> foram secas a 105 °C e retidas em uma peneira de 0,053 mm após passar por uma peneira de 0,074 mm. Em seguida, foram analisadas usando um analisador Perkins Elmer 2400 CHNS/O.

Para a análise imediata, utilizou a metodologia constante na Norma 8112 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - [ABNT \(1983\)](#), para determinação de materiais voláteis e teor de cinzas. O conteúdo fixo de carbono (CF) foi derivado da diferença ([Equação 3](#)).

$$CF(\%) = 100 - MV(\%) - CI(\%)$$

Equação 3

Em que CF é a percentagem de carbono (%), MV é a percentagem de materiais voláteis (%) e CI é a percentagem de cinzas (%).

#### 4.4.3. Biomassa foliar senescida remanescente (BF), nutrientes remanescentes, taxa de decomposição (R), tempo de meia vida (T1/2) e estimativa da restituição/reciclagem de nutrientes

Para quantificar a biomassa remanescente (BF), foi utilizado o método de utilização de *litter bags*, adaptado de [Bocock & Gilbert \(1957\)](#). Para isso, em cada parcela foram instalados cinco *litter bags* confeccionados de tela de poliéster (malha de 2 mm) com tamanho de 0,07 m<sup>2</sup> (20 x 35 cm) ([Figura 3](#)) fixados ao solo.

Assim, cada parcela experimental conteve cinco *litter bags*, correspondentes a cinco datas de coletas, sendo *T0* a coleta realizada na data zero, *T1* a coleta realizada após 90 dias, *T2* a coleta realizada após 180 dias, *T3* a coleta realizada após 270 dias e *T4* a coleta realizada após 360 dias.

**Figura 3** - Representação unitária das unidades de *litter bags* e sua distribuição espacial sob a copa das unidades experimentais



Fonte: o autor.

O preenchimento dos *litter bags* foi feito com quantidades homogêneas e conhecidas de biomassa foliar senescida (100 g por *litter bag* após secagem a 65°C e obtenção de peso constante) obtidas das respectivas parcelas avaliadas.

A biomassa foliar senescida remanescente (BF) foi obtida pela coleta, limpeza, secagem em estufa com circulação forçada e pesagem em balança de precisão (0,01 g), nas datas definidas, do respectivo conteúdo dos *litter bags*.

Com os valores da biomassa foliar senescida remanescente (BF), foram determinadas a taxa de decomposição (R) utilizando-se a [Equação 4](#) obtida de [Pardo, Gil & Pardos \(1997\)](#), em que BF é o valor da biomassa foliar senescida remanescente; BI é o peso inicial (100 g); t, o tempo de permanência do *litter bag* avaliado e R a taxa de decomposição.

$$BF = BI \cdot e^{-R \cdot t} \quad \text{Equação 4}$$

Para estimar o período de meia vida ( $T_{1/2}$ ) ou período necessário para que 50% da biomassa fosse transformada, utilizou-se a [Equação 5](#) obtido de [Costa & Atapattu \(2001\)](#) utilizando os valores obtidos no cálculo da taxa de decomposição (R).

$$t_{0,5} = \ln \frac{2}{k} \quad \text{Equação 5}$$

Para a identificação dos valores dos macronutrientes remanescentes, os resíduos foram moídos em moinho tipo Wiley e encaminhados para o Laboratório para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg e S com o método de digestão ácida,

citado por [Tedesco et al. \(1995\)](#). Com base nos teores e no valor de biomassa remanescente (BF), foram calculadas as quantidades remanescentes dos nutrientes.

As taxas (constantes) de decomposição e de liberação de macronutrientes das palhadas foram estimadas ajustando-se modelos de regressão não lineares aos valores observados, conforme [Equação 6](#) propostas por [Wieder & Lang \(1982\)](#).

$$BF = A e^{-Ra.t} + (100 - A) \quad \text{Equação 6}$$

$$BF = A e^{-Ra.t} + (100 - A)e^{-Rb.t} \quad \text{Equação 7}$$

Em que BF refere-se à biomassa remanescente; Ra, constante de decomposição do compartimento mais facilmente decomponível (A); Rb, constante de decomposição do compartimento mais recalcitrante; e t, tempo em dias.

Ambos os modelos consideram que a matéria seca e os nutrientes contidos nas palhadas podem ser divididos em dois compartimentos, o primeiro mais facilmente decomponível (A), e o segundo mais recalcitrante (100-A).

No modelo assintótico ([Equação 6](#)), são transformados apenas a matéria seca e os nutrientes do compartimento mais facilmente decomponível, diminuindo exponencialmente com o tempo, a uma taxa constante (Ra).

O compartimento mais recalcitrante não sofre transformação no período considerado. No modelo exponencial duplo ([Equação 7](#)), a matéria seca e os nutrientes dos dois compartimentos diminuem exponencialmente a taxas constantes, com a primeira fração transformada a taxas mais elevadas (Ra) que a segunda (Rb), que é de mais difícil decomposição (recalcitrante).

A escolha do tipo de modelo que melhor se ajustou a cada conjunto de dados foi feita com base na significância dos parâmetros da equação (“A” e “Ra”) e no coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), o qual indica o grau de associação entre os valores observados e o modelo ajustado.

#### 4.5. Análise estatística

Todos os dados foram analisados utilizando o software R ([RSTUDIO, 2020](#)). A normalidade dos dados foi testada com teste de Shapiro-Wilk, apropriado para tamanhos amostrais pequenos. Os dados que não apresentaram normalidade foram transformados utilizando-se a transformação 1/X. Para se determinar a influência dos

fatores estudados, foi utilizada análise de variância seguido do teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

Além disto, para compreensão do efeito do tempo sobre os valores de biomassa foliar senescida remanescente (BF), taxa de decomposição (R) e valores de nutrientes remanescentes, quando não houve influência significativa do acesso, realizou-se a análise em esquema fatorial 3 x 5, com posterior análise de regressão em que o primeiro fator correspondeu ao sistema de exploração e o segundo fator correspondeu ao tempo de contato da biomassa com o solo. As figuras foram produzidas com o programa SigmaPlot, versão 12.5 para Windows.

## 5 RESULTADOS

### 5.1. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e energia potencial (EP) da biomassa foliar senescida de macaúba (Biomassa)

A intensidade de acúmulo de biomassa foliar senescida (Biomassa) diferiu significativamente ( $p < 0,05$ ) entre sistemas de exploração, independentemente do acesso estudado ([Tabela 2](#)).

Por outro lado, os valores de PCS e PCI não variaram significativamente entre os sistemas de exploração, independentemente do acesso analisado ([Tabela 2](#)), os quais se situaram na média de  $19,2 \text{ GJ t}^{-1}$  e  $16,3 \text{ GJ t}^{-1}$ , respectivamente.

**Tabela 2** - Resumo das análises de variância para poder calorífico superior (PCS) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ), poder calorífico inferior (PCI) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ) e energia potencial (EP) ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) e biomassa foliar senescida de macaúba (Biomassa) em função dos diferentes acessos de macaúba e sistemas de exploração

FV <sup>(1)</sup>	Quadrados Médios				
	GL <sup>(2)</sup>	PCS	PCI	EP	Biomassa
		( $\text{GJ t}^{-1}$ )	( $\text{GJ t}^{-1}$ )	( $\text{GJ ha}^{-1}$ )	( $\text{t ha}^{-1}$ )
Bloco <sup>(3)</sup>	3	0,07	0,34	775,00	4,530
Acesso (A) <sup>(4)</sup>	1	0,79	0,79	212,00	2,903
Sistema (B) <sup>(5)</sup>	2	0,40	0,40	6351,00**	12,82**
A x B <sup>(6)</sup>	2	0,08	0,08	1876,00	3,71
Res (AxB) <sup>(7)</sup>	15	0,22	0,22	731,00	1,85
CV (%) <sup>(8)</sup>		2,4	2,4	30,70	28,9

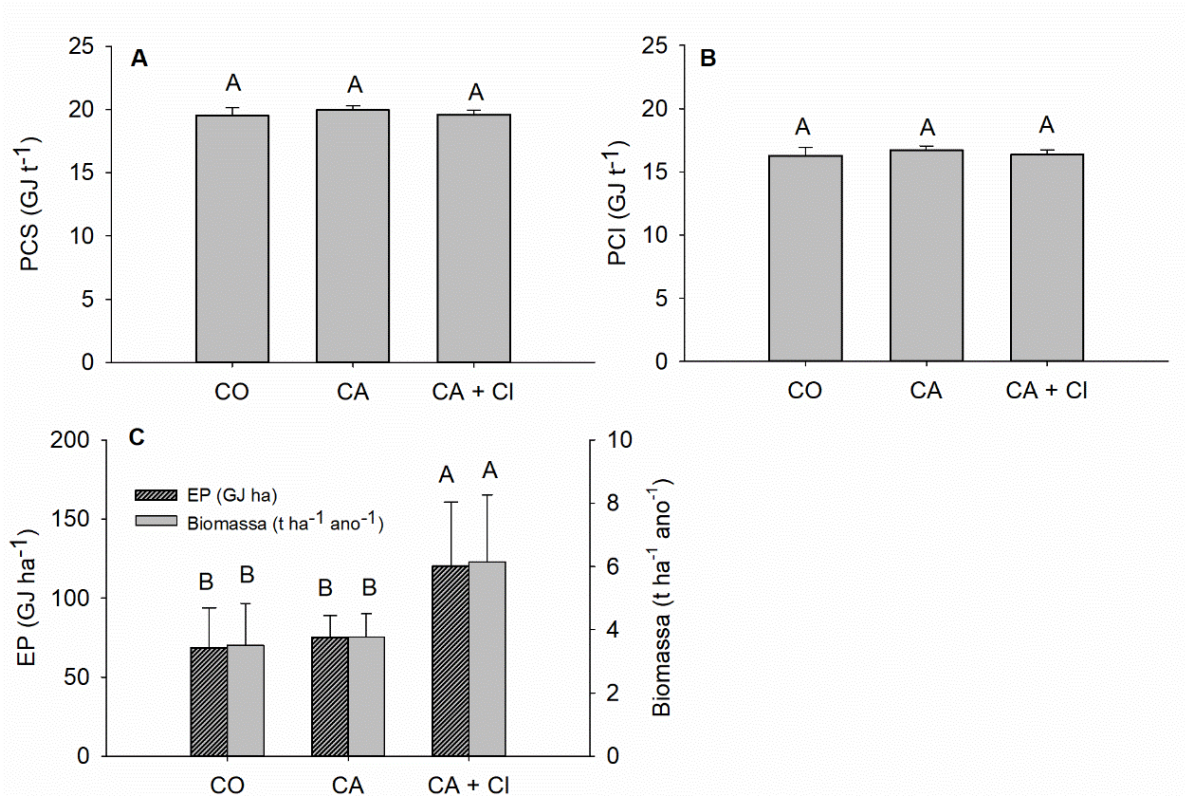
\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, <sup>(1)</sup> refere-se aos fatores de variação estudados na análise de variância fatorial; <sup>(2)</sup> refere-se ao grau ou graus de liberdade dos fatores de variação; <sup>(3)</sup> Blocos; <sup>(4)</sup> Diferentes acessos testados (acesso do Planalto Central Brasileiro e acesso do Sudeste Brasileiro); <sup>(5)</sup> diferentes sistemas de exploração da macaúba; <sup>(6)</sup> interação entre os diferentes acessos e sistemas de exploração; <sup>(7)</sup> refere-se ao resíduo da interação entre os acessos e os sistemas de exploração testados; <sup>(8)</sup> coeficiente de variação. Fonte: autor

Observou-se que o sistema de exploração intensivo de macaúba (CA + CI) resultou em maior ( $p < 0,05$ ) quantidade de biomassa foliar senescida acumulada ([Figura 4C](#)) em comparação aos demais sistemas de exploração.

Além disso, foi possível notar que o sistema de exploração semi-intensivo (CA) e o extrativista (CO) tiveram acúmulos semelhantes de biomassa foliar senescida, ambos, em média, 40% menor que o sistema de exploração intensiva (CA + CI) ([Figura 4C](#)).

O rendimento energético (EP), em razão de ser o produto da multiplicação entre PCS e quantidade de biomassa foliar senescida (Biomassa) ([Equação 2](#)), diferiu entre os sistemas de exploração ( $p < 0,05$ ) ([Tabela 2](#)), ocasião em que o sistema de exploração intensivo de macaúba atingiu rendimento energético por unidade de área 72% superior ao sistema semi-intensivo e extrativista ([Figura 4C](#)).

**Figura 4** - Poder calorífico superior (PCS) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ) (A), poder calorífico inferior (PCI) ( $\text{GJ t}^{-1}$ ) (B) e rendimento energético (EP) ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) comparado com a quantidade de biomassa foliar senescida (Biomassa) ( $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) (C) em função dos diferentes sistemas de exploração de macaúba (sistema intensivo de exploração (CA + CI), sistema semi-intensivo (CA) e sistema extrativista (CO)). Barras com a mesma tonalidade acompanhadas por letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ )



Fonte: o autor.

## 5.2. Composição elementar CNH e análise química imediata

Em relação aos componentes elementares CNH, verificou-se que os teores de C, H, N e as relações C/H e C/N não foram afetadas nem pelas origens dos acessos e nem pelo tipo de exploração testado ([Tabela 3](#); [Figuras 5A](#), [5B](#), [5C](#), [5D](#), [5E](#)).

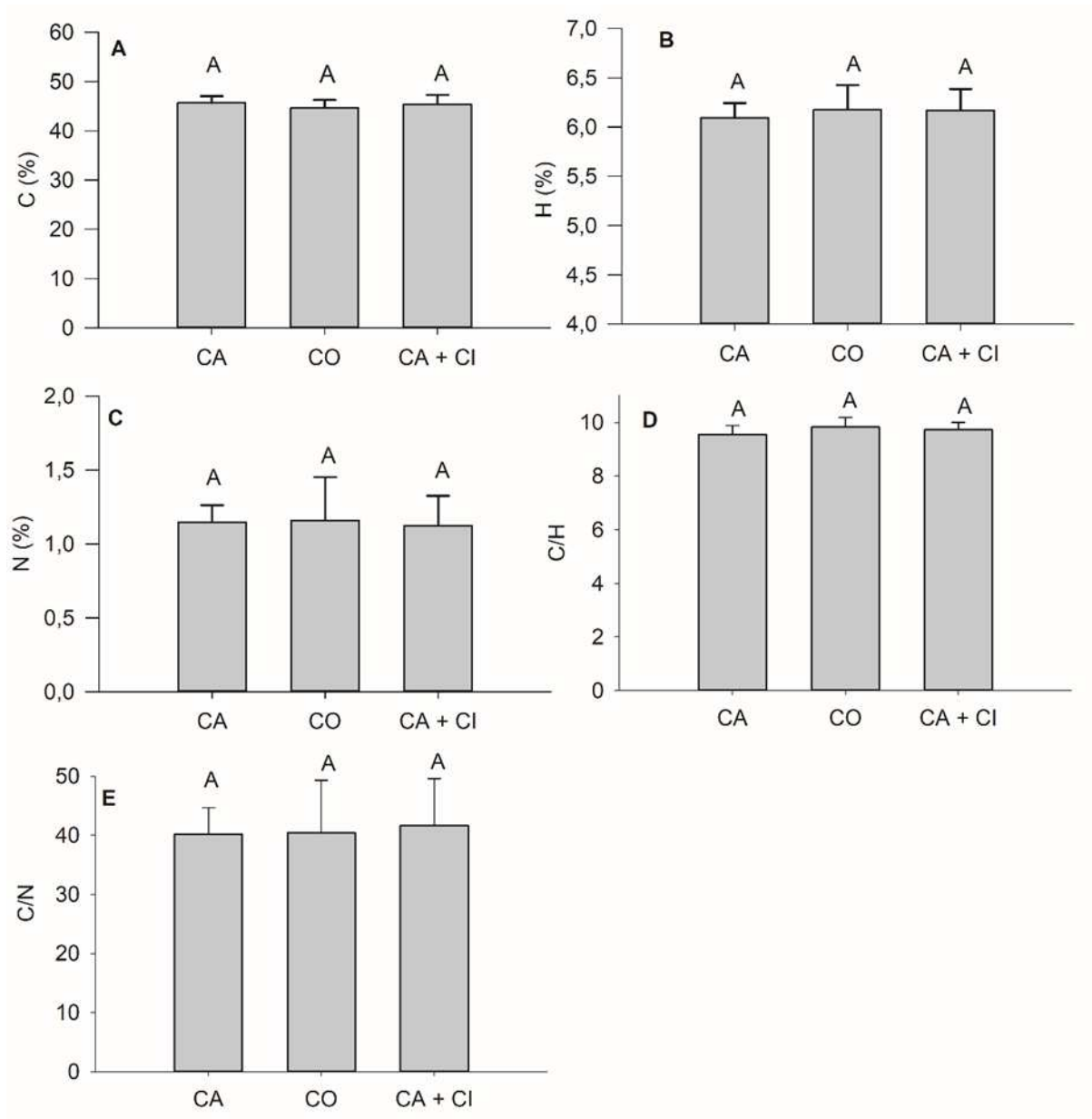


**Tabela 3** - Resumo das análises de variância para a composição elementar de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), relação entre carbono e hidrogênio (C/H); relação entre carbono e nitrogênio (C/N) das folhas senescida de macaúba em função dos diferentes acessos e sistemas de exploração de macaúba

FV <sup>(1)</sup>	Quadrados Médios					
	GL <sup>(2)</sup>	C	H	N	C/H	C/N
Bloco <sup>(3)</sup>	3	4,77	0,04	0,07	95,92	61,87
Acesso (A) <sup>(4)</sup>	1	4,27	0,00	0,04	2375,55	91,36
Sistema (B) <sup>(5)</sup>	2	2,26	0,01	0,00	126,53	838,88
A x B <sup>(6)</sup>	2	4,86	0,10	0,06	46,88	79,44
Res (A x B) <sup>(7)</sup>	15	1,83	0,03	0,03	49,64	48,21
CV (%) <sup>(8)</sup>		2,9	3,1	17,0	3,0	15,9

\*significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, <sup>(1)</sup> refere-se aos fatores de variação estudados na análise de variância fatorial; <sup>(2)</sup> refere-se ao grau ou graus de liberdade dos fatores de variação; <sup>(3)</sup> Blocos; <sup>(4)</sup> Diferentes acessos testados (acesso do Planalto Central Brasileiro e acesso do Sudeste Brasileiro); <sup>(5)</sup> diferentes sistemas de exploração de macaúba; <sup>(6)</sup> interação entre os diferentes acessos testados e os diferentes sistemas de exploração; <sup>(7)</sup> refere-se ao resíduo da interação entre os acessos testados e os distintos sistemas de exploração; <sup>(8)</sup> coeficiente de variação. Fonte: o autor.

**Figura 5** - Teor de carbono (C) (A) (%), hidrogênio (H) (B) (%), nitrogênio (N) (C) (%) e relação C/H (D) e C/N (E) em função dos distintos sistemas de exploração de macaúba



Fonte: o autor.

Em relação aos resultados da análise química imediata, observou-se que os percentuais de componentes voláteis se situaram em 73,60% (b.u) e 80,52 % (b.s), enquanto os percentuais de carbono fixo totalizaram 13,24 % (b.u) e 14,49 % (b.s). O percentual de cinzas da biomassa foliar senescida de situou-se em 4,56% (b.u) e 4,99 % (b.s).

### 5.3. Biomassa foliar senescida remanescente (BF), nutrientes remanescentes, taxa de decomposição (K), tempo de meia-vida ( $T_{1/2}$ ) e restituição/reciclagem de nutrientes

Notou-se que o sistema de exploração da macaúba afetou significativamente ( $p < 0,05$ ) o índice de decomposição (R), principalmente nos primeiros 180 dias de permanência da biomassa em contato com o solo (constatações realizadas em T0, T1 e T2) ([Tabela 4](#); [Figuras 6A](#), [6B](#), [6C](#)).

**Tabela 4** - Resumo de análise de variância para a biomassa foliar senescida remanescente de macaúba aos 90, 180, 270 e 360 em função dos diferentes acessos e sistemas de exploração de macaúba

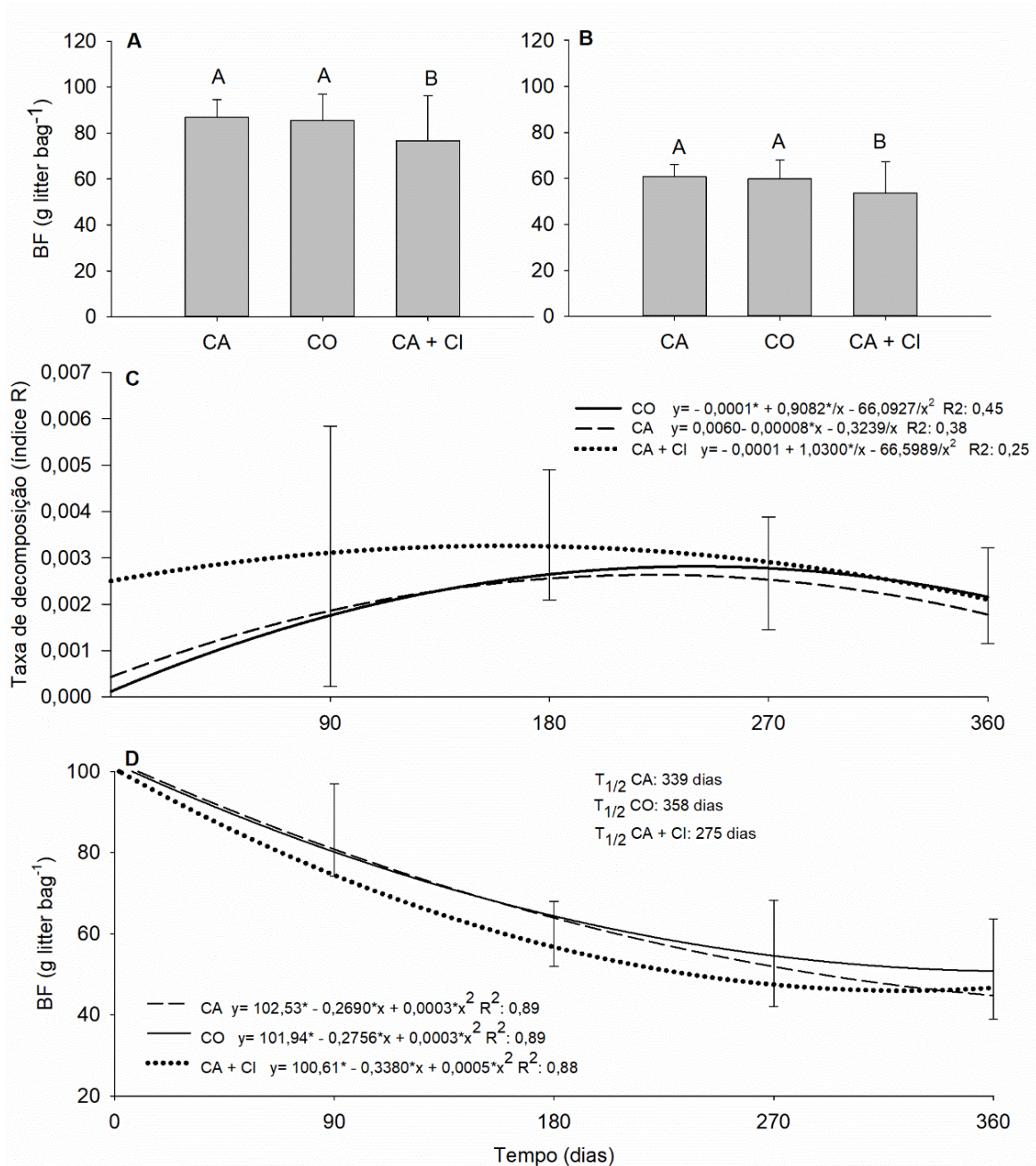
FV <sup>(1)</sup>	Quadrados Médios				
	GL <sup>(2)</sup>	T1	T2	T3	T4
Bloco	3	18,23	8,92	56,72	85,94
Acesso (A) <sup>(3)</sup>	1	34,27	16,76	88,16	73,50
Sistema (B) <sup>(4)</sup>	2	246,39*	120,60*	83,29	66,67
A x B <sup>(5)</sup>	2	1,74	0,92	10,29	2,00
Res (A x B) <sup>(6)</sup>	15	59,96	29,40	80,16	72,88
CV (%) <sup>(7)</sup>		9,32	9,7	17,4	17,81

\*significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(1)</sup> refere-se aos fatores de variação estudados na análise de variância fatorial; <sup>(2)</sup> refere-se ao grau ou graus de liberdade dos fatores de variação; <sup>(3)</sup> Efeito do acesso; <sup>(4)</sup> Efeito do sistema de exploração; <sup>(5)</sup> interação entre os diferentes acessos e sistema de exploração; <sup>(6)</sup> refere-se ao resíduo da interação entre o acesso e sistema de exploração; <sup>(7)</sup> coeficiente de variação. Fonte: o autor.

Notou-se que, independentemente do acesso testado, o sistema de exploração intensivo de macaúba (CA + CI) apresentou maior taxa de decomposição (R) ( $p < 0,05$ ) nos primeiros 180 dias em comparação com os demais sistemas de exploração ([Figura 6C](#)).

Em consequência disso, foi possível observar que, em média, o sistema de exploração intensivo (CA + CI) reduziu o tempo necessário para decomposição de metade da biomassa foliar senescida ( $T_{1/2}$ ) em 64 dias, ou seja, uma redução de cerca de 21% do tempo necessário, quando comparado aos demais sistemas de exploração ([Figura 6D](#)). O sistema semi-intensivo, por sua vez, apresentou taxa de decomposição (R) semelhante ao sistema extrativista, com apenas 19 dias a menos, ou 5% de redução no tempo de meia vida ( $T_{1/2}$ ) ([Figura 6D](#)).

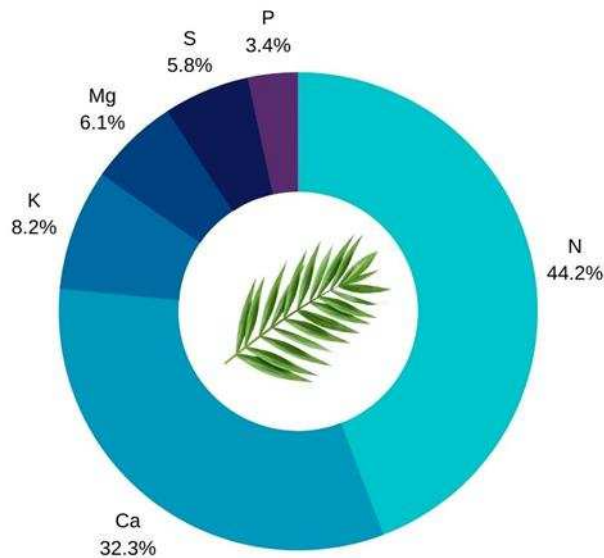
**Figura 6** - Biomassa foliar senescida remanescente (BF) de palmeiras macaúba aos 90 dias (A) e aos 180 dias (B); análise de regressão para a taxa de decomposição (índice R) (C) e análise de regressão para biomassa foliar senescida remanescente (D) para cada distinto sistema de exploração de macaúba (sistema intensivo (CA + CI); sistema semi-intensivo (CA) e sistema extrativista (CO)). \*significativo ao nível de 5% de probabilidade



Fonte: o autor.

Em relação aos valores remanescentes de nutrientes, notou-se que dentre os macronutrientes, o N e o Ca são aqueles com maior concentração percentual na biomassa foliar senescida, com 44,2% e 32,3%, respectivamente (Figura 7).

**Figura 7** - Participação percentual média dos macronutrientes na biomassa foliar senescida de macaúba aos cinco anos de idade



Fonte: o autor

Os resultados indicaram ainda que o tempo de permanência da biomassa foliar senescida em contato com o solo, independente do sistema de exploração e do acesso estudado, foi o único fator que interagiu significativamente ( $p < 0,05$ ) com a quantidade de nutrientes remanescentes ([Tabela 5](#)).

Do teor inicial de 12 gramas de N por kg de biomassa foliar senescida observada em T0, verificou-se que aos 360 dias, este teor foi reduzido pela metade ( $6 \text{ g kg}^{-1}$  de N) ([Figura 8A](#)), o que indicou uma constante invariante de liberação de  $0,0018 \text{ dia}^{-1}$ .

Em relação aos nutrientes P e K, verificou-se que a constante invariante de liberação foi de  $0,0029 \text{ dia}^{-1}$  e  $0,0023 \text{ dia}^{-1}$ , respectivamente, ou seja, valores superiores àqueles do N. Além disso, observou-se que 50% da quantidade inicial destes nutrientes já haviam sido liberados da biomassa aos 240 e 300 dias de contato com o solo, respectivamente ([Figuras 8B e 8C](#)).

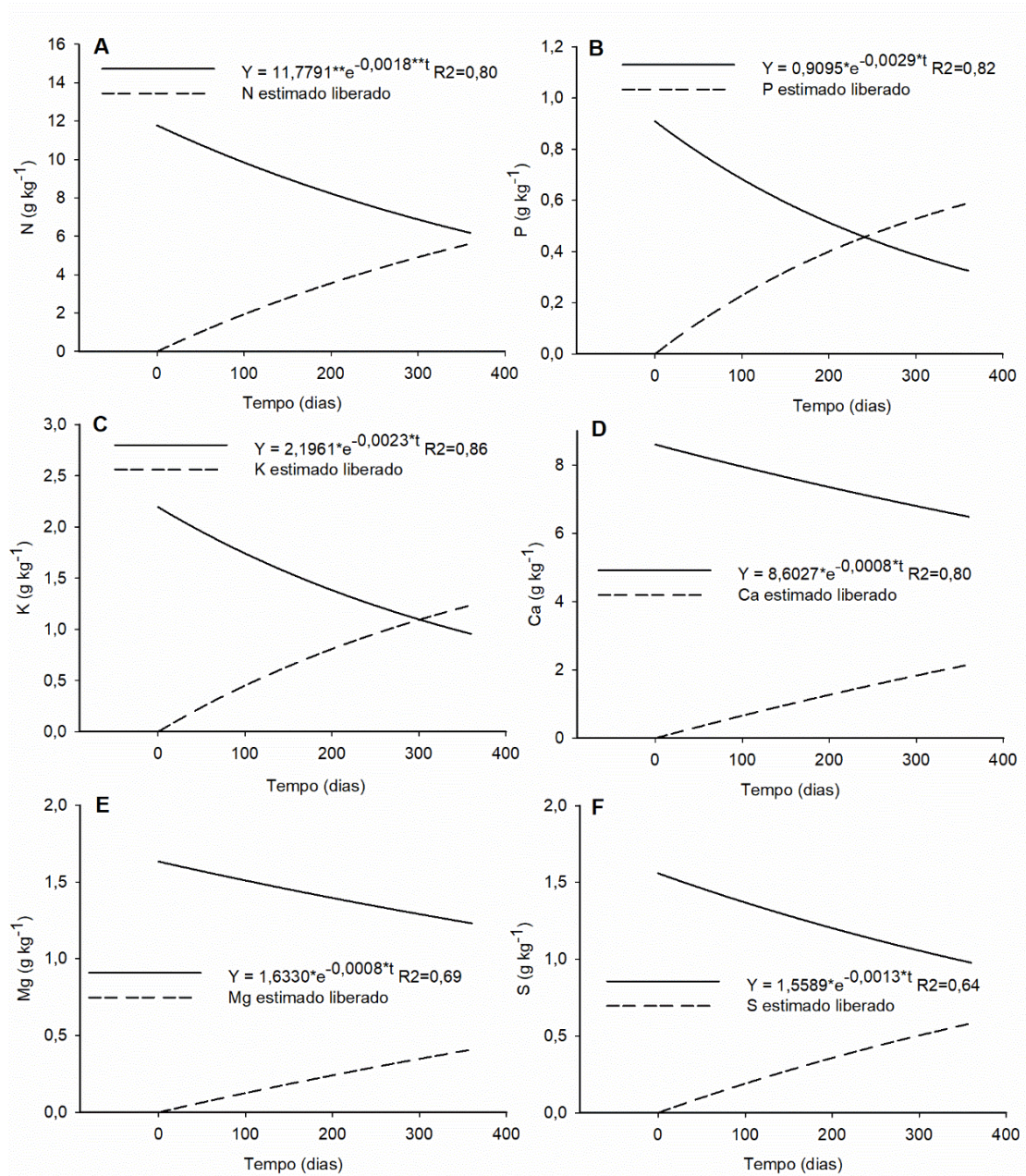
Por sua vez, as constantes invariantes de liberação de Ca e Mg foram semelhantes, situando-se em torno de  $0,0008 \text{ dia}^{-1}$  enquanto a do S alcançou  $0,0013 \text{ dia}^{-1}$ , porém, notou-se que mesmo após 360 dias de permanência da biomassa sob o solo, apenas 30% da quantidade inicialmente acumulada de Ca e Mg na biomassa havia sido liberada ([Figuras 8D e 8E](#)) e aproximadamente 40%, no caso do S ([Figura 8F](#)).

**Tabela 5** - Resumo das análises de variância para os valores remanescentes de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Mn e C ao longo de 360 dias da biomassa foliar senescida de diferentes acessos de macaúba cultivados sob distintos sistemas de exploração, sob clima tropical

FV <sup>(1)</sup>	Quadrados Médios										
	GL <sup>(2)</sup>	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Mn	C
		g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
Bloco <sup>(3)</sup>	3	2,52	0,08	0,08	2,15	0,23	1,23	0,84	388,00	168,00	320,00
Acesso (A) <sup>(4)</sup>	1	3,54	0,06	1,08	5,46	0,19	4,56	2,92	9882,00	587,00	239,00
Sistema (B) <sup>(5)</sup>	2	4,93	0,04	1,89	1,32	1,15	6,42	2,46	252,00	2442,00	549,00
Tempo (C) <sup>(6)</sup>	4	156,61**	1,67**	9,55**	15,13**	0,73**	8,37**	65,56**	22383,00**	6290,00**	17695,00**
A:B <sup>(7)</sup>	2	9,19	0,08	1,01	2,47	0,30	5,01	0,20	321,00	472,00	3992
A:C <sup>(8)</sup>	4	2,36	0,01	0,11	0,56	0,05	3,02	1,74	2339,00	157,00	3173
B:C <sup>(9)</sup>	8	3,24	0,01	0,934	2,27	0,36	3,18	0,55	367,00	259,00	1342,00
A:B:C <sup>(10)</sup>	8	2,39	0,07	0,65	0,55	0,08	4,46	0,15	233,00	209,00	1184,00
Resíduo <sup>(11)</sup>	87	2,67	0,03	0,42	1,59	0,06	1,76	0,63	961,00	195,00	1156,00
CV (%) <sup>(12)</sup>		0,31	0,51	0,56	0,19	0,25	1,09	0,59	1,21	0,28	0,08

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, <sup>(1)</sup> refere-se aos fatores de variação estudados na análise de variância fatorial; <sup>(2)</sup> graus de liberdade dos fatores de variação; <sup>(3)</sup> Efeito da blocagem; <sup>(4)</sup> efeito do acesso; <sup>(5)</sup> efeito do sistema de exploração; <sup>(6)</sup> efeito do tempo sobre a biomassa, <sup>(7)</sup> interação entre acesso e sistema de exploração; <sup>(8)</sup> interação entre acesso e tempo de decomposição da biomassa foliar senescida sob o solo; <sup>(9)</sup> interação entre sistema de exploração e tempo de permanência da biomassa sob o solo, <sup>(10)</sup> interação entre acesso, sistema de exploração e tempo de permanência da biomassa sob o solo, <sup>(11)</sup> resíduo estatístico e <sup>(12)</sup> coeficiente de variação da amostra. Fonte: o autor.

**Figura 8** - Valores remanescentes e liberação estimada de N (A), P (B), K (C), Ca (D), Mg (E), S (F) da biomassa foliar senescida de macaúba ao longo de 360 dias de observação. \*significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade

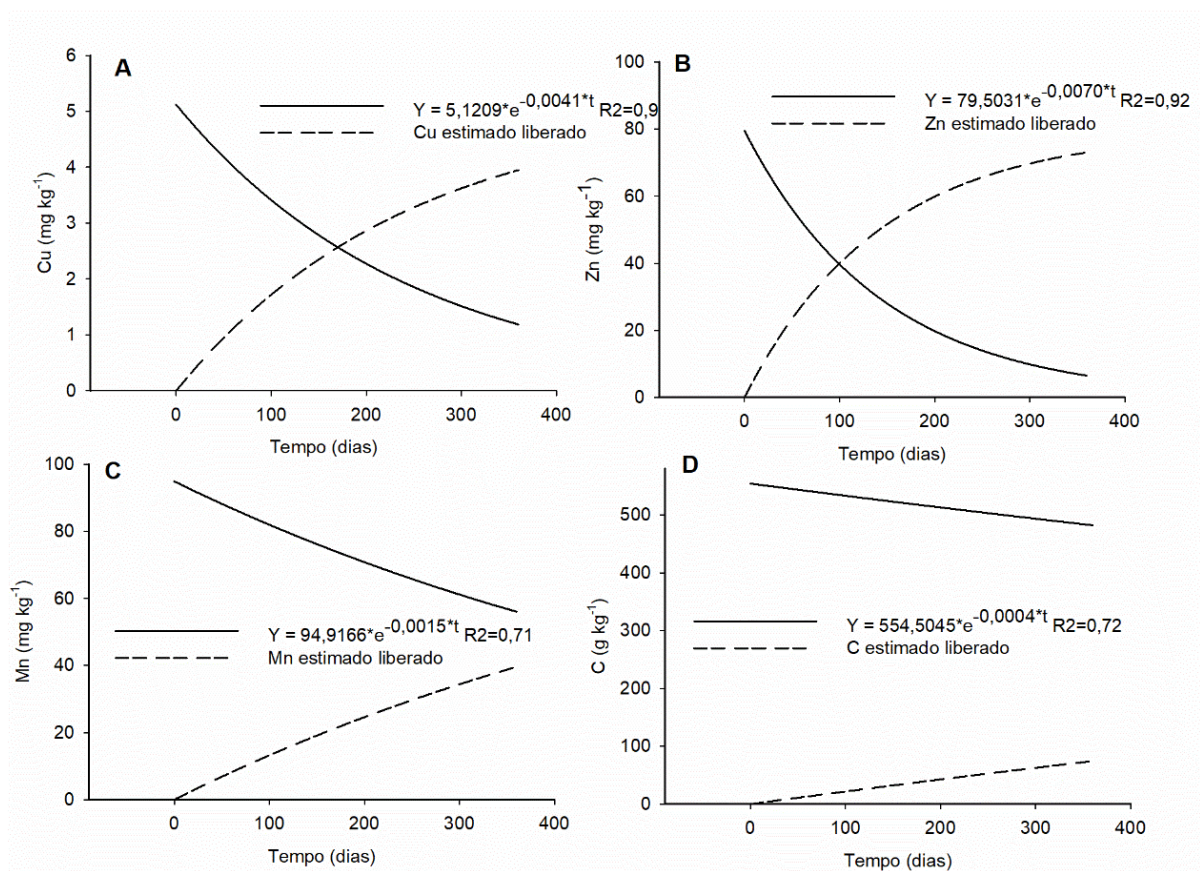


Fonte: o autor.

Para os micronutrientes Cu e Zn, as constantes invariantes de liberação foram altas, alcançando 0,0041 dia<sup>-1</sup> e 0,0070 dia<sup>-1</sup>, respectivamente (Figuras 9A e 9B). Estas altas constantes de liberação resultaram em 50% da quantidade de Cu já liberada da biomassa aos 160 dias de contato, e aos 100 dias, no caso do Zn (Figuras 9A e 9B).

Em relação aos valores remanescentes de Mn e C, notou-se que a constante de liberação foi de  $0,0015 \text{ dia}^{-1}$  e  $0,0004 \text{ dia}^{-1}$ , respectivamente (Figuras 9C e 9D) e que resultou em tempos de meia vida de 463 dias e 1330 dias, respectivamente (Figura 9D). Ou seja, a liberação do C das macromoléculas orgânicas da biomassa foliar senescida de macaúba exigiu cerca de 3,6 anos (Figura 9D), o que indicou serem componentes de liberação mais lenta que os demais elementos.

**Figura 9** - Valores remanescentes e liberação estimada de Cu (A), Zn (B), Mn (C) e C (D) da biomassa foliar senescida de macaúba ao longo de 360 dias de observação. \*significativo ao nível de 5% de probabilidade



Fonte: o autor.

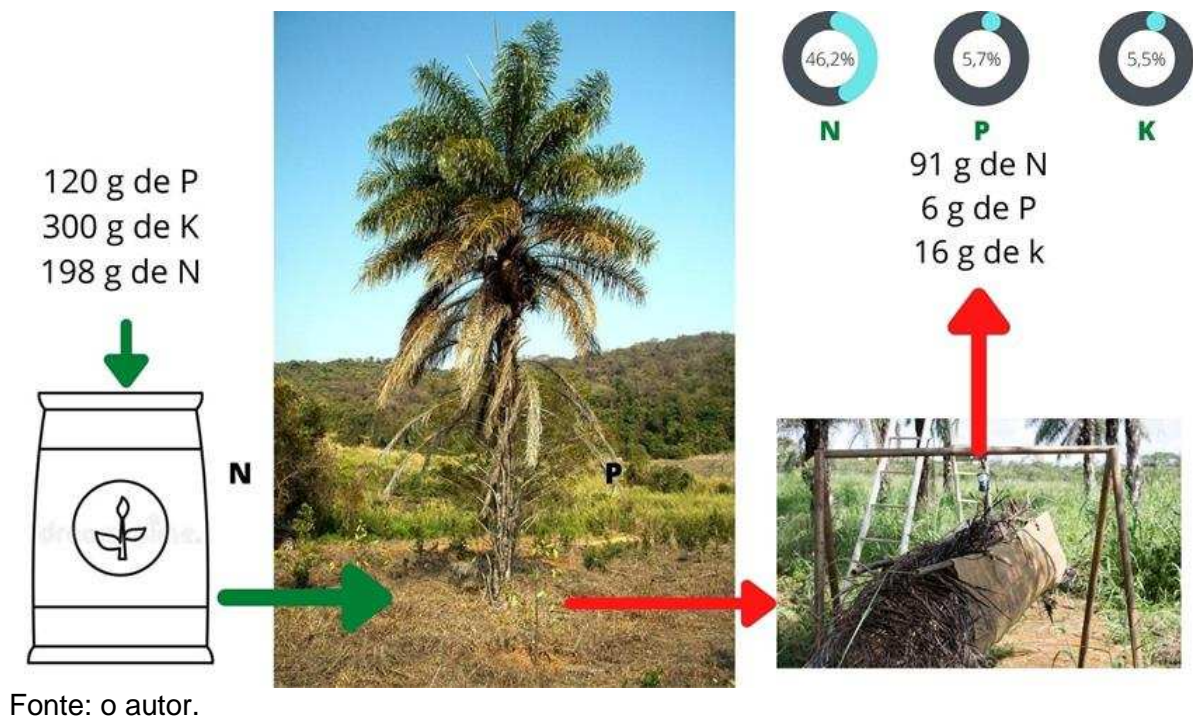
Nesse contexto, sabendo-se que de acordo com [Pimentel et al. \(2011\)](#), a exigência de N em macaúbas em idade reprodutiva situa-se na faixa de  $198 \text{ g planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , notou-se que a biomassa foliar senescida de macaúba, quando mantida sob o solo, tem a capacidade de reciclar cerca de  $91 \text{ g planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , ou 46,2% do N recomendado (Figura 10), independentemente do sistema de exploração.



Em relação ao P e K, verificou-se que a constante invariante de liberação foi de  $0,0029 \text{ dia}^{-1}$  e  $0,0023 \text{ dia}^{-1}$ , respectivamente, ou seja, valores superiores àqueles do N.

Além disso, observou-se aos 240 e 300 dias de contato com o solo, 50% do valor de P e K, respectivamente, já foram liberados ao solo pela biomassa foliar senescida de macaúba, o que representa 5,7% do P e 5,5% do K recomendado anualmente para a cultura ([Figura 10](#)), nos termos da recomendação de [Pimentel et al. \(2011\)](#).

**Figura 10** - Relação entre quantidade de macronutrientes primários NPK fornecidos ao quinto ano de idade das macaúbas ( $\text{g pl}^{-1}$ ) e a quantidade remanescente destes nutrientes na biomassa foliar senescida ( $\text{g pl}^{-1}$ )



## 6 DISCUSSÃO

O acúmulo de biomassa foliar senescida identificado no sistema intensivo de exploração de macaúba (submetido a adubação e irrigação), o qual acumulou 72% a mais de biomassa foliar senescida que os demais sistemas de exploração ([Figura 4C](#)), permitiu perceber o impacto que o uso de irrigação representa sobre a senescência foliar em macaúba e reforça as conclusões de [Motta et al. \(2002\)](#), [Bhering et al. \(2010\)](#) e [Pimentel et al. \(2011\)](#), os quais concluíram que embora a macaúba possua adaptabilidade aos diversos sistemas de exploração, é muito responsiva às propriedades físico-químicas do solo.

Contudo, os resultados do poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) não foram influenciados pelo sistema de exploração e pela origem dos acessos (média de 19,2 GJ t<sup>-1</sup> de PCS e 16,3 GJ t<sup>-1</sup> de PCI), respectivamente. Esses valores são semelhantes àqueles obtidos com o bagaço da cana de açúcar ([Tabela 6](#)), a qual tem seu uso consolidado na indústria sucroalcooleira ([STICKLEN, 2008](#); [SANTOS, BORÉM & CALDAS, 2018](#); [PAULA et al., 2011](#)).

**Tabela 6** - Comparativo do poder calorífico superior (PCS) (GJ t<sup>-1</sup>), inferior (PCI) (GJ t<sup>-1</sup>) e da energia potencial (EP) (GJ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) da biomassa foliar senescida de macaúbas cultivadas em ambiente com alta disponibilidade hídrica e nutricional e da biomassa foliar senescida de macaúbas cultivadas em ambiente restritivo em comparação com o bagaço da cana de açúcar

Variável	Biomassa foliar de macaúba			Bagaço de cana de açúcar
	Sistema intensivo	Semi-intensivo	Extrativista	
PCS (GJ t <sup>-1</sup> )	-----19,2-----			17,0*
PCI (GJ t <sup>-1</sup> )	-----16,3-----			16,2*
EP (GJ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	121	72	65	425,9*

\* Resultados obtidos dos trabalhos de [Sticklen \(2008\)](#), [Santos, Borém & Caldas \(2018\)](#) e [Paula et al. \(2011\)](#). Fonte: o autor.

Além disso, os resultados apresentados em relação a PCS e PCI são superiores aos obtidos por outras biomassas residuais agrícolas e florestais comumente utilizados para geração de energia, como casca de arroz, gramíneas e serragem ([GISSÉN et al., 2014](#); [PAULA et al., 2011](#); [VILAS BOAS et al., 2010](#)) ([Tabela 7](#)).

Dessa forma, foi possível notar que o sistema intensivo de produção de macaúba permite alcançar até  $121 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de rendimento energético na queima direta do material bruto (EP) (cultivo com 400 plantas por hectare) ([Figuras 4C e 4D](#)), resultado que se aproxima a 28,3% do valor atualmente alcançado pela indústria com o bagaço da cana de açúcar ([Tabela 6](#)). Isso revela a existência de potencial para exploração energética dessa biomassa neste sistema de exploração, inclusive como forma de reduzir os custos com a irrigação.

Por outro lado, a ausência de irrigação no sistema semi-intensivo (CA), e ausência de irrigação e adubação no sistema extrativista (CO) resultaram em menores rendimentos energéticos (iguais estatisticamente) ( $72 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e  $65 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente) ([Figura 4C](#)), os quais representam o equivalente a 16% e 15%, respectivamente, em relação ao apresentado por cana de açúcar ([Tabela 6](#)).

Os valores de CHN, suas relações e o teor de cinzas indicaram que a biomassa foliar senescida de macaúba possui características semelhantes às aquelas apresentadas pelo bagaço da cana de açúcar ([GISSÉN \*et al.\*, 2014](#); [PAULA \*et al.\*, 2011](#); [VILAS BOAS \*et al.\*, 2010](#)), inclusive em relação ao percentual de cinzas da queima, componentes voláteis e carbono fixado ([Tabela 7](#); [Tabela 8](#)) e também revelou que estas características não são alteradas pelo tipo de manejo adotado ([Tabela 3](#)).

Vale ressaltar que a cana-de-açúcar é uma cultura bem domesticada, com técnicas de cultivo que foram aprimoradas ao longo dos séculos de exploração. Por outro lado, a macaúba é uma cultura ainda não totalmente conhecida e a sua biomassa foliar senescida, antes deste trabalho, não tinha seu potencial caracterizado e, com isso, era subutilizado ou até mesmo descartado. Agora, porém, poderá vir a ser incorporado na matriz energética.

Nesse contexto, métodos de coleta, transporte, compactação, como peletização e briquetagem, por exemplo, podem viabilizar sua utilização na geração de energia ([USLU, FAAIJ & BERGMAN, 2008](#)). Além disso, este trabalho abre caminho para estudos subsequentes que podem analisar outros métodos de exploração do potencial energético dessa biomassa que não apenas através da queima direta.

**Tabela 7** - Valores de referência para a análise imediata e poder calorífico dos resíduos avaliados em comparação com os valores obtidos da biomassa foliar senescida de macaúba

Biomassa	Componente	Voláteis	Carbono fixado	PCS	Referência
		(%)	(%)	(GJ t <sup>-1</sup> )	
Arroz	Casca do grão	64,3	11,9	-	<a href="#">Souza et al. (2005)</a>
		65,47	16,67	16,13	<a href="#">Jenkins (1990)</a>
		-	-	16,36	<a href="#">Diniz et al. (2004)</a>
Cana de Açúcar	Bagaço	73,78	14,95	17,33	<a href="#">Jenkins (1990)</a>
		69,39	16,1	-	<a href="#">Seye, Cortez &amp; Gómez (2003)</a>
	Palha	66,4	16,35	-	
Madeira	Eucalipto	74,10 a 89,90	9,60 a 24,30	-	<a href="#">Juizo et al. (2017)</a>
	Madeira seca	-	-	18,42	<a href="#">Brito (1993)</a>
Milho	Caule + Folha	80,1	13,1	16,57	<a href="#">Raveendran, Ganesh &amp; Khilar (1995)</a>
	Sabugo	85,4	11,8	15,68	
		80,1	18,54	18,83	<a href="#">Jenkins (1990)</a>
	Palha			15,62	<a href="#">Quirino et al. (2005)</a>
Soja	Vagem	63,5	27,7	-	<a href="#">Silva et al. (2008)</a>
Macaúba	Biomassa foliar senescida	73,60	13,24	19,20	Próprio autor

Fonte: o autor.

**Tabela 8** - Valores de referência para a análise elementar de diversas biomassas utilizadas na agroenergia em comparação com os valores obtidos da biomassa foliar senescida de macaúba

Material	Componente	C <sup>(1)</sup>	H	N <sup>(1)</sup>	C/H	C/N	Cinzas	Referência
		(%)					(%)	
Arroz	Casca do grão	40,96	4,30	0,40	9,53	102,40	16,43	<a href="#">Jenkins (1990)</a>
Café	Pergaminho	44,00	5,40	0,70	8,15	62,86	1,46	<a href="#">Brum et al. (2008)</a>
Cana de Açúcar	Bagaço	46,70	5,90	0,90	7,92	51,89	0,80	<a href="#">Seye, Cortez &amp; Gómez (2003)</a>
	Palha	43,42	5,71	1,23	7,60	35,30	4,32	
Feijão	Palha	41,50	5,90	0,60	7,03	69,17	4,60	<a href="#">Oliveira (2009)</a>
Madeira	Resíduo	48,06	6,03	0,70	7,97	68,66	0,15	<a href="#">Seye, Cortez &amp; Gómez (2003)</a>
Milho	Caule + folha	41,90	5,30	0,00	7,91	-	3,48	<a href="#">Raveendran, Ganesh &amp; Khilar (1995)</a>
	Sabugo	47,60	5,00	0,00	9,52	-	1,16	
	Palha	45,80	4,50	0,75	10,18	61,07	1,58	<a href="#">Bianchi (1995)</a>
Macaúba	Biomassa foliar senescida	45,21	6,13	1,15	7,37	39,31	4,56	Próprio autor

C = carbono solúvel em água; N = nitrogênio solúvel em água. Fonte: o autor.

Estes resultados, assim, indicaram que a biomassa foliar senescida de macaúba possui potencial para utilização na cogeração de energia, sobretudo em sistemas intensivos (CA + CI), dada a alta produção de biomassa anualmente e ao fato de que biomassas com altas concentrações de carbono fixo são adequadas para combustão direta, incineração e produção de carvão vegetal ([VILAS BOAS \*et al.\*, 2010](#)).

Em relação ao fato de o Ca e o N terem sido os macronutrientes com maior participação percentual na biomassa foliar senescida de macaúba ([Figura 7](#)), [Ouvrier \(1984\)](#), [Viégas & Botelho \(2000\)](#) e [Corley & Tinker \(2003\)](#), explicam que isso e deve ao fato de que o N e o Ca estão, nesta ordem, entre os nutrientes mais absorvidos em palmáceas.

Além disso, o trabalho de [Perron \*et al.\* \(2021\)](#) confirma que o Ca é um nutriente essencialmente utilizado na constituição da lamela média da parede vegetal (pouca mobilidade na planta), o N um dos principais constituintes estruturais e o K e Cl utilizados preponderantemente nos órgãos reprodutivos, explicando a grande percentagem de Ca e N na biomassa foliar senescida.

O ponto negativo desta característica e que pode influenciar a utilização da biomassa foliar senescida de macaúba na queima desse resíduo na indústria energética é que a alta quantidade de N aumenta a predisposição da queima em formar óxidos de nitrogênio tóxicos e ácido nítrico que são indesejáveis nesse tipo de matéria prima quando se deseja aproveitá-las na indústria da queima energética ([MUNALULA & MEINCKEN, 2009](#)).

Por outro lado, a grande quantidade deste nutriente é extremamente vantajosa quando se considera o potencial de utilização da biomassa como fonte de restituição/reciclagem de nutrientes ao solo, visto que os dados revelaram potencial de reciclar anualmente até 46,2% da quantidade anual recomendada, conforme recomendação de adubação de [Pimentel \*et al.\* \(2011\)](#).

Além disso, considerando as quantidades recomendadas por [Pimentel \*et al.\* \(2011\)](#), os resultados deste trabalho revelaram que a biomassa foliar senescida de macaúba tem potencial para reciclar até 5,7% de P e 5,5% de K em ambientes de exploração intensivo de macaúba.

As palmáceas, em geral, apresentam elevada demanda de fertilização, ocasião em que o N e o Ca estão entre os mais exigidos ([OUVRIER, 1984](#); [VIÉGAS & BOTELHO, 2000](#); [CORLEY & TINKER, 2003](#)).

Em relação ao ritmo de degradação da biomassa foliar senescida de macaúba sobre o solo, notou-se que, em conduções naturais, se consuma na forma quadrática ([Figuras 6C e 6D](#)), caracterizando-se por uma taxa crescente na taxa de decomposição nos primeiros 180 dias, uma estabilização entre 180 e 270 dias e um declínio nessa taxa após aos 270 dias de contato da biomassa com o solo ([Figura 6C](#)).

Entre as razões que podem explicar o motivo de sistemas intensivos de exploração de macaúba (CA + CI) apresentarem maiores intensidades de decomposição nos primeiros 180 dias ([Figura 6C](#)), destaca-se o fato dessas parcelas serem aquelas com umidade frequente em função da utilização da irrigação, que pode ter contribuído para intensificar a atividade biológica no solo ([LIANG \*et al.\*, 2017](#)).

Além disso, não podem ser descartadas ainda as contribuições de [Freire \*et al.\* \(2010\)](#) e [Souto \*et al.\* \(2013\)](#) para os quais a maior concentração, na biomassa, de componentes como açúcares que são rapidamente metabolizados pelos microrganismos podem ter provocado a maior taxa de decomposição nos primeiros 180 dias para as parcelas com alta disponibilidade hídrica. Este debate ainda necessita de mais estudos tendo em vista o escasso número de trabalhos sobre o tema e com a biomassa foliar senescida de macaúba.

Portanto, este trabalho aponta potencial da biomassa foliar senescida de macaúba ser utilizada tanto como fonte energética, quanto como fonte de restituição de nutrientes. Contudo, os resultados indicaram maior aptidão para a exploração energética nos sistemas intensivos de exploração, conduzidos sob adubação e irrigação, enquanto para aproveitamento como fonte de restituição/reciclagem de nutrientes, todos os sistemas de exploração atuais possuem aptidão.

Em sistemas intensivos de exploração de macaúba, a partir deste trabalho, poderá ser analisada se existe uma relação entre quantidade de biomassa que deve ser mantida como fonte de restituição e quantidade que pode ser destinada à exploração energética, como atualmente vem se identificando em cana de açúcar.

O maior impasse, porém, no aproveitamento energético dessa biomassa reside ainda na dificuldade em identificar equipamentos aptos a serem utilizados para a coleta do material nas áreas produtoras.

Apesar dessas limitações tecnológicas para o recolhimento orientado, este estudo fornece subsídios para novos projetos que passem a realizar análises econômicas das aptidões apontadas, bem como identifiquem equipamentos que possam ser utilizados para recolhimento e beneficiamento dessa biomassa para melhor utilização deste potencial existente nas lavouras de modo a obter o melhor aproveitamento dessa biomassa, consolidando a exploração da macaúba entre aquelas com maior potencial de exploração agroenergético sustentável.



## 7 CONCLUSÕES

A biomassa foliar senescida de macaúba apresenta aptidão tanto para utilização como fonte agroenergética, quanto para servir como fonte de restituição/reciclagem mineral à camada superficial do solo.

Sistemas intensivos de cultivo de macaúba são aqueles com maior aptidão para exploração energética dessa biomassa e alcançam rendimento energético de até 121 GJ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (cultivo com 400 plantas por hectare), contudo, o rendimento financeiro da exploração deste potencial vai depender do custo de corte, carregamento e processamento dessa matéria prima na indústria.

Por outro lado, independentemente do sistema de cultivo (seja intensivo, semi-intensivo ou extrativista) a biomassa foliar senescida de macaúba pode ser utilizada como importante estratégia de reciclagem de nutrientes e aumento do teor de matéria orgânica no ambiente, visto que possui potencial para reciclar/restituir anualmente até 46,2%, 5,7% e 5,5% da quantidade acumulada de N, P e K, respectivamente.

## **8 AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## 9 REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11956: Coque: Determinação do poder calorífico superior**. Rio de Janeiro, 1990.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata**. Rio de Janeiro, 1983, 6 p.
- ANDREOTTI, M.; SORIA, J. E.; COSTA, N. R.; GAMEIRO, R. D. A.; REBONATTI, M. D. Nutrient accumulation and decomposition of sugar cane trash as a function of vinasse doses. **Bioscience Journal**, p. 563-576, 2015. <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n2a2015-22426>
- [ANTONINI, J.C.A.; VELOSO, R. F.; MALAQUIAS, J. V. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo na fase produtiva da palma de óleo \(\*Elaeis guineensis\* Jacq.\) nas condições de clima tropical de savana. \*\*Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento \(INFOTECA-E\) 325, Embrapa Cerrados, 2015. 22p.\*\*](#)
- [BASSOI, L. H.; FLORI, J. E.; SILVA, E. E. G.; SILVA, J. A. M. Manejo de irrigação da pupunheira para produção de palmito no Vale do São Francisco. Embrapa Semiárido-Comunicado Técnico \(INFOTECA-E\), 2002.](#)
- BERGMANN, J. C.; TUPINAMBÁ, D. D.; COSTA, O. Y. A.; ALMEIDA, J. R. M.; BARRETO, C. C.; QUIRINO, B. F. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 21, p. 411-420, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.058>
- [BHERING, L. L.; VILELA, M. D. F.; AQUINO, F. D. G.; LAVIOLA, B. G.; JUNQUEIRA, N. T. V.; CARGNIN, A. Mapeamento de maciços naturais de ocorrência de macaúba \(\*Acrocomia aculeata\*\) visando à exploração sustentável. In: Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, 1., 2010, João Pessoa. Anais... Inclusão social e energia. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010. p.143-148.](#)
- [BIANCHI, M. L. Polpação de palha de milho utilizando-se diferentes processos organosolos. Dissertação \(Mestrado em Química\) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas 1995, 76 p.](#)
- BICALHO, E. M.; ROSA, B. L.; SOUZA, A. E. D.; RIOS, C. O.; PEREIRA, E. G. Do the structures of macaw palm fruit protect seeds in a fire-prone environment?. **Acta Botanica Brasilica**, v. 30, p. 540-548, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-33062016abb0077>
- BOCOCK, K. L.; GILBERT, O. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. **Plant and Soil**, v. 9, p. 179-185, 1957. <https://doi.org/10.1007/BF01398924>
- BRITO, J. O. **Expressão da produção florestal em unidades energéticas**. In: Congresso Florestal Panamericano. 1 Congresso Florestal Brasileiro, 7, 1993. Curitiba, Anais. Curitiba: UFPR, v. 3, p. 280-282, 1993.
- BRUM, S. S.; BIANCHI, M. L.; SILVA, V. L.; GONÇALVES, M.; GUERREIRO, M. C.; OLIVEIRA, L. C. A. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1048-1052, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000500019>

CARDOSO, M. R. D. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, v.8, n.16, p. 40-55, 2014. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/15047>

CARVALHO, J. L. N.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 336-344, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500008>

CARVALHO, J.L.; HUDIBURG, T.W.; FRANCO, H.C.; DELUCIA, E.H. Contribution of above-and belowground bioenergy crop residues to soil carbon. **Gcb Bioenergy**, v. 9, n. 8, pág. 1333-1343, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12411>

[CORLEY, R.H.V.; TINKER, P.B. The oil palm. 4nd ed. Oxford, EUA: Blackwell Science, 2003. 562p.](#)

COSTA, W. A. J. M.; ATAPATTU, A. M. L. K. Decomposition and nutrient loss from prunings of different contour hedgerow species in tea plantations in the sloping highlands of Sri Lanka. **Agroforestry Systems**, v. 51, n. 3, p. 201-211, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010772209966>

DINIZ, J.; CARDOSO, A. L.; STAHL, J. A.; VILLETTI, M. A.; MARTINS, A. F. Poder calorífico co da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise. **Revista Ciência e Natura**, v. 26, n. 2, p. 25-32, 2004. <https://doi.org/10.5902/2179460X9674>

[DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. Manual de métodos de análise de solo. \(2ª.ed.\). Rio de Janeiro: Embrapa-Solos; 2011. \(Documentos/Embrapa Solos, 132\).](#)

[EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018, 355p.](#)

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN), **Solid Biofuels – Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen 15104**, Brussel, 2011.

EVARISTO, A. B.; GROSSI, J. A. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; PIMENTEL, L. D.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 85, p. 18-24, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.024>

FORMANN, S.; HAHN, A.; JANKE, L.; STINNER, W.; STRÄUBER, H.; LOGROÑO, W.; NIKOLAUSZ, M. Beyond sugar and ethanol production: Value generation opportunities through sugarcane residues. **Frontiers in Energy Research**, v. 8, p. 267, 2020. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.579577>

FRANCO, H. C. J.; PIMENTA, M. T. B.; CARVALHO, J. L. N.; MAGALHÃES, P. S. G.; ROSSELL, C. E. V.; BRAUNBECK, O. A.; ROSSI NETO, J. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 70, p. 305-312, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500004>

- FREIRE, J. D. L.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; LIRA, M. D. A.; FERREIRA, R. L. C.; SANTOS, M. V. F. D.; FREITAS, E. V. D. Decomposição de serapilheira em bosque de sabiá na Zona da Mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 8, p. 1659-1665, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000800006>
- GISSÉN, C.; PRADE, T.; KREUGER, E.; NGES, I, A.; ROSENQVIST, H.; SVENSSON, S, E.; BJÖRNSSON, L. Comparing energy crops for biogas production—Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilization. **Biomass and bioenergy**, v. 64, p. 199-210, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.061>
- GRUPIONI, C. M.; SANTOS, F. L.; VELLOSO, N. S.; VALENTE, D. S. M.; CARVALHO PINTO, F. D. A. Macaw palm supply chain: Evaluation of a semi-mechanized fruit harvesting system. **Industrial Crops and Products**, v. 151, p. 112444, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112444>
- HOANG, A. T.; NIŽETIĆ, S.; OLCER, A. I.; ONG, H. C.; CHEN, W. H.; CHONG, C. T.; NGUYEN, X. P. Impacts of COVID-19 pandemic on the global energy system and the shift progress to renewable energy: Opportunities, challenges, and policy implications. **Energy Policy**, v. 154, p. 112322, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112322>
- HOURCADE, JC.; DASGUPTA, D.; GHERSI, F. Accelerating the speed and scale of climate finance in the post-pandemic context. **Climate Policy**, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1977599>
- ILINOVA, A.; DMITRIEVA, D.; KRASLAWSKI, A. Influence of COVID-19 pandemic on fertilizer companies: The role of competitive advantages. **Resources Policy**, v. 71, p. 102019, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102019>
- JENKINS, B. M. **Fuel properties for biomassa materials**. In: International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture: the Role Biomass Fuels, 1, 1990. New Delhi, Proceedings, Ludhiana: Punjab Agricultural University, 1990, p. 21-23.
- JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; DA SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 3, p. 386-390, 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5461>
- KHAN, S. A. R.; YU, Z.; GOLPIRA, H.; SHARIF, A.; MARDANI, A. A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123357, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123357>
- LANES, É. C.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N.; NICK, C.; FREITAS, R. D. Molecular characterization and population structure of the macaw palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), ex situ germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity**, v. 106, n. 1, p. 102-112, 2015. <https://doi.org/10.1093/jhered/esu073>
- LAURENT, A.; PELZER, E.; LOYCE, C.; MAKOWSKI, D. Ranking yields of energy crops: a meta-analysis using direct and indirect comparisons. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 46, p. 41-50, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.023>

- LE BILLON, P.; LUJALA, P.; SINGH, D.; CULBERT, V.; KRISTOFFERSEN, B. Fossil fuels, climate change, and the COVID-19 crisis: pathways for a just and green post-pandemic recovery. **Climate Policy**, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1965524>
- LEAL, M. R. L.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 11-19, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007>
- LEFEBVRE, D.; WILLIAMS, A.; MEERSMANS, J.; KIRK, G. J.; SOHI, S.; GOGGIO, P.; SMITH, P. Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76470-y>
- LIANG, X.; YUAN, J.; YANG, E.; MENG, J. Responses of soil organic carbon decomposition and microbial community to the addition of plant residues with different C:N ratio. **European Journal of Soil Biology**, v. 82, p. 50-55, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.08.005>
- [MIRANDA, F. R.; GOMES, A. R.; OLIVEIRA, C. H.; MONTENEGRO, A. A.; BEZERRA, F. M. Evapotranspiration and crop coefficients for green-dwarf coconut in the coastal area of Ceará State, Brazil. \*\*Ciência Agrônômica\*\*, v. 38, n.2, p. 129, 2007.](#)
- MONTOYA, S. G.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N.; COUTO, A. D. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927-938, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2558-7>
- MOTTA, P. E. F. D.; CURI, N.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. D.; GOMES, J. B. V. Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.7, p.1023-1031, jul. 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000700017>
- MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 415-420, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.011>
- NAVARRO-DIAZ, H. J.; GONZALEZ, S. L.; IRIGARAY, B.; VIEITEZ, I.; JACHMANIAN, I.; HENSE, H.; OLIVEIRA, J. V. Macauba oil as an alternative feedstock for biodiesel: characterization and ester conversion by the supercritical method. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 93, p. 130-137, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.11.008>
- NTIMBANI, R. N.; FARZAD, S.; GÖRGENS, J. F. Furfural production from sugarcane bagasse along with co-production of ethanol from furfural residues. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01313-3>
- OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CHAGAS, M. F.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Methane emissions from sugarcane vinasse storage and transportation systems: comparison between open channels and tanks. **Atmospheric Environment**, v. 159, p. 135-146, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.005>

OLIVEIRA, G. H.; ZAIAT, M.; RODRIGUES, J. A. D.; RAMSAY, J. A.; RAMSAY, B. A. Towards the production of mcl-PHA with enriched dominant monomer content: process development for the sugarcane biorefinery context. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 3, p. 844-853, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01637-2>

[OLIVEIRA, L. K. Desenvolvimento de materiais adsorventes de óleos a partir de resíduos da agroindústria e sua aplicação na ração de aves. \*\*Dissertação \(Mestrado em Agroquímica\)\*\* - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009, 74 p.](#)

ONCIOIU, I.; DUCA, I.; POSTOLE, M. A.; GHERGHINA, R.; GRECU, R. A. Transforming the covid-19 threat into an opportunity: The pandemic as a stage to the sustainable economy. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2088, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13042088>

[OUVRIER, M. Exportation par la recolte du cocotier PB-121 en fonction de la potassique et magnésienne. \*\*Oléagineux\*\*, v.39, n.5, p.263-271, 1984.](#)

PARDO, F.; GIL, L.; PARDOS, J.A. Field study of beech (*Fagus sylvatica* L.) and melojo oak (*Quercus pyrenaica* willd) leaf litter decomposition in the centre of the Iberian Peninsula. **Plant and Soil**, v. 191, n. 1, p. 89-100, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1004237305438>

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>

PAULA, L, E, D, R.; TRUGILHO, P, F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M, L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200012>

PERRON, T.; MARESCHAL, L.; LACLAU, J. P.; DEFFONTAINES, L.; DELEPORTE, P.; MASSON, A.; GAY, F. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations established on two soil types: Implications for nutrient management over the immature phase. **Industrial Crops and Products**, v. 159, p. 113084, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113084>

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S.Y.; PEDROSO NETO, J.C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1ª aproximação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.32, n.265, p.20-30, 2011.

PIRES, T. P.; SANTOS SOUZA, E.; KUKI, K. N.; MOTOIKE, S. Y. Ecophysiological traits of the macaw palm: a contribution towards the domestication of a novel oil crop. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 200-210, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>

[QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. \*\*Revista da Madeira\*\*, n. 89, p. 100-106, 2005.](#)

RAVEENDRAN, K.; GANESH, A.; KHILAR, K. C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. **Fuel**, v. 74, p. 12-22, 1995. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)80013-8](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)80013-8)

ROCKSTRÖM, J.; WILLIAMS, J.; DAILY, G.; NOBLE, A.; MATTHEWS, N.; GORDON, L.; SMITH, J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*, v. 46, n. 1, p. 4-17, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R**. RStudio, PBC, Boston, MA, 2020. URL <http://www.rstudio.com/>

[SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. \*\*Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Etanol- Tecnologias e Perspectivas\*\*. Editora UFV: Brazil, 2018.](#)

SAWANGKEAW, R.; NGAMPRASERTSITH, S. A review of lipid-based biomasses as feedstocks for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 97-108, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.007>

SEYE, O.; CORTEZ, L, A, B.; GÓMEZ, E, O. **Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos**. In: Energia no meio rural, 2003. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200022&sc\\_rpt=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200022&sc_rpt=sci_arttext).

SIDDI, M. Coping with turbulence: EU negotiations on the 2030 and 2050 climate targets. *Politics and Governance*, v. 9, n. 3, p. 327-336, 2021. <https://doi.org/10.17645/pag.v9i3.4267>

SILVA, A. M.; BENTES, M. A.; MEDRADO, S. B.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral na fabricação do coque na coqueira da CSN. *Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 5, n. 1, p. 40-45, 2008. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00501008>

SINGH, B.; SINGH, K.; RAO, G. R.; CHIKARA, J.; KUMAR, D.; MISHRA, D. K.; TULI, R. Agro-technology of *Jatropha curcas* for diverse environmental conditions in India. *Biomass and bioenergy*, v. 48, p. 191-202, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.11.025>

SINGH, R.; ARORA, A.; SINGH, V. Biodiesel from oil produced in vegetative tissues of biomass-A review. *Bioresource Technology*, p. 124772, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124772>

SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; SANTOS, R. V. D.; BAKKE, I. A.; SALES, F. D. C. V.; SOUZA, B. V. D. Taxa de decomposição da serapilheira e atividade microbiana em área de Caatinga. *Cerne*, v. 19, n. 4, p. 559-565, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000400005>

SOUZA, G. K.; DIÓRIO, A.; DE LIMA, H. H. C.; DOS SANTOS MANIEZZO, R.; RINALDI, A. W.; PEREIRA, N. C.; POMINI, A. M. Assessment of Natural and Post-Extraction Biomass from *Acrocomia totai* leaves: a Renewable Source of Energy. *BioEnergy Research*, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10208-6>

SOUZA, R. C. R.; SEYE, O.; SANTOS, E. C. S.; MORAIS, M. R.; DINIZ, J. T. A.; BARROS, A. O.; BARROSO, L. N. **Estudo do aproveitamento de biomassa para produção de eletricidade no Estado de Roraima: relatório final**. Manaus: CDEAM/UFAM, 2005, 43 p.



STICKLEN, M. B. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. **Nature Reviews**, v. 9, p. 433-443, 2008. <https://doi.org/10.1038/nrg2336>

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FERREIRA, D. A.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 345-352, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500009>

USLU, A.; FAAIJ, A. P.; BERGMAN, P. C. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics, Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. **Energy**, v. 33, n. 8, p. 1206-1223, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.03.007>

VIÉGAS, I. de J.M.; BOTELHO, S.M. Nutrição mineral do dendezeiro. In: VIÉGAS, I. de J.M.; MULLER, A.A. (Ed.). **A cultura do dendezeiro na Amazônia brasileira**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental; Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2000. p.229-273.

VILAS BOAS, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v.38, n. 87, p. 481-490, 2010.

VITTI, A. C.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FERREIRA, D. A.; OTTO, R.; FORTES, C.; FARONI, C. E. Nitrogen derived from fertilization and straw for plant cane nutrition. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 46, n. 3, p. 287-293, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000300009>

VOLPI, M. P. C.; FUESS, L. T.; MORAES, B. S. Anaerobic co-digestion of residues in 1G2G sugarcane biorefineries for enhanced electricity and biomethane production. **Bioresource Technology**, v. 330, p. 124999, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124999>

WIEDER, R. K.; LANG, G.E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. **Ecology**, New York, v. 63, n. 6, p. 1636-1642, 1982. <https://doi.org/10.2307/1940104>

## CONCLUSÕES GERAIS

Os estudos revelaram que o acúmulo de biomassa foliar senescida é fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica do ambiente, de tal forma que sob mesma condição nutricional, acessos de macaúba cultivados em ambiente com alta disponibilidade hídrica acumulam 64% a mais de biomassa foliar senescida.

Foi possível constatar também que ambientes com alta disponibilidade hídrica e nutricional resultam em maiores quantidades remanescentes de N, K, Ca, S e Zn na biomassa foliar senescida de macaúba que ambientes com disponibilidade hídrica restrita.

No entanto, a alta ou baixa disponibilidade hídrica ou nutricional não são capazes de alterar significativamente o poder calorífico superior e inferior da biomassa foliar senescida da macaúba que se situam na faixa de 19,2 GJ t<sup>-1</sup> e 16,3 GJ t<sup>-1</sup>, para PCS e PCI, respectivamente, independentemente do acesso.

Estas constatações indicaram que a disponibilidade hídrica no solo é um dos principais fatores edáficos regulatórios ao acúmulo de biomassa foliar senescida em macaúba e repercute, ao final, na possível forma de utilização do potencial agroindustrial da biomassa foliar senescida.

Isto porque a biomassa foliar senescida de macaúba apresenta aptidão tanto para utilização como fonte agroenergética, quanto para servir como fonte de restituição/reciclagem mineral à camada superficial do solo.

Porém, sistemas intensivos de cultivo de macaúba (submetidos a irrigação e adubação) são aqueles com maior aptidão para exploração energética dessa biomassa (rendimento energético de até 121 GJ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> com uma população de 400 plantas por hectare).

Por outro lado, independentemente do sistema de cultivo (seja intensivo, semi-intensivo ou extrativista) a biomassa foliar senescida de macaúba pode ser utilizada como importante estratégia de reciclagem de nutrientes e aumento do teor de matéria orgânica no ambiente, visto que possui potencial para reciclar/restituir anualmente até 46,2%, 5,7% e 5,5% da quantidade acumulada de N, P e K, respectivamente.

Portanto, a decisão por manter a biomassa sobre o solo, ou utilizá-lo na indústria bioenergética dependerá de sistema de exploração utilizado, e de um estudo de viabilidade econômica para cada propriedade, envolvendo preço de venda da energia, custo dos fertilizantes, custo com corte, carregamento e transbordo do material.

Assim, esse trabalho norteia o potencial de aproveitamento da biomassa da macaúba e sugere novas pesquisas na área de viabilidade econômica para melhor entendimento e direcionamento dos complexos agroindustriais de macaúba.