

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Uso de diferentes combustíveis da biomassa e seus efeitos sobre o
desempenho da combustão e na cocção do alimento grelhado em churrasco**

Álison Moreira da Silva

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2024**

Álison Moreira da Silva
Engenheiro Florestal

**Uso de diferentes combustíveis da biomassa e seus efeitos sobre o desempenho da
combustão e na cocção do alimento grelhado em churrasco**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ OTÁVIO BRITO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Silva, Álison Moreira da

Uso de diferentes combustíveis da biomassa e seus efeitos sobre o desempenho da combustão e na cocção do alimento grelhado em churrasco / Álison Moreira da Silva. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2024.

61 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Desempenho energético 2. Emissões gasosas 3. Carne grelhada 4. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada família, cujo amor incondicional e apoio constante foram a força motriz por trás de cada passo desta jornada.

À minha querida esposa, além de minha companheira de vida, minha fonte inesgotável de inspiração e suporte, agradeço por estar sempre ao meu lado, incentivando-me a alcançar os meus sonhos.

Vocês são a minha rocha, meu porto seguro, e este trabalho é dedicado a vocês com todo o meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as oportunidades que me apresentou de ser a melhor versão de mim mesmo.

Aos meus pais, Adilson da Silva e Débora de Souza Moreira, por todo amor, todo sacrifício, por serem sempre meus exemplos e pelas vezes que abdicaram de seu conforto pela realização dos meus ideais.

À Simone Augusta dos Santos, minha esposa, meu amor e minha maior incentivadora, por estar ao meu lado, compreendendo as ausências e compartilhando as alegrias e dificuldades deste percurso.

À minha família, por todo apoio, compreensão e incentivo ao longo deste caminho.

Ao Professor José Otávio Brito, por sua orientação ao longo deste processo. Suas sugestões, insights e críticas construtivas foram cruciais para o desenvolvimento desta tese. Sua expertise e comprometimento foram inspiradores e me ajudaram a crescer academicamente. Sou imensamente grato pela oportunidade de aprender com o senhor e tê-lo como orientador.

Ao Professor Ananias Francisco Dias Júnior. É difícil encontrar palavras que expressem o quanto sou grato por tudo que você fez por mim ao longo deste caminho. Sua orientação acadêmica foi fundamental para o desenvolvimento desta tese, mas sua presença vai além disso. Você foi meu apoio constante, meu ouvinte atento e meu conselheiro em momentos de dúvida e incerteza. Obrigado por acreditar em mim, mesmo quando eu duvidava das minhas capacidades. Sua confiança foi um grande impulso para alcançar meus objetivos. Mas mais do que isso, obrigado por sua amizade. Os momentos que compartilhamos, as conversas que tivemos e os conselhos que você me deu são tesouros que guardarei para sempre em meu coração. Se hoje estou aqui, celebrando esta conquista, devo muito a você. Espero que saiba que sua contribuição para minha vida vai muito além dos limites desta tese. Você foi e continuará sendo uma parte fundamental da minha jornada.

Aos amigos da vida, Maicon, Hiago, Mareto e Diego, que mesmo de longe, sempre me apoiaram e torceram por mim. Amizades verdadeiras são tesouros que devem ser valorizados, e a nossa, sem dúvida alguma, é uma das mais preciosas.

Ao Ricardo Pinheiro Cabral e ao Klisman Oliveira, pela sua amizade sincera e o companheirismo que sempre demonstraram. Obrigado por estarem sempre ao meu lado, por compartilhar risadas, sonhos e desafios.

Aos amigos Luís Filipe Cezario, Fabíola Delatorre, Gabriela Cupertino e Alfredo Júnior. Agradeço a oportunidade em conhecê-los e dividir os momentos importantes nestes anos.

A todos do Laboratório multiusuário de energia da biomassa da Universidade Federal do Espírito Santo (LEB/UFES). O apoio, a colaboração e o ambiente de trabalho colaborativo que encontramos juntos foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço a cada um de vocês por compartilharem seus conhecimentos, experiências e insights ao longo deste caminho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo, que foi fundamental para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento acadêmico.

Ao CNPq, pela bolsa de doutorado sanduíche que me permitiu desenvolver parte desta tese em um ambiente acadêmico internacional, ampliando meus horizontes e contribuindo significativamente para a qualidade do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por ter me acolhido e proporcionado um ambiente acadêmico estimulante e enriquecedor. Agradeço

sinceramente pelo apoio, pela infraestrutura de qualidade e pelo suporte institucional que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Foi na ESALQ que encontrei as condições ideais para expandir meus horizontes acadêmicos, desenvolver minhas habilidades e contribuir para a construção do conhecimento.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelo ambiente acadêmico estimulante, recursos oferecidos e todo suporte institucional.

À professora Suzana Maria Della Lucia, por todo apoio na idealização desta tese e nas análises que precisei realizar.

Quero expressar minha profunda gratidão à professora Cristina Roseiro por me acolher durante minha estadia no INIAV (Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária). Sua orientação, apoio e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. E agradeço ao INIAV pela oportunidade de desenvolver parte desta pesquisa em suas instalações.

À Dalza e ao Marcelo Simonato por terem cedido o espaço do Sítio Alegratto para o desenvolvimento desta pesquisa. Sua generosidade e apoio foram fundamentais para que este trabalho se concretizasse. Agradeço de coração por abrirem as portas de sua propriedade e por contribuírem de forma tão significativa para este projeto.

À todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse onde estou hoje. A cada pessoa que cruzou meu caminho, deixou um sorriso, uma palavra de encorajamento, um gesto de apoio, meu sincero e profundo agradecimento. Cada um de vocês teve um papel importante nesta jornada, seja ele grande ou pequeno. Se estou aqui hoje, é porque pude contar com o apoio, a compreensão e o carinho de cada um de vocês. Obrigado por fazerem parte da minha história, por acreditarem em mim e por caminharem ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO GERAL	13
Referências	15
2. INVESTIGANDO O DESEMPENHO DA COMBUSTÃO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS DA BIOMASSA NA COCÇÃO DE ALIMENTO GRELHADO EM CHURRASCO	17
Resumo	17
Abstract	17
2.1. Introdução	18
2.2. Material e Métodos	18
2.2.1. Obtenção e caracterização da biomassa utilizada para churrasco	18
2.2.2. Desenvolvimento e desempenho energético do equipamento de combustão	19
2.2.3. Análise das emissões de efluentes atmosféricos	21
2.2.4. Delineamento estatístico e análise de dados	21
2.3. Resultados e Discussão	21
2.3.1. Características químicas, físicas e energéticas da biomassa	21
2.3.2. Desempenho energético da biomassa em churrasqueira	24
2.3.3. Emissões de efluentes atmosféricos durante o churrasco	28
2.3.4. Aplicações práticas e políticas públicas	32
2.4. Conclusões	33
Referências	33
3. USO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS DA BIOMASSA E SEUS EFEITOS SOBRE A COCÇÃO DO ALIMENTO GRELHADO EM CHURRASCO	39
Resumo	39
Abstract	39
3.1. Introdução	40
3.2. Material e Métodos	41

3.2.1. Caracterização da biomassa e desempenho energético da cocção do alimento em churrasco.....	41
3.2.2. Análises físico-químicas e tecnológicas de carne grelhada.....	41
3.2.3. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.....	42
3.2.4. Delineamento estatístico e análise de dados.....	43
3.3. Resultados e Discussão.....	44
3.3.1. Características químicas, físicas e energética do alimento grelhado.....	44
3.3.2. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.....	49
3.3.3. Aplicações práticas e políticas públicas	51
3.4. Conclusões.....	52
Referências	53
Apêndices	57
4. CONCLUSÕES GERAIS.....	61

RESUMO

Uso de diferentes combustíveis da biomassa e seus efeitos sobre o desempenho da combustão e na cocção do alimento grelhado em churrasco

O churrasco é uma prática popular apreciada em todo o mundo, e o tipo de combustível utilizado para essa finalidade pode influenciar não apenas as propriedades dos alimentos grelhados, mas também a saúde humana. Neste contexto, este estudo investigou os impactos do uso de diferentes combustíveis de biomassa (madeira, carvão vegetal e briquete de carvão) sobre o desempenho energético da combustão e na cocção do alimento grelhado. As biomassas foram caracterizadas por meio de testes de umidade, densidade à granel, análise imediata, poder calorífico e densidade energética. Além disso, uma churrasqueira foi desenvolvida especificamente para este estudo, permitindo o acompanhamento das temperaturas e a coleta de emissões gasosas. Foram realizados testes de cocção de carne bovina em churrasco, utilizando-se como parâmetros de análise da carne a umidade, teor de lipídios, proteínas, carboidratos, quantificação de energia, pH, cor, percentual de encolhimento e rendimento. A quantificação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) foi feita por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), identificando 16 tipos de HPAs. Foi observado que a madeira proporcionou temperaturas mais elevadas na área de cocção, resultando em uma carne com coloração mais avermelhada. No entanto, essa carne apresentou menor teor de lipídios e tendência a maior concentração de HPAs em comparação com aquela grelhada com carvão vegetal e briquete de carvão. Por outro lado, o carvão vegetal e o briquete de carvão produziram uma temperatura mais homogênea durante a cocção, resultando em uma coloração mais amarelada da carne. Além disso, a carne grelhada com esses combustíveis manteve maior quantidade de lipídios e menor quantidade de HPAs. Independentemente do tipo de biomassa utilizada, a cocção do alimento resultou em redução da umidade e aumento do teor de proteínas. O teor de cinzas na carne grelhada também aumentou, sendo mais elevado quando se utilizou madeira como combustível. Estes resultados indicam que o tipo de combustível utilizado no churrasco influencia significativamente o desempenho energético e as características dos alimentos grelhados, bem como a formação de compostos potencialmente prejudiciais à saúde, como os HPAs.

Palavras-chave: Desempenho energético, Emissões gasosas, Carne grelhada, Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

ABSTRACT

Use of different biomass fuels and their effects on the combustion performance and cooking of grilled food on a barbecue

Barbecue is a popular practice enjoyed worldwide, and the type of fuel used for this purpose can influence not only the properties of grilled foods but also human health. In this context, this study investigated the impacts of using different biomass fuels (wood, charcoal, and charcoal briquette) on the combustion energy performance and grilling of food. The biomasses were characterized through tests of moisture content, bulk density, proximate analysis, calorific value, and energy density. Additionally, a barbecue grill was developed specifically for this study, allowing the monitoring of temperatures and the collection of gas emissions. Cooking tests of beef on the barbecue were conducted, using parameters for meat analysis including moisture content, lipid content, proteins, carbohydrates, energy quantification, pH, color, shrinkage percentage, and yield. The quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) was performed using high-performance liquid chromatography (HPLC), identifying 16 types of PAHs. It was observed that wood provided higher temperatures in the cooking area, resulting in meat with a more reddish color. However, this meat had lower lipid content and a tendency towards higher concentrations of PAHs compared to that grilled with charcoal and charcoal briquette. On the other hand, charcoal and charcoal briquette produced a more homogeneous temperature during cooking, resulting in a more yellowish color of the meat. Additionally, meat grilled with these fuels retained a higher amount of lipids and a lower amount of PAHs. Regardless of the type of biomass used, cooking the food resulted in a reduction in moisture and an increase in protein content. The ash content in the grilled meat also increased, being higher when wood was used as fuel. These results indicate that the type of fuel used in barbecue significantly influences the energy performance and characteristics of grilled foods, as well as the formation of compounds potentially harmful to health, such as PAHs.

Keywords: Energy performance, Gas emissions, Grilled meat, Polycyclic aromatic hydrocarbons

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Churrasqueira desenvolvida.	20
Figura 2. Propriedades físicas, químicas e energéticas das biomassas utilizadas para cocção.	22
Figura 3. Temperaturas da área de combustão e da área de cocção nos ensaios.	25
Figura 4. Médias das variáveis extraídas das temperaturas em churrasco.	26
Figura 5. Emissões de efluentes atmosféricos em churrasco.	29
Figura 6. Análise dos componentes principais das características de combustão das biomassas utilizadas em cocção.	31
Figura 7. Propriedades químicas e energética da carne crua e grelhada com diferentes biomassas como combustível.	45
Figura 8. Matriz de correlação entre as propriedades da carne grelhada em churrasco (a), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos presentes (b), propriedades da biomassa (c) e variáveis extraídas dos ensaios de cocção em churrasco (d).	46
Figura 9. Ajuste de regressão entre o teor de cinzas e a velocidade de aquecimento (a) e resfriamento (b) da área de combustão da churrasqueira.	47
Figura 10. Propriedades colorimétricas da carne grelhada em churrasco, com diferentes biomassas como combustível.	48
Figura 11. Análise dos componentes principais das propriedades da carne grelhada em churrasco, quantidade de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos presentes e as características de combustão das biomassas utilizadas. ...	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Grupos de importância prioritária de HPAs presente na carne grelhada em churrasco, com diferentes biomassas como combustível.....	49
---	----

1. INTRODUÇÃO GERAL

Mundialmente, cerca de 2,5 bilhões de pessoas fazem uso da biomassa vegetal em suas residências, como madeira, carvão e resíduos agrícolas (WHO 2021). Em países de diferentes estágios de desenvolvimento, como China, Filipinas, Índia, Indonésia, México e países da África subsaariana, os combustíveis sólidos da biomassa são os principais recursos energéticos para cozinhar, aquecer e iluminar (WHO 2021), geralmente associado a equipamentos de combustão de baixa tecnologia. Estes fatos podem ser explicados pelo crescimento populacional e pela biomassa ter sido sempre um recurso disponível localmente, apresentando baixo custo na maioria das regiões do mundo. Cozinhar e aquecer todos os dias com combustíveis sólidos têm sido ainda associados à baixa renda familiar (Kvestad et al. 2022), onde as populações mais vulneráveis socialmente ainda dependam da extração da biomassa disponível.

Em 2022, a lenha e o carvão vegetal representaram 9,0% da oferta de energia interna do Brasil, posicionando-se em terceiro lugar no ranking das energias renováveis disponíveis na matriz energética (EPE 2023). Juntamente com o carvão vegetal, o consumo de lenha aumentou cerca de 9,7% na sua participação na oferta de energia interna, entre 2017 e 2022 (EPE 2023). Além da sua utilização em residências, a lenha é uma das fontes de energia mais utilizadas na forma de calor na cocção de alimentos em estabelecimentos comerciais (padarias, pizzarias, etc.). Estima-se que, em todo o mundo, cerca de 1,9 bilhões de m³ de madeira foram utilizadas para a geração de energia, em 2020 (FAO 2022).

As diferenças culturais definem uma fascinante variedade de métodos de cozimento, desde a cocção a chama (grelhar), onde os alimentos têm o contato direto com a fonte de calor, até a fornos abertos e fechados que utilizam de painéis e outros aparatos para ferver, cozinhar e assar, baseados no contato indireto com a fonte de calor gerada pelo combustível (Kajumba et al. 2022). Outro exemplo, é a prática de grelhar alimentos por meio do famoso “churrasco”, que está enraizada no cotidiano do ser humano e cada vez mais tem alcançado um setor “gourmetizado”. Este hábito tornou-se possível apenas após o domínio das técnicas de fazer fogo, em que após exposição, percebeu-se melhor palatabilidade e maior tempo de conservação dos alimentos, tornando-se a primeira prática de preparação de alimentos realizada pela humanidade (Warnes 2008). O aperfeiçoamento levou a origem de novas tecnologias de cocção, inclusive usando-se de fontes de calor. O churrasco, em que se utiliza biomassa como fonte para cocção, está amplamente difundido pelo mundo atualmente. Sua peculiar característica sensorial transmitida aos alimentos faz do churrasco uma excelente experiência para os consumidores, sendo sua qualidade ditada por diferentes fatores, dentre eles, o tipo do combustível gerador de calor, tipo do alimento e desempenho térmico do equipamento de combustão.

Considerando a grande variabilidade de carvão vegetal encontrada no mercado (Dias Júnior et al. 2021), e as diferentes propriedades de cada um, além da lenha e briquetes utilizados para o mesmo fim (Ignacio et al. 2019; Dias Junior et al. 2020b), a escolha equivocada do combustível biomassa pode ocasionar insatisfação ao consumidor ao utilizá-lo na cocção de alimentos. Isso porque as fontes de calor utilizadas em churrasco podem ser diversas. A fonte de calor determina a dinâmica da cocção, que implicam diretamente nas características finais do alimento grelhado. Detalhes como fumaça gerada na queima, temperatura alcançada na superfície do alimento, associada a baixa tecnologia de equipamentos de combustão, podem impactar em aspectos químicos e físicos nos alimentos grelhados, alterando sabor, aroma, cor e textura (Arshad et al. 2018; Bassam et al. 2022).

Por exemplo, a temperatura que se encontra a grelha, que está diretamente em contato com o alimento, influencia fortemente no equilíbrio das várias vias químicas que compõem a reação de Maillard, reação não enzimática que ocorre entre açúcares redutores e aminoácidos, peptídeos ou proteínas em alimentos (Karangwa et al. 2015; Begum et al. 2020). No mesmo sentido, ao ser utilizada a lenha como combustível na cocção, a pirólise da lignina presente na madeira desencadeia a geração de fumaça rica em compostos fenólicos (Saldaña et al. 2019; Husbands and Cranford 2019). Estes compostos são passados para o alimento, conferindo sabor e aroma “amadeirado” ou “defumado”. Contudo, deve ser levada em consideração as emissões gasosas de cada fonte de energia, que são dependentes da performance dos equipamentos de combustão, podendo ocasionar sérios problemas respiratórios e impactar o meio ambiente.

A combustão da biomassa e de seus derivados emlareiras, fogões e churrasqueiras estão entre as principais causas da poluição do ar no interior das residências e hoje é considerada pela Organização Mundial da Saúde (WHO) como um dos maiores riscos globais à saúde ambiental (WHO 2021). De fato, na maioria das vezes, a fumaça emitida durante a combustão da biomassa contém componentes tóxicos que incluem uma alta concentração de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), formaldeído e matéria orgânica policíclica (Lee et al. 2018; Padhi et al. 2022). Além compostos potencialmente cancerígenos, como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), que são transferidos para água, no ar, solo e vegetação, muitas vezes chegando ao alimento, na mesa do consumidor (Barbosa et al. 2023; Roseiro et al. 2024). E isso não é um problema da biomassa em si, e sim, da conjuntura que envolve algumas das suas características associadas ao baixo desenvolvimento tecnológico dos sistemas de combustão, como fornos e churrasqueiras, que ao longo do tempo não evoluíram para ocasionar uma combustão total livre de poluentes.

Especificamente, o Brasil apresenta poucas frentes de pesquisa que buscam a resolução dos problemas que relacionam diferentes biomassas e energia no âmbito doméstico e comercial. Observa-se, ao mesmo tempo, esforços ao redor do mundo sendo direcionados à implantação de combustíveis limpos atrelados a melhorias das metodologias de cocção para aliviar a poluição do ar, lidando com as mudanças climáticas e, principalmente, proteger a saúde humana (Aung et al. 2016; Meng et al. 2021). Menores emissões dependem de práticas operacionais das tecnologias de conversão da biomassa, mas também depende das propriedades do combustível (Dias Júnior et al. 2018; Meng et al. 2021). É urgente a necessidade de compreender a relação entre os fenômenos que envolvem a composição química das diferentes biomassas, sua termodegradação e as emissões de efluentes atmosféricos, assegurando as necessidades do consumidor.

O aumento da exigência do consumidor em adquirir produtos de qualidade torna provável o aumento da procura por melhores insumos. Associado a isso, ocorre a diminuição de produtos de qualidade inferior no mercado. O que se percebe é que, quando se trata da realização do churrasco, o consumidor atenta-se à qualidade da carne, aquisição de utensílios importados, temperos midiáticos e uma boa churrasqueira. Mas o combustível utilizado, imprescindível para se obter diferentes experiências na cocção de alimentos (Dias Junior et al. 2020a), não é dada a devida atenção.

Deste modo, será possível planejar tecnologias a base de biomassas mais adequadas para a cocção, sob o ponto de vista energético, e que resultem em menos impactos ao ambiente e à saúde humana. Acredita-se que diferentes biomassas utilizadas em churrasco, associado a um equipamento aperfeiçoado, resultem em diferentes propriedades energéticas, emissões gasosas e diferentes propriedades no alimento grelhado. Assim, o

objetivo deste estudo foi investigar os impactos do uso de diferentes combustíveis da biomassa sobre o desempenho da combustão e na cocção do alimento grelhado em churrasco.

Referências

- Arshad MS, Sohaib M, Ahmad RS, et al (2018) Ruminant meat flavor influenced by different factors with special reference to fatty acids. *Lipids in Health and Disease* 2018 17:1 17:1–13. <https://doi.org/10.1186/S12944-018-0860-Z>
- Aung TW, Jain G, Sethuraman K, et al (2016) Health and Climate-Relevant Pollutant Concentrations from a Carbon-Finance Approved Cookstove Intervention in Rural India. *Environ Sci Technol* 50:7228–7238. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B06208/ASSET/IMAGES/LARGE/ES-2015-062084_0001.JPEG
- Barbosa F, Rocha BA, Souza MCO, et al (2023) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* 26:28–65. <https://doi.org/10.1080/10937404.2022.2164390>
- Bassam SM, Noletto-Dias C, Farag MA (2022) Dissecting grilled red and white meat flavor: Its characteristics, production mechanisms, influencing factors and chemical hazards. *Food Chem* 371:131139. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131139>
- Begum N, Raza A, Shen D, et al (2020) Sensory attribute and antioxidant capacity of Maillard reaction products from enzymatic hydrolysate of bovine bone marrow extract. *J Food Sci Technol* 57:1786–1797. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-04212-8/FIGURES/4>
- Dias Júnior AF, Andrade CR, Brito JO, et al (2018) Polycyclic aromatic hydrocarbons in the organic phase extracted from charcoal for barbecue. *Revista Árvore* 41:. <https://doi.org/10.1590/1806-9088201700050001>
- Dias Júnior AF, Andrade CR, Lana AQ, et al (2021) Tips on the variability of BBQ charcoal characteristics to assist consumers in product choice. *European Journal of Wood and Wood Products* 79:. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01659-5>
- Dias Junior AF, Esteves RP, da Silva ÁM, et al (2020a) Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. *European Journal of Wood and Wood Products* 78:193–204. <https://doi.org/10.1007/S00107-019-01489-6/FIGURES/10>
- Dias Junior AF, Esteves RP, Silva ÁM, et al (2020b) Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. *European Journal of Wood and Wood Products* 78:193–204. <https://doi.org/10.1007/S00107-019-01489-6/FIGURES/10>
- EPE (2023) [Empresa de Pesquisa Energética] Brazilian Energy Balance 2023 Year 2022. Rio de Janeiro
- FAO F and AO of the UN (2022) FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Accessed 19 Jul 2022
- Husbands A, Cranford S (2019) A Material Perspective of Wood, Smoke, and BBQ. *Matter* 1:1092–1095. <https://doi.org/10.1016/J.MATT.2019.10.014>
- Ignacio LH da S, Santos PE de A, Duarte CAR (2019) An experimental assessment of Eucalyptus urosemente energy potential for biomass production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103:361–369. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.12.053>

- Kajumba PK, Okello D, Nyeinga K, Nydal OJ (2022) Assessment of the energy needs for cooking local food in Uganda: A strategy for sizing thermal energy storage with cooker system. *Energy for Sustainable Development* 67:67–80. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2022.01.005>
- Karangwa E, Zhang X, Murekatete N, et al (2015) Effect of substrate type on sensory characteristics and antioxidant capacity of sunflower Maillard reaction products. *European Food Research and Technology* 240:939–960. <https://doi.org/10.1007/S00217-014-2398-2/FIGURES/5>
- Kvestad I, Chandyo RK, Schwinger C, et al (2022) Biomass fuel use for cooking in Nepalese families and child cognitive abilities, results from a community-based study. *Environ Res* 212:113265. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.113265>
- Lee YJ, Park JH, Song GS, et al (2018) Characterization of PM_{2.5} and gaseous emissions during combustion of ultra-clean biomass via dual-stage treatment. *Atmos Environ* 193:168–176. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2018.09.011>
- Meng W, Shen G, Shen H, et al (2021) Synergistic health benefits of household stove upgrading and energy switching in rural China. *Environ Sci Technol* 55:14567–14575. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.1C04242/ASSET/IMAGES/LARGE/ES1C04242_0007.JPEG
- Padhi A, Bansal M, Habib G, et al (2022) Physical, chemical and optical properties of PM_{2.5} and gaseous emissions from cooking with biomass fuel in the Indo-Gangetic Plain. *Science of The Total Environment* 841:156730. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156730>
- Roseiro C, Gonçalves H, Santos C (2024) Incidence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Portuguese Traditional Dry Smoked Meat Products Manufactured at Home for Self-Consumption and by Micro Industrial Plants. *Polycycl Aromat Compd* 44:1011–1018. <https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2185266>
- Saldaña E, Soletti I, Martins MM, et al (2019) Understanding consumers' dynamic sensory perception for bacon smoked with different Brazilian woods. *Meat Sci* 154:46–53. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.04.006>
- Warnes A (2008) *Savage Barbecue: Race, Culture, and the Invention of America's First Food*. Georgia
- WHO (2021) Database: Cooking fuels and technologies (by specific fuel category). <https://www.who.int/publications/m/item/database-primary-reliance-on-fuels-and-technologies-for-cooking>. Accessed 19 Jul 2022

2. INVESTIGANDO O DESEMPENHO DA COMBUSTÃO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS DA BIOMASSA NA COCÇÃO DE ALIMENTO GRELHADO EM CHURRASCO

Resumo

Um terço da população mundial utiliza combustíveis sólidos derivados da biomassa para cozinhar, aquecer ou iluminar. Estes combustíveis possuem composição química complexa e heterogênea, implicando diretamente na dinâmica de combustão e emissões gasosas na cocção de alimentos grelhados. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi investigar os impactos do uso de diferentes combustíveis da biomassa na cocção de alimentos em churrasco sob a ótica de desempenho energético da combustão e emissões gasosas. Madeira de *Eucalyptus* spp., carvão vegetal e briquete de carvão vegetal foram caracterizados pelos testes de umidade, densidade à granel, análise imediata, poder calorífico e densidade energética. Uma churrasqueira foi desenvolvida neste estudo e ela permitiu o acompanhamento da temperatura da combustão, sendo extraídas temperaturas médias e máximas, velocidade de aquecimento e resfriamento da combustão. As emissões de CO, CO₂, CH₄, NO_x, SO₂ e H₂S foram coletadas. Os dados foram analisados por meio da estatística uni e multivariada de componentes principais (PCA). A madeira possui teores elevados de materiais voláteis (82,2%), que eleva a velocidade de aquecimento (40,6 °C min⁻¹) assim como a velocidade de resfriamento (16,6 °C min⁻¹), necessitando de abastecimento constante. O carvão vegetal emitiu menor quantidade de NO_x, SO₂, CH₄, CO₂ ao se comparar com a madeira. Contudo, carvão vegetal é uma biomassa que possui maior parte da combustão na forma incompleta, o que faz com que a emissão de CO seja elevada. Em termos energéticos, o carvão vegetal possui uma queima mais uniforme e controlada. Assim como o briquete, consegue atingir temperaturas mais elevadas que a madeira. Briquetes possuem elevada densidade energética (5,7 GJ m⁻³), permitindo mais eficiência na combustão. Apesar do elevado teor de cinzas (13,9%), suas emissões da queima do briquete ficam em níveis inferiores aos das outras biomassas avaliadas neste estudo.

Palavras-chave: 1. Biomassa e energia doméstica; 2. Saúde ambiental; 3. Emissões gasosas; 4. Temperatura da combustão.

Abstract

One-third of the world's population uses solid biomass fuels for cooking, heating, or lighting. These fuels have a complex and heterogeneous chemical composition, directly affecting the combustion dynamics and gas emissions in the grilling of food. In this context, the aim of this study was to investigate the impacts of using different biomass fuels on food grilling in barbecue from the perspective of combustion energy performance and gas emissions. *Eucalyptus* spp. wood, charcoal, and charcoal briquette were characterized by tests of moisture content, bulk density, proximate analysis, calorific value, and energy density. A barbecue grill was developed in this study, allowing the monitoring of combustion temperature, with average and maximum temperatures, combustion heating and cooling rates being extracted. Emissions of CO, CO₂, CH₄, NO_x, SO₂, and H₂S were collected. The data were analyzed using uni and multivariate principal component analysis. Wood has high volatile matter content, which increases both the combustion heating and cooling rates, requiring constant fueling. Charcoal emitted a lower amount of NO_x, SO₂, CH₄, CO₂ compared to wood. However, it is a biomass that undergoes mostly incomplete combustion, resulting in high CO emissions. In terms of energy, charcoal burns more uniformly and controllably. Similarly, the briquette can reach higher temperatures than wood. Briquettes have a high energy density, allowing for more efficient combustion. Despite the high ash content, the emissions from briquette burning are lower than those of other biomass evaluated in this study.

Keywords: 1. Biomass and domestic energy 2. Environmental health 3. Gas emissions 4. Combustion temperature.

2.1. Introdução

O churrasco, um método de cocção milenar que remonta aos primórdios da civilização humana (Warnes 2008), tornou-se muito mais do que apenas uma refeição; é uma celebração, uma experiência sensorial e, cada vez mais, um símbolo de status gastronômico. A prática do churrasco, que envolve grelhar alimentos sobre calor direto gerada pelo combustível utilizado (Kajumba et al. 2022), tem sido aprimorada ao longo dos séculos, resultando em uma variedade de técnicas e estilos únicos ao redor do mundo. Mas qual o impacto que as principais biomassas utilizadas em churrasco podem causar na prática de cocção?

Desde o churrasco tradicional, com alimentos grelhados sobre fogo direto, até métodos mais elaborados que envolvem fornos fechados e técnicas de defumação, a escolha do combustível é essencial. São os combustíveis utilizados, associados a tecnologia da churrasqueira, que dita a dinâmica de cocção às mais diferentes formas de grelhar no churrasco (Arshad et al. 2018). A temperatura da grelha, por exemplo, é um aspecto crucial no churrasco, pois influencia no tempo de preparo e afeta diretamente as reações químicas que ocorrem durante o processo de cocção (Karangwa et al. 2015; Begum et al. 2020). Ainda, a temperatura da grelha tem um papel fundamental na formação de compostos que conferem sabor, aroma, cor e textura aos alimentos grelhados (Karangwa et al. 2015).

Além das mais variadas experiências sensoriais com o alimento, é importante entender que a queima das principais biomassa utilizadas em churrasco, como madeira, carvão vegetal e briquete, também libera uma série de poluentes atmosféricos, quando associadas a churrasqueiras de baixa tecnologia (Lee et al. 2018; Padhi et al. 2022). Essas emissões incluem gases como, dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), entre outros que contribuem significativamente para a poluição do ar e para as mudanças climáticas (Lee et al. 2018; Padhi et al. 2022).

Diante desse cenário, o objetivo deste estudo foi investigar os impactos do uso de diferentes tipos de biomassa no churrasco, sob a ótica de desempenho energético da combustão e emissões gasosas. Avaliamos como diferentes tipos de combustível afetam a eficiência energética da cocção, assim como as emissões de gases poluentes liberadas durante o processo. Nosso objetivo é fornecer subsídios para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, capazes de atender às demandas dos consumidores, enquanto reduzem os impactos ambientais. Ao fazer isso, esperamos contribuir para um futuro em que possamos desfrutar do prazer do churrasco sem prejudicar o planeta.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Obtenção e caracterização da biomassa utilizada para churrasco

Os materiais para este estudo, madeira de *Eucalyptus* spp., carvão vegetal e briquete de carvão vegetal, foram obtidos junto ao comércio e produtores do sul do estado do Espírito Santo. O estado possui elevada demanda por lenha e carvão vegetal visando o atendimento do setor de alimentos. Mais de 176 mil

residências dependem desses insumos como fonte de energia (IBGE 2022). Assim, peças de madeira foram obtidas junto a produtores de *Eucalyptus* spp. da região, enquanto foram selecionadas as marcas mais presentes no mercado para carvão vegetal e briquetes. Este procedimento foi realizado a fim de obter representatividade, baseando-se na existência de variabilidade das características de cada combustível. Para carvão vegetal e briquete, foram levantadas as marcas disponíveis no mercado e recolhidas as três mais presentes. Foram adquiridos junto ao comércio dez quilos de cada marca, totalizando 30 quilos de briquete e 30 quilos de carvão vegetal, ao final da coleta. Para a madeira, foram obtidos 0,15 m³ de lenha de três produtores, totalizando ao final da coleta 0,45 metros cúbicos de madeira. Assim, o material foi seco ao ar livre por 90 dias, seccionado em toretes de 10 centímetros, e partidos em diâmetro de aproximadamente 2,5 cm. A quantidade coletada garante a aleatoriedade das amostras e a massa necessária para a realização dos ensaios propostos. Os materiais foram homogeneizados em sacos, cada um em seu respectivo tratamento, para então serem caracterizados.

Os procedimentos de ensaios e testes foram conduzidos no Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa, na Universidade Federal do Espírito Santo (LEB/UFES). A umidade (base úmida) foi determinada pela secagem das amostras a 103 ± 2 °C, segundo norma ASTM D1762 - 84 (ASTM 2021). A densidade à granel da madeira, do carvão vegetal e dos briquetes de carvão foi realizada de acordo com a ASTM D5057-17 (ASTM 2017). A análise imediata foi feita seguindo a metodologia da ASTM D1762 - 84 (ASTM 2021), para a determinação dos teores de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ) e teor de carbono fixo (TCF). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em uma bomba calorimétrica modelo IKA C200, conforme DIN (2010). O poder calorífico útil foi obtido com o auxílio da Equação 1.

$$PCU = PCI(1 - U/100) - 6U \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹); PCI = poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹), obtido pela subtração PCS – 304 (energia de formação de vapor d'água); U = umidade (%), base úmida.

2.2.2. Desenvolvimento e desempenho energético do equipamento de combustão

Para este estudo, foi desenvolvida uma churrasqueira. Ao ser projetada, preocupou-se em se obter uma churrasqueira com materiais próximos ao encontrado normalmente no comércio, além de ser dada uma atenção maior a dissipação do calor do sistema, coleta de gases e padronização de temperatura de cocção. Para tal, foi adquirida uma “churrasqueira a bafo” composta por alumínio fundido, material normalmente encontrado em churrasqueiras e panelas. Foi desacoplada a tampa e o fundo, a fim de aumentar a distância da grelha até a brasa quando necessário, e adaptado o fechamento do sistema de cocção com folhas de zinco para maior controle do processo e direcionamento das emissões, conforme a Figura 1.

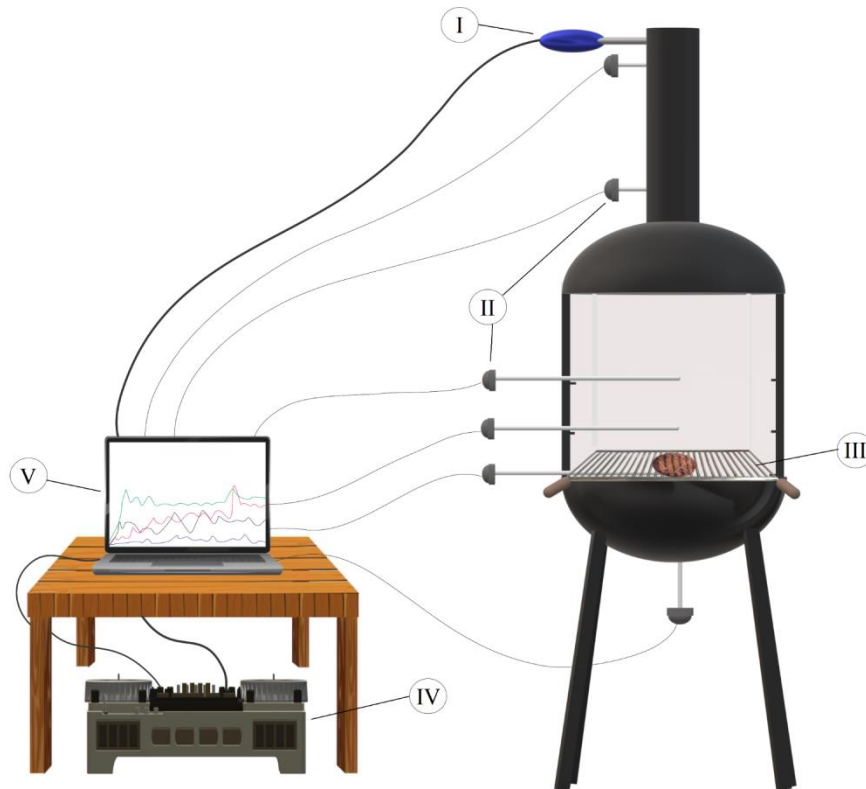


Figura 1. Churrasqueira desenvolvida.

Onde: I = coletor de gases; II = termopares; III = grelha móvel; IV = analisador de gases; V = sistema de registro de dados.

O sistema foi composto por seis termopares, sendo um na área de combustão, um em cada patamar da grelha móvel e duas na chaminé. A distância entre a grelha e a base do equipamento onde se encontra a biomassa foi fixada em 20, 25 e 30 centímetros, permitindo o ajuste de acordo com a temperatura desejada de cocção. Deste modo, permitiu-se analisar temperaturas máximas e médias, quanto tempo foi necessário para chegar na temperatura máxima, velocidade média de aquecimento, velocidade média de resfriamento, quanto tempo as grelhas permaneceram com temperatura de cocção ($> 190\text{ }^{\circ}\text{C}$), necessidade de abastecimento e quantidade de combustível utilizado. Para a análise de desempenho energético, foram conduzidos ensaios de cocção de um alimento proteico de origem bovina em churrasco. Cada ensaio teve duração de três horas. O alimento foi adquirido em uma única casa de carnes. O corte utilizado neste projeto foi acém, corte mais empregado no preparo de hamburguers gourmet (Barbosa et al. 2022). Os hamburgueres, tiveram suas dimensões, espessuras e massa padronizadas, segundo metodologia de Barbosa et al. (2022), moldados em um aro de alumínio de $9,0 \pm 0,2$ cm de diâmetro, $2,0 \pm 0,4$ cm de espessura, obtendo massa de aproximadamente $100,0 \pm 2,0$ g. A utilização de hambúrguer foi importante para o processo de homogeneização do processo de cocção, uma vez que o uso de peças inteiras de cortes específicos poderia levar a interferência no experimento, atribuindo ao experimento diminuição do controle local.

O início da cocção da carne bovina ocorreu após a temperatura da primeira grelha atingir $190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hambúrgueres crus ($10 \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) foram inseridos na grelha que estava mais próximo possível da temperatura de $200 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wright and Treuille 2017). Foi estabelecido o tempo de cocção de dez minutos (cinco minutos para cada lado), atingindo temperatura de $71 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ no centro geométrico de cada peça, acompanhado por um

termômetro digital culinário, seguindo orientações descritas por Gayler (GAYLER, 2010), Wright e Treuille (2017) e Barbosa et al. (2022).

2.2.3. Análise das emissões de efluentes atmosféricos

Concomitante à análise de combustão dos materiais, foram identificadas as emissões do processo. Foi utilizado o analisador de gases Chemist 900 (Seitron) para tal, identificando as emissões gasosas de CO, CO₂, CH₄, NO_x, SO_x e H₂S. A amostragem das emissões teve duração de 180 minutos, iniciando no processo de ignição. A sonda de coleta foi inserida no centro geométrico da saída da chaminé da churrasqueira.

2.2.4. Delineamento estatístico e análise de dados

Os dados foram coletados em cinco repetições, com 180 minutos de duração cada. Ou seja, foram realizados cinco experimentos de cocção para cada tratamento. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Atendendo os pressupostos, a análise de variância foi realizada ($\alpha = 0,05$) seguindo um delineamento inteiramente aleatorizado, com três tratamentos relacionadas aos tipos de combustível utilizado (madeira, carvão vegetal e briquete). Medidas de dispersão do erro padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

A análise multivariada de componentes principais (PCA) foi realizada para simplificar as variações presentes nos dados correspondentes ao combustível utilizado, sendo projetado em um número reduzido de dimensões, preservando ao mesmo tempo o máximo de informação. Para isto, a matriz de dados originais foi aproximada para duas matrizes menores (matrizes de escores e de pesos), resultando em gráficos coordenados de dispersão bidimensionais de scores como resultado da análise, facilitando a visualização dos dados experimentais. As médias aritméticas de todas as variáveis consideradas para o estudo foram padronizadas com média 0 e variância 1. O software R Core Team (2023) foi utilizado para as análises citadas.

2.3. Resultados e Discussão

2.3.1. Características químicas, físicas e energéticas da biomassa

Na Figura 2 são apresentadas as propriedades das biomassas avaliadas.

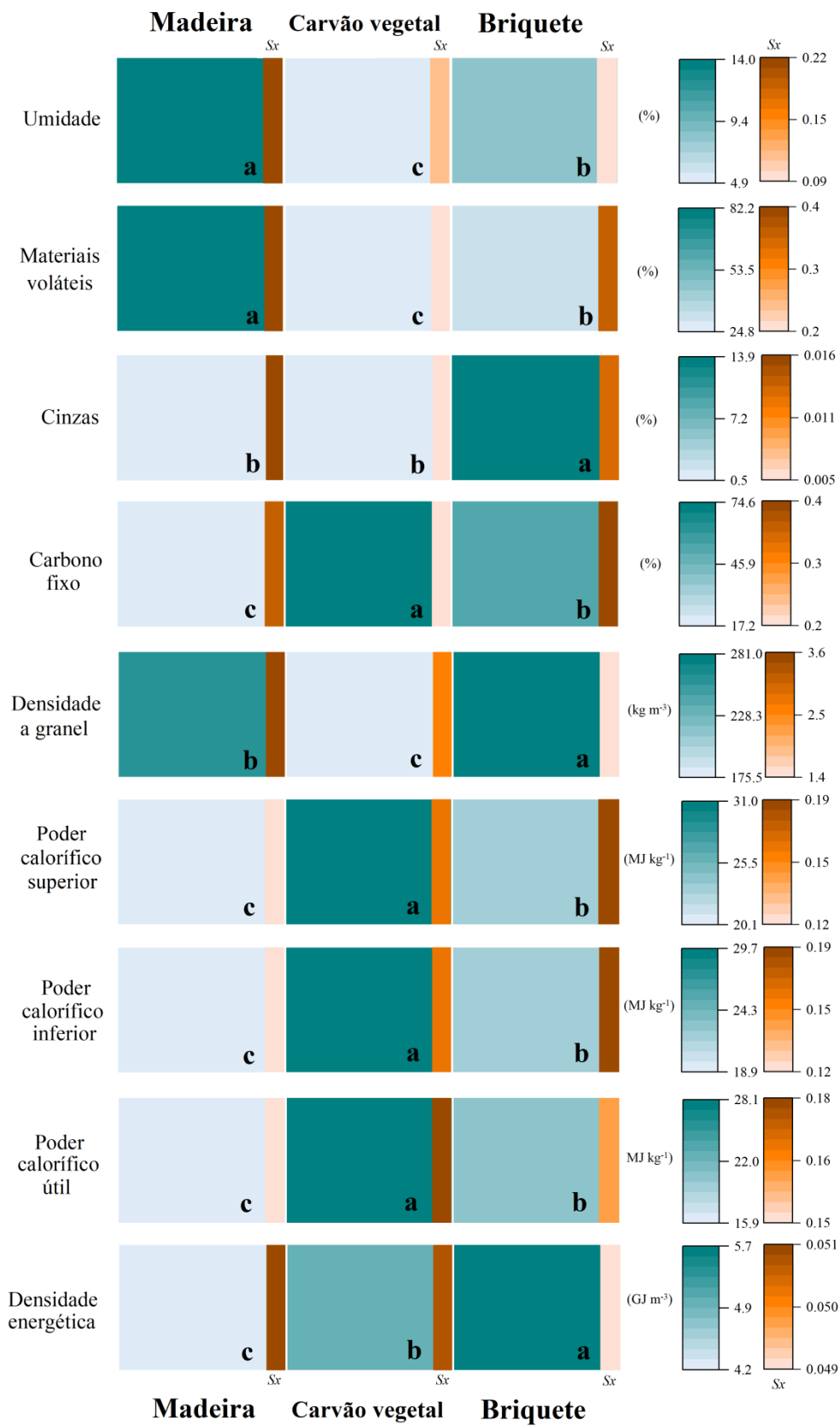


Figura 2. Propriedades físicas, químicas e energéticas das biomassas utilizadas para cocção.

Em que: Sx = Erro padrão.

A madeira apresentou em torno de 14% de umidade, enquanto o carvão vegetal apresentou aproximadamente 5% e o briquete 8,5% (Figura 2 e APÊNDICE A). Esta variação está de acordo com a literatura (Dias Júnior et al. 2021; Yang et al. 2022). A umidade é uma variável importante quando o assunto é disponibilidade energética. Ao ocorrer a queima, o material combustível utiliza a energia gerada primeiramente para evaporar a água presente (Yashwanth et al. 2016; Huang et al. 2023).

Quando o material possui elevada umidade, a energia líquida restante pode ser insuficiente para tornar o uso da biomassa viável, uma vez que diminui o poder calorífico útil. Assim como a umidade, a densidade a granel pode impactar diretamente na densidade energética do combustível. Neste estudo, densidade a granel também variou em função da biomassa analisada. Briquete, possui maior densidade ($280,67 \text{ kg m}^{-3}$), seguido de madeira ($263,02 \text{ kg m}^{-3}$) e carvão vegetal ($175,8 \text{ kg m}^{-3}$). Por ser um material adensado, é de se esperar que o briquete possua elevados valores de densidade a granel. No processo de fabricação, o material é incorporado a um aglutinante, e submetido a elevadas pressões, obtendo um produto firme e densificado (Song et al. 2021; Marreiro et al. 2021; Ali et al. 2024). Já no processo de produção de carvão vegetal, a biomassa é submetida a elevadas temperaturas, acima de $300 \text{ }^\circ\text{C}$, fazendo com que componentes menos estáveis termicamente saiam do sistema (Saravanakumar et al. 2023; Sun et al. 2023). Deste modo se obtém um material de baixa massa específica, com elevado teor de carbono e poder calorífico.

O teor de materiais voláteis encontrado na madeira (82,18%) foi superior ao encontrado no briquete (31,9%) e no carvão vegetal (24,97%). Como de se esperar, por ser um material que passou por um processo de pirólise, o carvão vegetal apresentou maior teor de carbono fixo (74,57%), seguido de briquete (54,71%) e madeira (17,31%). O sistema de pirólise ocorre com o aumento da temperatura, com oxigênio ausente ou limitado. No processo, ligações relativamente fracas são quebradas, em grande quantidade presente na celulose e hemicelulose, e menor na lignina, fixando estruturas de ligações fortes (Ansari et al. 2021; Wang et al. 2023). Assim, ocorre a concentração de carbono presente em cadeias aromáticas, de ligação forte, em detrimento da diminuição de elementos menos estáveis termicamente (Saravanakumar et al. 2023; Sun et al. 2023). Neste contexto, o resultado encontrado neste estudo implica totalmente na dinâmica de combustão do material. O elevado teor de materiais voláteis da madeira faz com que este material seja consumido na combustão mais rapidamente, elevando a temperatura com maior velocidade, mas diminuindo a temperatura na mesma intensidade (Lima et al. 2020; Vieira et al. 2023). O carbono fixo é um carbono mais estável termicamente. Isso faz com que o calor liberado na quebra das ligações C=C seja mais lento, mantendo a temperatura alta por mais tempo (Dias Junior et al. 2020; Oliveira et al. 2022). Deste modo, biomassas com alto teor de carbono fixo, como o carvão vegetal e o briquete de carvão vegetal, mantêm altas temperaturas por mais tempo, sem necessidade de abastecimento. Enquanto a madeira, que possui baixos teores de carbono fixo, mas elevados teores de materiais voláteis, não consegue manter a temperatura elevada por muito tempo, necessitando de abastecimento contínuo.

Outro destaque é dado ao teor de cinzas encontrado no briquete. Esta biomassa apresentou aproximadamente 13% mais cinzas do que madeira e carvão vegetal, que apresentaram menos de 1%. Para este tipo de biomassa é comum encontrar quantidades elevadas de cinzas (Dias Júnior et al. 2021). Isso ocorre por dois possíveis motivos: impureza do processo de coleta de finos de carvão e aglutinante utilizado no processo de produção. A produção de carvão vegetal gera, em média, 25% de resíduos em forma de finos (Donato et al. 2015; Ronix et al. 2021) que podem ser redirecionados para a produção de briquetes. Ao coletar os finos de

carvão, impurezas podem ser coletadas, aumentando o teor de cinzas do material. Além disso, no processo de briquetagem é adicionado um aglutinante para que o briquete fique coeso, e não venha a quebrar. Esses aglutinantes podem ser dos mais variados tipos, desde amido de milho (Tambunan et al. 2023), fécula de mandioca (Oladosu et al. 2023), até compostos químicos mais elaborados, como K_2CO_3 , $CaCO_3$, goma xantana e carboximetilcelulose (Liang et al. 2020), e podem ser fontes de cinzas para o briquete.

A presença de altos teores de cinzas frequentemente se apresenta como um desafio significativo para materiais utilizados em processos de queima direta. Além da necessidade constante de limpeza, que exige remoções regulares e eficazes, a cinza também é abrasiva e, ao longo do tempo, pode corroer os componentes metálicos dos queimadores (Míguez et al. 2021). Outro problema enfrentado na queima direta, especialmente em biomassas, é o baixo ponto de fusão das cinzas, o que resulta em grandes depósitos de escória e formação de incrustações (Míguez et al. 2021). Essas questões não apenas reduzem a eficiência dos sistemas de combustão, mas também geram custos adicionais para a limpeza e manutenção dos equipamentos. Em alguns casos, esses desafios podem até impedir o uso de certos tipos de biomassa vegetal para a combustão. Assim como a umidade, as cinzas impactam diretamente na disponibilidade energética do material. O elevado teor de cinzas do briquete diminuiu seu poder calorífico, que obteve poder calorífico superior 24% menor que o de carvão vegetal. Só não foi menor que o da madeira, que obteve $20,14 \text{ MJ kg}^{-1}$. A umidade da madeira diminuiu ainda mais o seu poder calorífico útil, uma vez que parte da energia é gasta para evaporar a água presente (Zhang et al. 2024). Em resumo, mesmo apresentando alto teor de cinzas, a elevada densidade do briquete aumentou sua densidade energética, tornando-a maior que a de carvão vegetal e da madeira. Na prática, é inserido menor volume de briquete na churrasqueira para fornecer a mesma quantidade de energia que a da madeira e do carvão vegetal. Isso impacta positivamente em eficiência energética, logística de transporte, armazenamento e uso do combustível, fazendo com que o briquete tenha destaque em churrasco.

2.3.2. Desempenho energético da biomassa em churrasqueira

Na Figura 3 é possível observar a temperatura na área de combustão (termopar no fundo da churrasqueira) e a temperatura média da área de cocção (grelhas), enquanto que na Figura 4 são apresentadas as médias das variáveis extraídas.

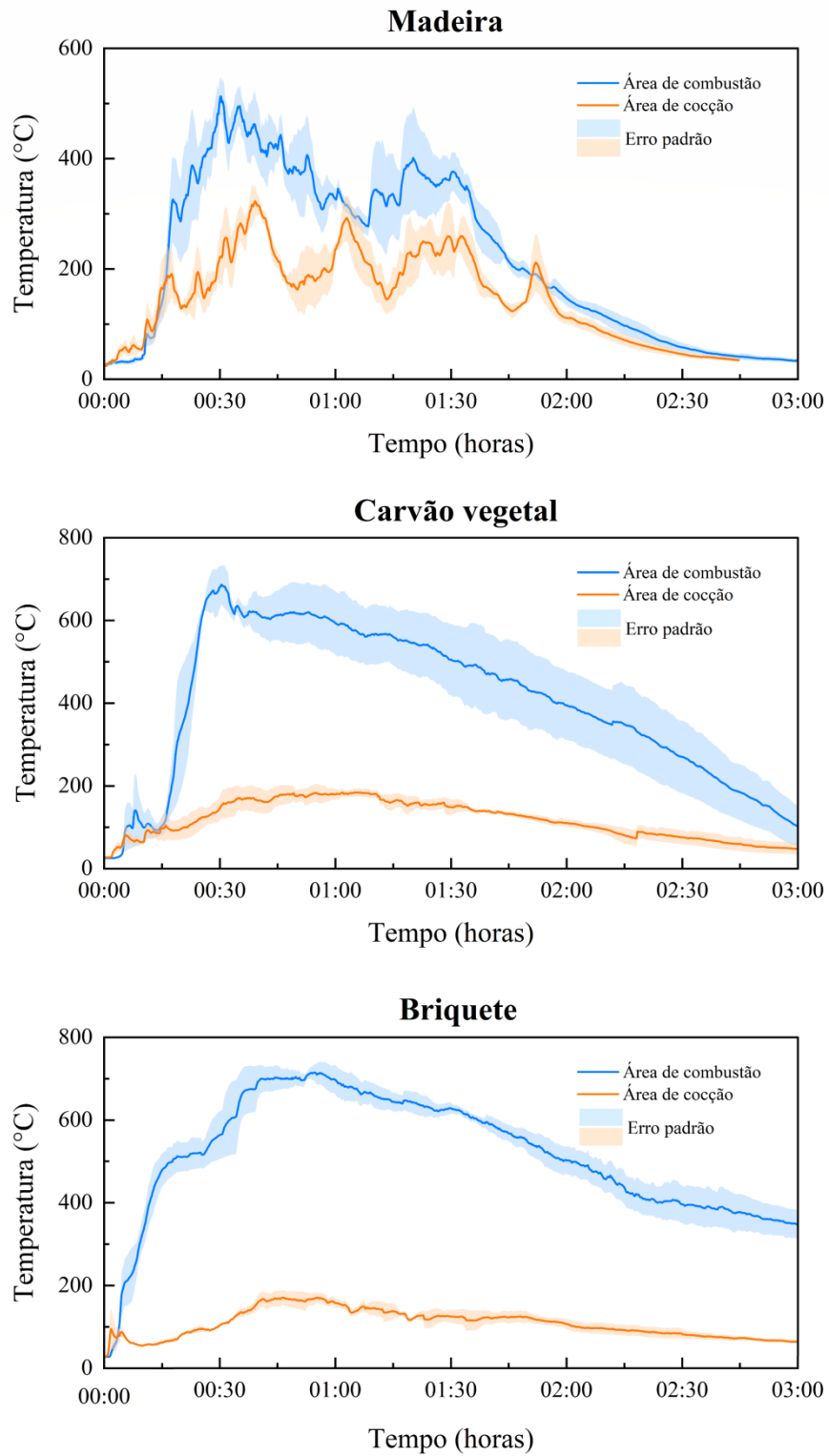


Figura 3. Temperaturas da área de combustão e da área de cocção nos ensaios.

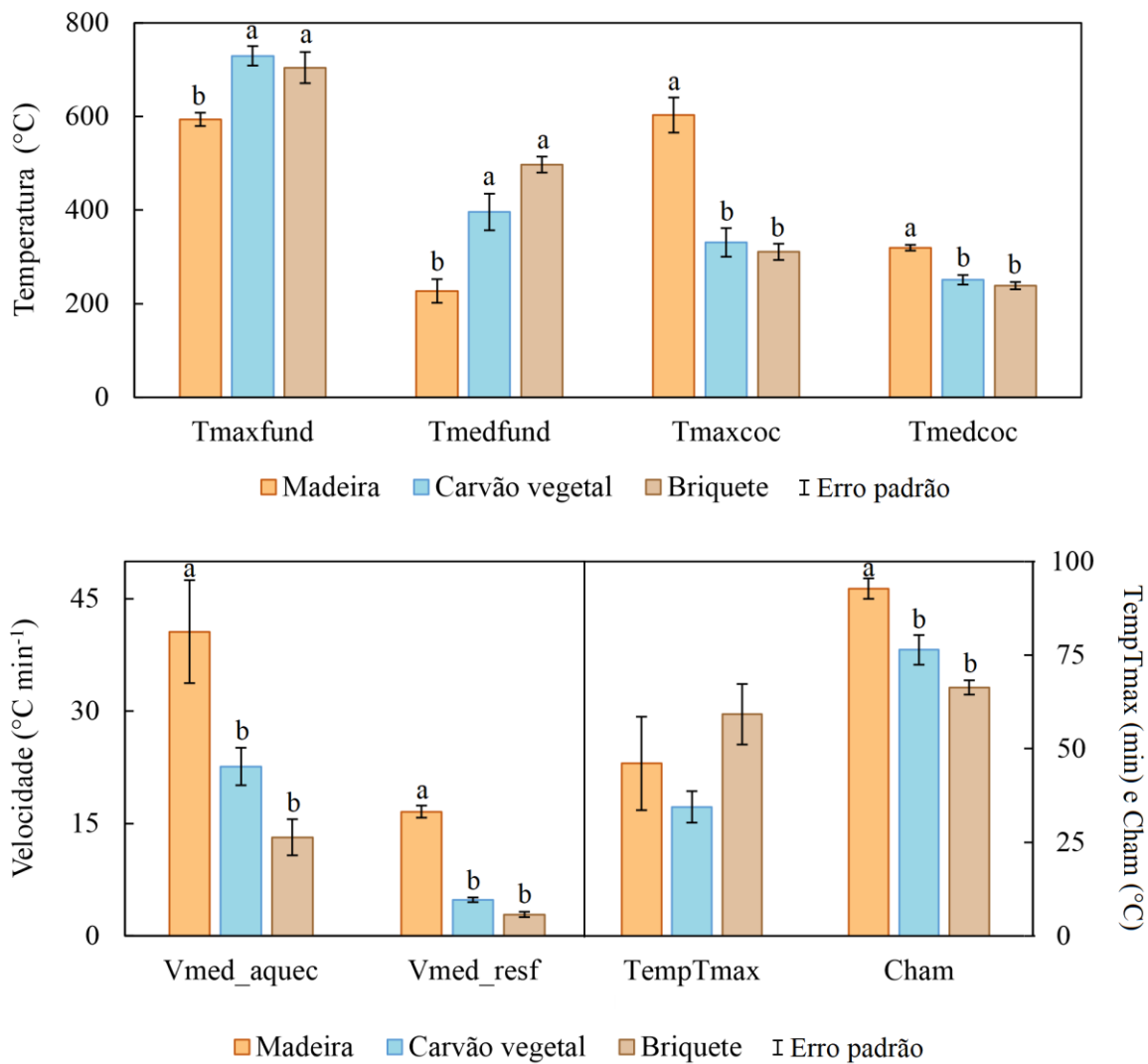


Figura 4. Médias das variáveis extraídas das temperaturas em churrasco.

Médias seguidas de mesma letra, em coluna, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Em que: Tmaxfund = temperatura máxima da área de combustão; Tmedfund = temperatura média da área de combustão; Tmaxcoc = temperatura máxima da área de cocção; Tmedcoc = temperatura média da área de cocção; Vmed_aquec = velocidade média de aquecimento; Vmed_resf = velocidade média de resfriamento; TempTmax = tempo entre a ignição e a temperatura máxima da área de combustão; Cham = temperatura média da chaminé.

A temperatura máxima encontrada na área de combustão foi maior para carvão vegetal e briquete, e menor para madeira, seguindo o mesmo padrão para a temperatura média (Figura 4; APÊNDICE B). Contudo, após a ignição, todos os tratamentos chegaram ao mesmo tempo na temperatura máxima, na média em torno de 47 minutos. A temperatura da área de combustão da churrasqueira corresponde à temperatura da brasa. Esta brasa é o material que fica incandescente, liberando energia em forma de calor constantemente, enquanto as ligações C = C das cadeias aromáticas são quebradas (Jin et al. 2023). Como no carvão vegetal e no briquete o teor de carbono fixo é maior e o carbono presente é um carbono de ligações mais fortes, termicamente mais estáveis (Saravanakumar et al. 2023; Sun et al. 2023), essas biomassas apresentam maior quantidade de material sendo consumida em forma de brasa. Assim, consegue-se atingir maiores temperaturas na área de combustão.

Por ter maiores teores de materiais voláteis em sua composição, com ligações mais simples de C – C , menos estáveis termicamente (Lima et al. 2020; Vieira et al. 2023), a temperatura responde mais rápido ao abastecimento com madeira, atingindo velocidade média de aquecimento superior ao carvão e ao briquete (Figura 4; APÊNDICE B). Entretanto, a correlação entre as variáveis se estende a velocidade de resfriamento (APÊNDICE C), que utilizando madeira é extremamente superior as demais biomassas, justamente por ser rapidamente consumida. Apesar da temperatura máxima da área de combustão ter sido menor na madeira (Figura 4; APÊNDICE B), por possuir chama, a temperatura média da área de cocção acompanha a intensidade da temperatura da área de combustão, o que tornou a temperatura máxima e média de cocção maior na madeira. Em relação ao tempo que permaneceu dentro da faixa de cocção (≥ 190 °C), todas as biomassas foram estatisticamente iguais. Contudo, para manter a temperatura desejada, foi necessário abastecer em média três vezes utilizando madeira como combustível. Assim, no final foram utilizadas, em média, 1,8 kg de madeira, enquanto para briquete e carvão vegetal foi utilizado aproximadamente 1 kg, sem necessidade de abastecimento.

Esta dinâmica de temperatura impacta em vários aspectos da prática de cocção. Preparos em que se deseja temperaturas mais uniformes e controladas, em tecnologias de cocção avançadas, com pouca perda de energia em forma de calor, ou em tecnologias onde o alimento é cozido com circulação de calor em recipientes fechados, carvão vegetal e briquete podem ser biomassas mais atrativas do que madeira. Já em preparo de alimentos que se deseja altas temperaturas, com ajuste de temperatura em curtos períodos por meio do abastecimento, a madeira pode ser a melhor escolha. Um mix iniciando com madeira para atingir altas temperaturas, com um selamento do alimento e, posteriormente carvão ou briquete, para finalizar a cocção, pode ser uma técnica desejável para determinados pratos. São muitas possibilidades. Em termos de dinâmica de cocção, é possível perceber diferenças significativas entre as grelhas presentes na churrasqueira. Enquanto em termos médios, a faixa ideal de cocção (200 °C ± 10) se encontra entre as grelhas 1 e 2 utilizando carvão e briquete, com madeira passa a ser entre as grelhas 2 e 3. Contudo, ao se considerar a variação intrínseca de cada repetição, na prática, temos temperaturas muito elevadas utilizando madeira, enquanto que com carvão e briquete há maior controle da cocção. Essa dinâmica pode impactar diretamente nas características do alimento. Detalhes como fumaça gerada na queima, temperatura alcançada na superfície do alimento, associada a tecnologia de equipamentos de combustão, podem impactar em aspectos químicos e físicos nos alimentos grelhados, alterando sabor, aroma, cor e textura (Arshad et al. 2018; Wall et al. 2019; Bassam et al. 2022; Piochi et al. 2023).

No aspecto visual, admitindo diferentes temperaturas na cocção, como observado neste estudo, o alimento pode adquirir diferentes colorações e dimensões (Wall et al. 2019; Piochi et al. 2023). Casos em que a temperatura é elevada bruscamente, a depender da espessura do alimento, o interior pode não coccionar corretamente, atribuindo um aspecto de cru. O sabor também pode ser impactado, uma vez que o alimento está diretamente exposto a chama, e pode haver modificações que o tornam com sabor amargo (Suleman et al. 2020; Piochi et al. 2023), mascarando o verdadeiro sabor, perceptível pelo consumidor. Com temperaturas mais controladas, como observado no carvão vegetal e no briquete, o alimento pode ter colorações mais suaves, com cozimento apropriado em seu interior, sem que esteja com aspecto de queimado por fora. As emissões de fumaça na cocção também podem deixar o alimento com aspectos sensoriais peculiares, como defumado ou amadeirado (Piochi et al. 2023), ampliado a gama de inspirações culinárias a serem desenvolvidas.

A temperatura da chaminé da churrasqueira, por onde saem os gases da combustão, foi maior quando utilizado madeira como combustível (Figura 4; APÊNDICE B). É importante mencionar que junto com a

fumaça, são transportados componentes maléficos tanto ao ser humano, quanto ao meio ambiente. Compostos cancerígenos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos podem não somente entrar em contato com o alimento diretamente (Suleman et al. 2020; Jin et al. 2023; Zastrow et al. 2023), como também ser liberado no ambiente de cocção, uma vez que a depender da temperatura da fumaça e da tecnologia empregada no equipamento, esta tende a descer e se misturar com o ar ambiente (He et al. 2018; Yan et al. 2020). A temperatura da fumaça conduzida pela chaminé pode, inclusive, ser indicador de emissões específicas, como SO₂ e NO_x (Liu et al. 2023). Estes aspectos são importantes e devem ser levados em consideração quando o assunto é cocção de alimentos em churrasco.

2.3.3. Emissões de efluentes atmosféricos durante o churrasco

Durante todo o processo de cocção, CO, CO₂, NO_x, CH₄, SO₂ e H₂S foram monitoradas. Na Figura 5 é possível observar a distribuição das emissões a medida em que aconteceram os ensaios de cocção.

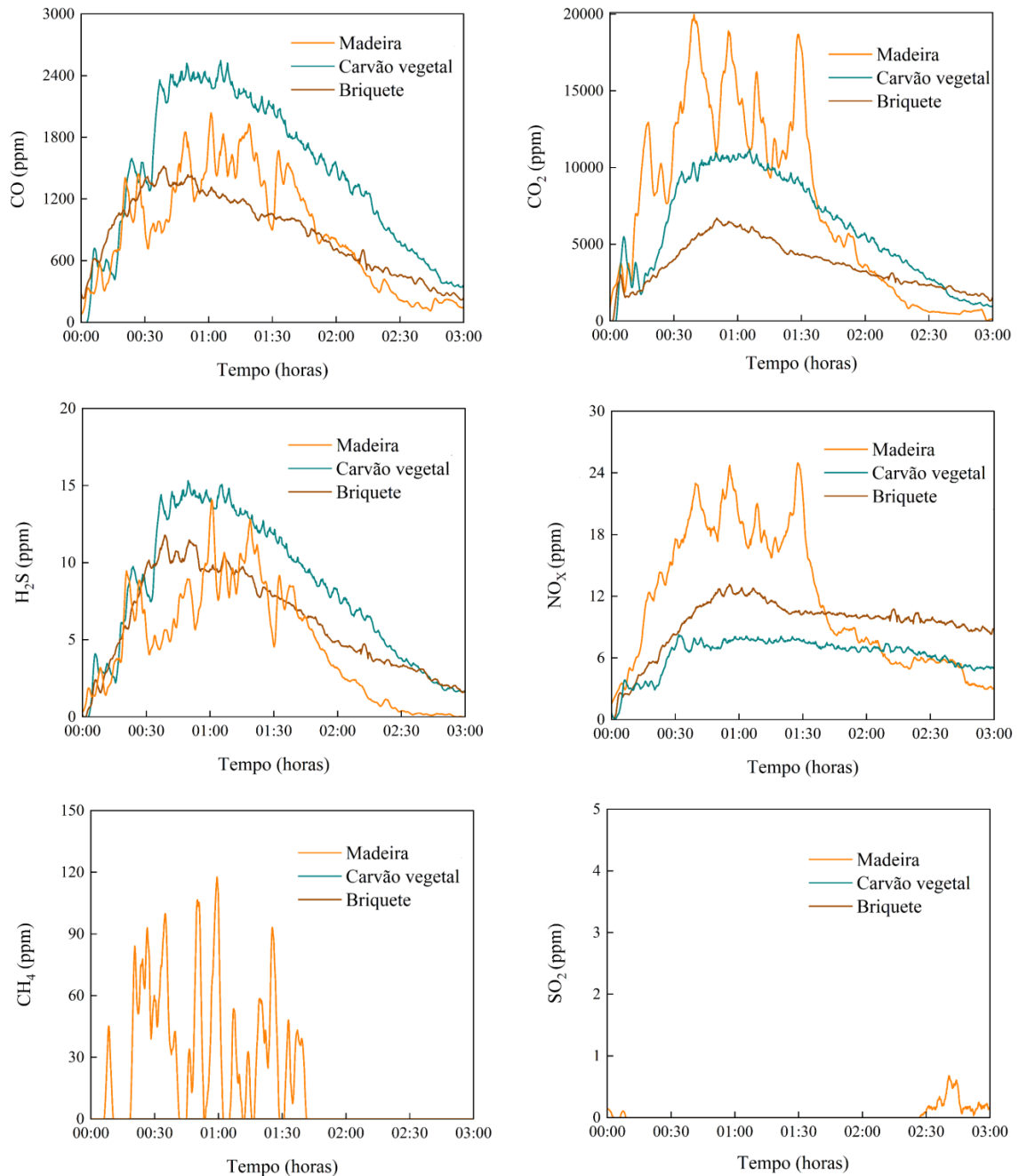


Figura 5. Emissões de efluentes atmosféricos em churrasco.

O CO e o CO₂ são os principais gases oriundos da combustão da biomassa (Hao et al. 2020b, a). Neste estudo, a utilização de carvão vegetal emitiu maiores quantidades de monóxido de carbono ao se comparar com a madeira e briquete. Já a madeira foi a biomassa que mais emitiu dióxido de carbono, seguido de carvão vegetal e briquete (Figura 5; APÊNDICE D). Quando há oxigênio suficiente para reagir de forma completa com o carbono presente, ocorre a liberação de água e dióxido de carbono. Contudo, com a insuficiência de oxigênio na reação, há a liberação de água e monóxido de carbono, em uma combustão incompleta (Hao et al. 2020b, a; Lubwama et al. 2023a). Neste contexto, a queima de todas as biomassas ocorre tanto de forma completa, quanto incompleta, concomitantemente. Contudo, percebe-se uma tendência da combustão na madeira ocorrer de forma

completa, mais eficiente, enquanto que carvão vegetal e briquete, na forma incompleta. De modo geral, madeira emite menos CO do que o carvão por possuir poros maiores, que permitem a fácil difusão do oxigênio do ar para sustentar a combustão completa liberando CO₂ (Lubwama et al. 2023a). Ainda, o maior teor de materiais voláteis da madeira faz com que o material tenha maior liberação inicial de energia, inflamando mais rápido e permitindo a combustão caminhar mais rapidamente para o interior do material (Otieno et al. 2022; Lubwama et al. 2023a, b). A emissão de monóxido de carbono pode estar associada, também, ao teor de carbono fixo, de modo que quanto menor o teor, menor a emissão deste gás (Kim et al. 2022; Lubwama et al. 2023a), assim como observado neste estudo.

Madeira foi a única biomassa que emitiu CH₄. Isso porque a emissão deste gás é vinculada a combustões incompletas, com oxigênio insuficiente, e à degradação de cadeias simples da lignina (Panchenko et al. 2022). No processo de degradação da lignina, que corresponde a cerca de 30% da madeira (Vieira et al. 2023), pode facilmente haver a liberação de grupos metoxila -OCH₃ (Wang et al. 2022), grupos estes que já não existem em carvão vegetal e briquete de carvão, uma vez que o material já passou por um processo térmico, retirando-os do sistema. Com o aumento da temperatura, aumenta-se a quantidade de radicais H, que se associam ao -CH₃, resultando assim na formação de CH₄ (Wang et al. 2022).

Os óxidos de nitrogênio são formados de várias formas, com destaque para o NO_x térmico, NO imediato e pela oxidação do N-combustível, especialmente relevante em combustão de biomassas a temperaturas abaixo de 900 °C (Otieno et al. 2022). Neste estudo, a madeira apresentou maior emissão de NO_x, seguido de briquete e carvão vegetal (APÊNDICE D). Estudos indicam uma correlação significativa entre as emissões de NO_x e o aumento do teor de N-combustível (FELDMIEIER et al., 2021). Neste caso, o nitrogênio é ligado ao combustível como nitrato inorgânico e íon amônio, compostos amino e purinas heterocíclicas (Williams et al. 2012). Além da presença do N no combustível, a taxa de aquecimento e o tamanho das partículas exercem impactos significativos na formação de produtos nitrogenados durante a combustão (Mencarelli et al. 2023). Ju et al. (2020), em estudos com carvão vegetal, encontraram que briquetes emitem quantidades superiores de emissões em relação ao carvão vegetal granulado, devido às diferenças na composição e concentrações de contaminantes presentes nos briquetes. Estes contaminantes podem ser adquiridos em diversas partes do processo de produção, e são perceptíveis pela quantidade de cinzas que possui, como observado neste estudo. A senescência natural das plantas leva a uma redução na quantidade de nitrogênio, de acordo com que é transferido de volta para as raízes ou rizomas. Assim, é possível controlar, em certa medida, as emissões de óxido de nitrogênio através de decisões conscientes sobre a biomassa utilizada, como o momento da colheita, e/ou aplicando tratamentos preliminares para minimizar os compostos nitrogenados de estrutura heterocíclica. Ainda, seleção criteriosa da biomassa e condições de processamento podem modular tais emissões, assim como adequada ventilação pode atenuar as emissões de CO, CO₂, CH₄ e NO_x em processos de combustão de biomassa (Ju et al. 2020).

A madeira foi a única biomassa que apresentou emissões de SO₂, ocorrendo em pouca quantidade no final da combustão, enquanto os teores emitidos de H₂S foram estatisticamente iguais em todos os tratamentos (APÊNDICE D). A liberação de H₂S durante a combustão do combustível é o resultado da redução do SO₂, que é formado devido à oxidação de compostos contendo enxofre no combustível (Otieno et al. 2022; Li et al. 2024). O enxofre é um nutriente importante para o metabolismo das plantas. Normalmente é retirado do solo na forma de sulfato, embora possa ser assimilado a partir do dióxido de enxofre do ar (Li et al. 2024). Contudo, biomassas

tendem a conter pequenas quantidades de enxofre, variando em torno de 0,1 - 0,5% da massa seca (Li et al. 2024).

Embora dentro das regulamentações vigentes (EPA 2015; OJEU 2015), as emissões gasosas têm impactos diretos na poluição do ar e na saúde humana, além de contribuírem para o aquecimento global. Indiretamente, afetam ecossistemas, produtividade agrícola e setores socioeconômicos. O que se percebe, de modo geral, é que cada biomassa possui sua especificidade em propriedades e respostas no desempenho energético e de emissões (Figura 6).

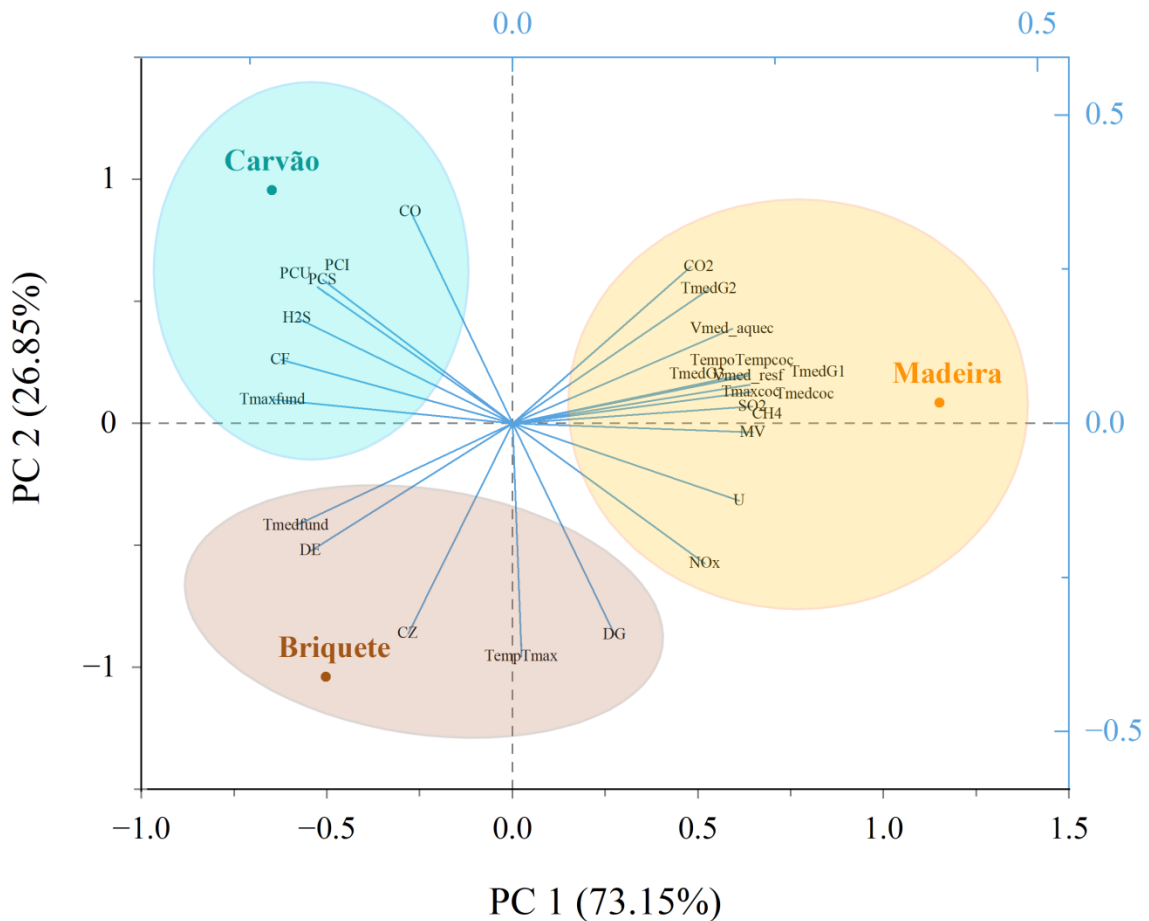


Figura 6. Análise dos componentes principais das características de combustão das biomassas utilizadas em cocção.

Em que: MV = materiais voláteis; CZ = cinzas; CF = carbono fixo; DG = densidade a granel; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico útil; DE = densidade energética; Tmaxfund = temperatura máxima da área de combustão; Tmedfund = temperatura média da área de combustão; TempTmax = tempo entre a ignição e a temperatura máxima da área de combustão; Vmed_aquec = velocidade média de aquecimento; Vmed_resf = velocidade média de resfriamento; Tmaxcoc = temperatura máxima da área de cocção; Tmedcoc = temperatura média da área de cocção; TempoTempcoc = tempo em que a temperatura ficou dentro da ideal para cocção nas grelhas (> 190 °C); TmedG1 = temperatura média na grelha 1; TmedG2 = temperatura média na grelha 2; TmedG3 = temperatura média na grelha 2; Cham = temperatura média da chaminé. (): erro padrão.

A madeira possui teores elevados de materiais voláteis, fazendo com que sua velocidade de aquecimento seja extremamente elevada. Sua velocidade de resfriamento segue o mesmo princípio, sendo

necessário o abastecimento várias vezes para manter a temperatura constante. Sua estrutura química, principalmente no que pertencente a holocelulose, contribui para que as emissões de gases importantes sejam elevadas, como NO_x , CO_2 e CO .

Como o carvão vegetal é uma biomassa que passou por um processo que praticamente degrada toda a holocelulose do sistema (de Paula Protásio et al. 2022), este possui menos emissões comparada a madeira. Contudo, é um material que possui maior parte da combustão na forma incompleta, o que faz com que a emissão de CO seja elevada. Em termos energéticos, possui carbono fixo concentrado em grande quantidade, o que permite uma queima mais uniforme e controlada, sem necessidade de abastecimento para manter a temperatura estável. Assim como o briquete, consegue atingir temperaturas mais elevadas que a madeira. Briquete, apesar de possuir menor quantidade de energia por unidade de massa, possui elevada densidade, o que torna sua densidade energética maior que as outras biomassas. Suas características energéticas se assemelham ao carvão vegetal, uma vez que esta biomassa é matéria prima majoritária da composição do produto, mas com benefício de ser compacto. Apesar do elevado teor de cinzas, suas emissões ficam em níveis inferiores aos das outras biomassas avaliadas neste estudo.

2.3.4. Aplicações práticas e políticas públicas

O churrasco é uma prática extremamente apreciada no mundo, e entender as variáveis que interferem no processo de cocção é fundamental. A madeira, quando escolhida como fonte de energia para o churrasco, fornecerá altas temperaturas na área de cocção, por curtos períodos de tempo, sendo necessário abastecer periodicamente. As elevadas emissões decorrentes do uso, faz com que essa biomassa tenha importância ambiental, social e culinária, principalmente por ter o potencial de transferir características associados a defumação ao alimento a ser coccionado. Associado a isso, é importante entender que os HPAs provenientes da combustão incompleta da biomassa, ou de gotejamento de gordura dos alimentos na biomassa, podem ser transferidos para o alimento (Roseiro et al. 2024). E por serem compostos cancerígenos, possuem potencial direto de causar malefícios a saúde humana. Carvão e briquete são as biomassas mais interessantes para métodos de cocção em que se deseja temperaturas mais controladas, com emissões inferiores, principalmente quando utilizado o briquete.

No atual panorama global, a busca por soluções sustentáveis tornou-se uma prioridade inegável. Nesse contexto, a análise do uso de biomassas como fonte de energia não apenas desperta interesse pelo seu potencial energético, mas também pelas implicações socioambientais, especialmente no que diz respeito ao churrasco. O estudo detalhado das propriedades e desempenho das biomassas, como madeira, carvão vegetal e briquete, não apenas revela suas características intrínsecas, mas também abre portas para uma reflexão mais profunda sobre suas aplicações práticas, impactos na culinária e políticas públicas. Dessa forma, entender a dinâmica incorporada ao uso de diferentes biomassas contribui diretamente para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), sendo eles: 3 – saúde bem-estar; 7 – energia limpa e acessível; 12 – consumo e produção responsáveis e; 13- ação contra mudança global do clima.

Ao refletirmos sobre as aplicações práticas dos resultados encontrados neste estudo, é crucial considerar não apenas a eficiência energética, mas também os impactos sociais e ambientais no churrasco. Por

exemplo, estratégias de incentivo à produção e uso de briquetes, com sua densidade energética superior e menores emissões de gases poluentes, podem contribuir para uma culinária mais sustentável. No entanto, é essencial garantir que esses incentivos sejam acessíveis e equitativos, beneficiando não apenas estabelecimentos comerciais, mas também comunidades locais e grupos vulneráveis. Mais esforços devem ser empregados em estudos que envolvam (1) avaliação sensorial do alimento grelhado com diferentes biomassas, (2) influência da biomassa nas propriedades químicas e físicas do alimento e (3) análise de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) nos alimentos coccionados em diferentes biomassas.

2.4. Conclusões

Dentre as biomassas avaliadas, briquete possui características mais interessantes do ponto de vista energético e de emissões, seguida de briquete de carvão vegetal e madeira. Apesar de o carvão vegetal ser a matéria prima para a produção do briquete, a densificação faz com que se obtenha maior quantidade de energia em menor volume, trazendo eficiência para a combustão. A madeira, apesar de elevar a temperatura da área de cocção de forma rápida, seu resfriamento rápido, que exige constante abastecimento, e as elevadas emissões associadas, faz com que esta biomassa seja indicada apenas em casos específicos, em que estas características beneficiam a experiência sensorial desejada na cocção.

Referências

- Ali A, Kumari M, Manisha, et al (2024) Insight into the Biomass-Based Briquette Generation from Agro-Residues: Challenges, Perspectives, and Innovations. *BioEnergy Research* 2024 1–41. <https://doi.org/10.1007/S12155-023-10712-5>
- Ansari KB, Kamal B, Beg S, et al (2021) Recent developments in investigating reaction chemistry and transport effects in biomass fast pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150:111454. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111454>
- Arshad MS, Sohaib M, Ahmad RS, et al (2018) Ruminant meat flavor influenced by different factors with special reference to fatty acids. *Lipids in Health and Disease* 2018 17:1 17:1–13. <https://doi.org/10.1186/S12944-018-0860-Z>
- ASTM (2021) D1762-84: standard test method for chemical analysis of wood charcoal – ASTM International. West Conshohocken, PA, USA
- ASTM (2017) D5057-17: standard test method for screening apparent specific gravity and bulk density of waste. West Conshohocken, PA, USA
- Barbosa AD, Alexandre B, Tondo EC, Malheiros P da S (2022) Microbial survival in gourmet hamburger thermally processed by different degrees of doneness. *Int J Gastron Food Sci* 28:100501. <https://doi.org/10.1016/J.IJGFS.2022.100501>
- Bassam SM, Noleto-Dias C, Farag MA (2022) Dissecting grilled red and white meat flavor: Its characteristics, production mechanisms, influencing factors and chemical hazards. *Food Chem* 371:131139. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131139>

- Begum N, Raza A, Shen D, et al (2020) Sensory attribute and antioxidant capacity of Maillard reaction products from enzymatic hydrolysate of bovine bone marrow extract. *J Food Sci Technol* 57:1786–1797. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-04212-8/FIGURES/4>
- de Paula Protásio T, da Costa JS, Scatolino M V., et al (2022) Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19:4491–4508. <https://doi.org/10.1007/S13762-021-03416-W/FIGURES/7>
- Dias Júnior AF, Andrade CR, Lana AQ, et al (2021) Tips on the variability of BBQ charcoal characteristics to assist consumers in product choice. *European Journal of Wood and Wood Products* 79:. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01659-5>
- Dias Junior AF, Esteves RP, Silva ÁM, et al (2020) Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. *European Journal of Wood and Wood Products* 78:193–204. <https://doi.org/10.1007/S00107-019-01489-6/FIGURES/10>
- DIN (2010) EN 14918: Determination of calorific value - Deutsches Institut Für Normung. CEN, Berlin
- Donato DB, Simões Da Silva CM, Alves De Magalhães M, et al (2015) Propriedades de briquetes obtidos de finos de carvão vegetal. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)* 6:107–111. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p107-111>
- EPA (2015) (United States Environmental Protection Agency) Standard of Performance for New Residential Wood Heaters. In: “New Residential Hydronic Heaters and Forced-Air Furnaces” 40 CFR Part 60
- Hao H, Chow CL, Lau D (2020a) Effect of heat flux on combustion of different wood species. *Fuel* 278:118325. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.118325>
- Hao H, Chow CL, Lau D (2020b) Carbon monoxide release mechanism in cellulose combustion using reactive forcefield. *Fuel* 269:117422. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.117422>
- He L, Xu Z, Chen H, et al (2018) Analysis of entrainment phenomenon near mechanical exhaust vent and a prediction model for smoke temperature in tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology* 80:143–150. <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2018.06.011>
- Huang Z, Ma Y, Zhan X, et al (2023) Composition of inorganic elements in fine particulate matter emitted during surface fire in relation to moisture content of forest floor combustibles. *Chemosphere* 312:137259. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137259>
- IBGE (2022) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Combustível utilizado na preparação de alimentos - Lenha ou carvão. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6739#resultado>. Accessed 8 Aug 2022
- Jin H, Yuan W, Li W, et al (2023) Combustion chemistry of aromatic hydrocarbons. *Prog Energy Combust Sci* 96:101076. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2023.101076>
- Ju YM, Jeong H, Chea KS, et al (2020) Evaluation of the Amount of Gas Generated through Combustion of Wood Charcoal and Agglomerated Charcoal Depending on Air Ventilation. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 48:847–860. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.6.847>
- Kajumba PK, Okello D, Nyeinga K, Nydal OJ (2022) Assessment of the energy needs for cooking local food in Uganda: A strategy for sizing thermal energy storage with cooker system. *Energy for Sustainable Development* 67:67–80. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2022.01.005>

- Karangwa E, Zhang X, Murekatete N, et al (2015) Effect of substrate type on sensory characteristics and antioxidant capacity of sunflower Maillard reaction products. *European Food Research and Technology* 240:939–960. <https://doi.org/10.1007/S00217-014-2398-2/FIGURES/5>
- Kim Y, Park T, Hong D (2022) Heating and emission characteristics of briquettes developed from spent coffee grounds. *Environmental Engineering Research* 27:. <https://doi.org/10.4491/EER.2021.063>
- Lee YJ, Park JH, Song GS, et al (2018) Characterization of PM_{2.5} and gaseous emissions during combustion of ultra-clean biomass via dual-stage treatment. *Atmos Environ* 193:168–176. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2018.09.011>
- Li L, Sun G, Qi W, et al (2024) NO_x and SO₂ emission of oxygen carrier aided combustion in fluidized bed. *Journal of the Energy Institute* 112:101463. <https://doi.org/10.1016/J.JOEL.2023.101463>
- Liang M, Lu W, Lei P, et al (2020) Physical and Combustion Properties of Binder-Assisted Hydrochar Pellets from Hydrothermal Carbonization of Tobacco Stem. *Waste Biomass Valorization* 11:6369–6382. <https://doi.org/10.1007/S12649-019-00848-X/FIGURES/7>
- Lima MDR, Patrício EPS, Barros Junior U de O, et al (2020) Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass Bioenergy* 140:105660. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105660>
- Liu Y, Li Z, Floess E, et al (2023) Field assessment of straw pellet combustion in improved heating stoves in rural Northeast China. *Journal of Environmental Sciences* 127:295–307. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2022.05.046>
- Lubwama M, Yiga VA, Lubwama HN, et al (2023a) Emissions and emission factors for *Dichrostachys cinerea*, *Morus Lactea*, *Piliostigma thonningii*, *Combretum molle*, and *Albizia grandibracteata* firewood species and their charcoals. *Biomass Convers Biorefin* 1:1–13. <https://doi.org/10.1007/S13399-023-04005-2/TABLES/4>
- Lubwama M, Yiga VA, Ssempijja I, Lubwama HN (2023b) Thermal and mechanical characteristics of local firewood species and resulting charcoal produced by slow pyrolysis. *Biomass Convers Biorefin* 13:6689–6704. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01840-Z/FIGURES/8>
- Marreiro HMP, Peruchi RS, Lopes RMBP, et al (2021) Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies* 2021, Vol 14, Page 8320 14:8320. <https://doi.org/10.3390/EN14248320>
- Mencarelli A, Greco R, Balzan S, et al (2023) Charcoal-based products combustion: Emission profiles, health exposure, and mitigation strategies. *Environmental Advances* 13:100420. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2023.100420>
- Míguez JL, Porteiro J, Behrendt F, et al (2021) Review of the use of additives to mitigate operational problems associated with the combustion of biomass with high content in ash-forming species. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141:110502. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110502>
- OJEU (2015) (Official Journal of the European Union) COMMISSION REGULATION (EU) 2015/1188 of 28 April 2015

- Oladosu KO, Babalola SA, Kareem MW, et al (2023) Optimization of fuel briquette made from bi-composite biomass for domestic heating applications. *Sci Afr* 21:e01824. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01824>
- Oliveira PRS, Trugilho PF, Oliveira TJP (2022) Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality. *Environmental Science and Pollution Research* 29:8549–8558. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-15847-6/FIGURES/4>
- Otieno AO, Home PG, Raude JM, et al (2022) Heating and emission characteristics from combustion of charcoal and co-combustion of charcoal with faecal char-sawdust char briquettes in a ceramic cook stove. *Heliyon* 8:e10272. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E10272>
- Padhi A, Bansal M, Habib G, et al (2022) Physical, chemical and optical properties of PM_{2.5} and gaseous emissions from cooking with biomass fuel in the Indo-Gangetic Plain. *Science of The Total Environment* 841:156730. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156730>
- Panchenko V, Kumar NM, Vasant P, et al (2022) Evaluation of Greenhouse Gas Emission Levels during the Combustion of Selected Types of Agricultural Biomass. *Energies* 2022, Vol 15, Page 7335 15:7335. <https://doi.org/10.3390/EN15197335>
- Piochi M, Cabrino G, Torri L (2023) Effects of different woods in barbecuing: Consumers' sensory perception and liking of grilled chicken meat. *Food Research International* 163:112295. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.112295>
- R Core Team (2023) R: A Language and Environment for Statistical Computing
- Ronix A, Cazetta AL, Ximenez GR, et al (2021) Biochar from the mixture of poultry litter and charcoal fines as soil conditioner: Optimization of preparation conditions via response surface methodology. *Bioresour Technol Rep* 15:100800. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2021.100800>
- Roseiro C, Gonçalves H, Santos C (2024) Incidence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Portuguese Traditional Dry Smoked Meat Products Manufactured at Home for Self-Consumption and by Micro Industrial Plants. *Polycycl Aromat Compd* 44:1011–1018. <https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2185266>
- Saravanakumar A, Vijayakumar P, Hoang AT, et al (2023) Thermochemical conversion of large-size woody biomass for carbon neutrality: Principles, applications, and issues. *Bioresour Technol* 370:128562. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128562>
- Song B, Cooke-Willis M, Theobald B, Hall P (2021) Producing a high heating value and weather resistant solid fuel via briquetting of blended wood residues and thermoplastics. *Fuel* 283:119263. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119263>
- Suleman R, Hui T, Wang Z, et al (2020) Comparative analysis of charcoal grilling, infrared grilling and superheated steam roasting on the colour, textural quality and heterocyclic aromatic amines of lamb patties. *Int J Food Sci Technol* 55:1057–1068. <https://doi.org/10.1111/IJFS.14388>
- Sun M, Wang Q, Di H (2023) A review of lignocellulosic biomass-based shape-stable composite phase change materials. *J Energy Storage* 73:109114. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.109114>

- Tambunan H, Nuryawan A, Iswanto AH, et al (2023) Briquettes Made of Branches Wood of Three Mangrove Species Bonded by Starch Adhesive. *Materials* 2023, Vol 16, Page 5266 16:5266. <https://doi.org/10.3390/MA16155266>
- Vieira TAS, Trugilho PF, Carabineiro SAC, et al (2023) Impact of Chemical Composition on Eucalyptus Wood Clones for Sustainable Energy Production. *Forests* 2023, Vol 14, Page 2240 14:2240. <https://doi.org/10.3390/F14112240>
- Wall KR, Kerth CR, Miller RK, Alvarado C (2019) Grilling temperature effects on tenderness, juiciness, flavor and volatile aroma compounds of aged ribeye, strip loin, and top sirloin steaks. *Meat Sci* 150:141–148. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.11.009>
- Wang L, Fang Y, Yin J, et al (2022) Fast pyrolysis of guaiacyl-syringyl (GS) type milled wood lignin: Product characteristics and CH₄ formation mechanism study. *Science of The Total Environment* 838:156395. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156395>
- Wang S, Wan Z, Han Y, et al (2023) A review on lignin waste valorization by catalytic pyrolysis: Catalyst, reaction system, and industrial symbiosis mode. *J Environ Chem Eng* 11:109113. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.109113>
- Warnes A (2008) *Savage Barbecue: Race, Culture, and the Invention of America's First Food*. Georgia
- Williams A, Jones JM, Ma L, Pourkashanian M (2012) Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Prog Energy Combust Sci* 38:113–137. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2011.10.001>
- Wright J, Treuille E (2017) *Le Cordon Bleu : Todas as técnicas culinárias*, 1st edn.
- Yan G, Wang M, Yu L, et al (2020) Effects of ambient pressure on smoke movement patterns in vertical shafts in tunnel fires with natural ventilation systems. *Build Simul* 13:931–941. <https://doi.org/10.1007/S12273-020-0631-4/METRICS>
- Yang L, Zheng J, Huang N (2022) The Characteristics of Moisture and Shrinkage of *Eucalyptus urophylla* × *E. Grandis* Wood during Conventional Drying. *Materials* 2022, Vol 15, Page 3386 15:3386. <https://doi.org/10.3390/MA15093386>
- Yashwanth BL, Shotorban B, Mahalingam S, et al (2016) A numerical investigation of the influence of radiation and moisture content on pyrolysis and ignition of a leaf-like fuel element. *Combust Flame* 163:301–316. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2015.10.006>
- Zastrow L, Albert C, Speer K, et al (2023) Formation of pyrolysis-affected PAHs, oxygenated PAHs and MCPDs in home smoked meat. *LWT* 184:114971. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.114971>
- Zhang Y, Matsuoka T, Nakamura Y (2024) Experimental study on flame spreading over locally wetted thin combustibles. *Combust Flame* 261:113319. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2024.113319>

3. USO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS DA BIOMASSA E SEUS EFEITOS SOBRE A COCÇÃO DO ALIMENTO GRELHADO EM CHURRASCO

Resumo

O churrasco é uma prática popular apreciada em todo o mundo. No entanto, o tipo de combustível utilizado pode influenciar as propriedades dos alimentos grelhados e na saúde humana. Este estudo investiga os impactos do uso de diferentes combustíveis da biomassa (madeira, carvão vegetal e briquete de carvão) nas características dos alimentos. As biomassas foram caracterizadas pelos testes de umidade, densidade à granel, análise imediata, poder calorífico e densidade energética. Uma churrasqueira foi desenvolvida e extraídas temperaturas médias e máximas, velocidade de aquecimento e resfriamento da combustão. Para os testes de cocção de dez minutos, acima de 190 °C, foi utilizada carne bovina moída, corte acém, padronizadas em dimensões e massa. Foram realizadas análises de umidade, teor de lipídios, proteínas, carboidratos, quantificação de energia, pH, cor, percentual de encolhimento e rendimento na churrasqueira. A quantificação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) foi feita por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), identificando 16 tipos de HPAs. Os dados foram analisados por meio da estatística uni e multivariada de componentes principais (PCA). Com o churrasco, a umidade da carne diminuiu em cerca de 16%, enquanto o teor de proteína aumentou em 47%, independente da biomassa utilizada. O teor de cinzas aumentou, com valores mais elevados na carne grelhada utilizando madeira como combustível. A madeira proporcionou uma temperatura mais elevada na área de cocção, resultando em uma carne com coloração mais avermelhada, menos lipídios e maior concentração de HPAs em comparação com o carvão vegetal e o briquete. Estes últimos apresentaram uma temperatura mais homogênea durante o processo de cocção, resultando em uma coloração mais amarelada da carne, mantendo maior quantidade de lipídios e menor quantidade de HPAs.

Palavras-chave: 1. Combustão da biomassa; 2. Segurança do alimento; 3. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos; 4. Temperatura da cocção; 5. Churrasqueira.

Abstract

Barbecue is a popular practice enjoyed worldwide. However, the type of fuel used can influence the properties of grilled foods and human health. This study investigates the impacts of using different biomass fuels (wood, charcoal, and charcoal briquette) on food characteristics. The biomass fuels were characterized by tests for moisture content, bulk density, proximate analysis, calorific value, and energy density. A barbecue grill was developed, and average and maximum combustion temperatures, combustion heating and cooling rates were extracted. For the ten-minute grilling tests, above 190°C, ground beef, cut acem, standardized in dimensions and mass were used. Analyses of moisture, lipid content, proteins, carbohydrates, energy quantification, pH, color, shrinkage percentage, and yield were conducted. The quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) was performed using high-performance liquid chromatography (HPLC), identifying 16 types of PAHs. The data were analyzed using uni and multivariate principal component analysis (PCA). With barbecue, the moisture content of the meat decreased by about 16%, while the protein content increased by 47%, regardless of the biomass used. The ash content increased, with higher values in grilled meat using wood as fuel. Wood provided a higher temperature in the cooking area, resulting in meat with a more reddish color, fewer lipids, and a higher concentration of PAHs compared to charcoal and charcoal briquette. The latter two showed a more homogeneous temperature during the cooking process, resulting in a more yellowish color of the meat, while maintaining a higher quantity of lipids and a lower quantity of PAHs.

Keywords: 1. Biomass combustion; 2. Food safety; 3. Polycyclic aromatic hydrocarbons; 4. Cooking temperature; 5. Barbecue grill.

3.1. Introdução

O churrasco, uma das formas mais antigas e populares de preparar alimentos em todo o mundo, é uma prática culinária que vai muito além de simplesmente grelhar carne sobre o calor de uma churrasqueira. Além do sabor característico e da atmosfera de confraternização que o acompanha, o churrasco é uma manifestação cultural que varia de região para região, influenciada por tradições locais, preferências culinárias e disponibilidade de recursos (Warnes 2008). No entanto, o que muitas vezes não é considerado durante esse ritual gastronômico é o impacto que o tipo de combustível utilizado na churrasqueira pode ter sobre as propriedades físicas e químicas dos alimentos grelhados, e até mesmo os potenciais riscos na saúde humana. A escolha da biomassa como combustível no churrasco pode causar câncer (Barbosa et al. 2023). E esse é um importante aspecto que deve ser levado em consideração.

As opções mais comuns de combustíveis utilizados para o preparo de churrascos incluem madeira, carvão vegetal e briquete de carvão, cada uma com características únicas de combustão (Ignacio et al. 2019; Dias Junior et al. 2020), que podem influenciar de maneira significativa as propriedades finais dos alimentos grelhados. Além disso, o processo de cocção em uma churrasqueira não se limita apenas à aplicação de calor, mas também envolve a exposição dos alimentos à fumaça gerada durante a queima do combustível. Essa fumaça, por sua vez, contém uma série de compostos químicos que podem interagir com os alimentos e alterar suas características sensoriais e nutricionais (Arshad et al. 2018; Bassam et al. 2022).

A escolha do tipo de biomassa utilizada no preparo do churrasco não apenas afeta as propriedades organolépticas do alimento (Bassam et al. 2022), mas também tem impactos energéticos significativos. A madeira, por exemplo, é uma das opções mais tradicionais e amplamente utilizadas para cocção, devido à sua facilidade de acesso e ao seu potencial de fornecer altas temperaturas em um tempo relativamente rápido (Saravanakumar et al. 2023; Vieira et al. 2023). No entanto, a queima de madeira para cocção gera uma quantidade significativa de fumaça e emissões, incluindo Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) (Roseiro et al. 2024), que podem representar um risco à saúde humana. Estudos têm demonstrado que a exposição a HPAs pode estar relacionada ao desenvolvimento de doenças crônicas, como câncer (Barbosa et al. 2023). A formação de HPAs durante o processo de cocção de alimentos está relacionada à combustão incompleta da biomassa e à exposição dos alimentos à fumaça gerada durante esse processo (Wang et al. 2022). Além disso, a presença de gordura nos alimentos pode aumentar a formação de HPAs, uma vez que gotículas de gordura em contato com a chama podem levar à combustão incompleta e à formação desses compostos carcinogênicos (Xu et al. 2023).

Neste contexto, torna-se fundamental compreender os efeitos do uso de diferentes combustíveis de biomassa no processo de cocção de alimentos em churrascos. A análise detalhada desses efeitos não apenas nos permite entender melhor as transformações que ocorrem nos alimentos durante o preparo, mas também nos ajuda a avaliar os potenciais riscos à saúde associados ao consumo de alimentos grelhados. Este estudo tem como objetivo investigar os impactos do uso de diferentes combustíveis de biomassa (madeira, carvão vegetal e briquete de carvão) sobre as características do alimento grelhado em churrasco. Espera-se fornecer insights

importantes para a promoção de práticas culinárias mais seguras, sustentáveis e saudáveis no contexto do preparo de churrascos.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Caracterização da biomassa e desempenho energético da cocção do alimento em churrasco

Os materiais para este estudo (madeira de *Eucalyptus* spp., carvão vegetal e briquete de carvão vegetal) foram obtidos e caracterizados de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 2 deste documento. Para este estudo, foi desenvolvida uma churrasqueira, conforme a Figura 1. O sistema foi constituído por seis termopares: um localizado na área de combustão, um em cada nível da grelha móvel e dois na chaminé. A distância entre a grelha e a base do equipamento que contém a biomassa foi fixada em 20, 25 e 30 centímetros, permitindo ajustes conforme a temperatura desejada para a cocção. Isso possibilitou a análise das temperaturas máximas e médias, o tempo necessário para atingir a temperatura máxima, a velocidade média de aquecimento, a velocidade média de resfriamento, o tempo que as grelhas permaneceram com temperatura de cocção ($> 190\text{ }^{\circ}\text{C}$), a necessidade de abastecimento e a quantidade de combustível utilizada.

Assim, foram realizados testes de cocção em churrasco de um alimento proteico de origem bovina. Cada teste teve a duração de três horas e o alimento foi adquirido em uma única casa de carnes. O corte utilizado foi o acém, comumente empregado no preparo de hambúrgueres gourmet (Barbosa et al. 2022). Os hambúrgueres tiveram suas dimensões, espessuras e massas padronizadas de acordo com a metodologia de Barbosa et al. (Barbosa et al. 2022). Foram moldados em um aro de alumínio com $9,0 \pm 0,2$ cm de diâmetro e $2,0 \pm 0,4$ cm de espessura, resultando em massa de aproximadamente $100,0 \pm 2,0$ g. A utilização de hambúrgueres foi importante para homogeneizar o processo de cocção, uma vez que o uso de peças inteiras de cortes específicos poderia interferir no experimento, comprometendo o controle local.

A cocção da carne bovina teve início quando a temperatura da primeira grelha atingiu $190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hambúrgueres crus ($10 \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) foram colocados na grelha mais próxima possível da temperatura de $200 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wright and Treuille 2017). Foi estabelecido um tempo de cocção de dez minutos (cinco minutos para cada lado), até que os hambúrgueres atingissem uma temperatura de $71 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ no centro geométrico de cada peça, medida com um termômetro digital culinário, seguindo as orientações descritas por Gayler (Gayler 2010), Wright e Treuille (2017) e Barbosa et al. (2022).

3.2.2. Análises físico-químicas e tecnológicas de carne grelhada

Essa etapa foi realizada com o intuito de caracterizar as amostras e compará-las entre si quanto às propriedades estudadas.

a) Umidade: A umidade das carnes foi determinada por gravimetria após secagem em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, utilizando-se 10 g de amostra de acordo com o método número 012/IV do Instituto Adolfo Lutz (IAL 2008a).

b) Teor de lipídios: O teor de lipídios das carnes foi determinado pelo método de extração direta em *soxhlet*, descrito pelo IAL (2008a), utilizando-se éter de petróleo como solvente.

c) Teor de proteínas: Para determinação do teor de proteínas nas carnes, foi utilizado o método de Kjeldahl modificado (IAL 2008a) em digestor de proteína Kjeldahl.

d) Teor de carboidratos: O conteúdo de carboidratos das carnes foi determinado por diferença, calculando-se o total de água, proteínas, lipídios e cinzas e subtraindo os valores totais de 100 (AOAC 1997).

e) Quantificação de energia: Para a quantificação de energia das carnes, o teor de cada nutriente foi multiplicado pelo valor energético por grama que fornece: 4 kcal g⁻¹ para carboidratos, 4 kcal g⁻¹ para proteínas e 9 kcal g⁻¹ para lipídios (BRASIL 2003).

g) Análise de pH: A análise de pH foi realizada com base no método 017/IV do Instituto Adolfo Lutz (IAL 2008b). Uma amostra de 10 g de cada tratamento foi diluída em 100 ml de água destilada, sendo depois agitada em agitador magnético. Em seguida, foi feita a leitura do pH em potenciômetro digital.

h) Cor instrumental: A análise de cor das carnes foi realizada utilizando-se colorímetro em sistema tridimensional L*, a* e b*, em que L* ou luminosidade varia do preto ao branco, a* de verde a vermelho e b* de azul a amarelo (Gonnet 1998; Caner and Aday 2009). Foram medidos ainda os valores de C*, que indica a saturação de cor do produto e h°, que indica o ângulo de tonalidade cromática, determinando a qualidade da cor (Ramos and Gomide 2007).

i) Porcentagem de encolhimento: Para análise do percentual de encolhimento das carnes, amostras de carne crua tiveram seu diâmetro medido com paquímetro, sendo, em seguida, cozidas ou grelhadas de acordo com a tecnologia investigada. Após o preparo das carnes, o diâmetro foi novamente aferido. Os resultados foram encontrados utilizando-se a Equação 3 (BERRY 1992).

$$\% \text{ encolhimento} = \frac{\varnothing \text{ inicial da amostra} - \varnothing \text{ da amostra após cocção}}{\varnothing \text{ inicial da amostra}} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: \varnothing = diâmetro (em mm).

j) Rendimento na cocção: O rendimento das carnes na cocção foi calculado utilizando-se a massa da amostra antes e após a cocção (Equação 4) (BERRY 1992).

$$\% \text{ rendimento na cocção} = \frac{\text{massa da amostra após cocção (g)}}{\text{massa inicial da amostra (g)}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

3.2.3. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Foi realizada a quantificação de 16 HPAs (naftaleno-NAP; acenaftileno-ACY, acenafteno-ACE, fluoreno-FLR, fenantreno-PHE, antraceno-ANT, fluoranteno-FLT, pireno-PYR, benzo[a]antraceno-BaA, criseno-CHR, benzo[b]fluoranteno-BbF, benzo[k]fluoranteno-BkF, benzo[a]pireno-BaP, dibenzo[a,h]antraceno-DhA, benzo[g,h,i]perileno-BgP, indeno[1,2,3-cd]pireno-IcP) por meio da cromatografia líquida de alta eficiência

(HPLC) de fase reserva de acordo com Roseiro et al. (2011). Dez gramas de amostra foram homogeneizadas e saponificadas com uma mistura de hidróxido de potássio, metanol e água (11,2:90:10, p:v:v) durante três horas sob refluxo. Após foi adicionado 100 mL de mistura metanol e água (8:2, v/v) e em seguida os HPAs foram extraídos 4 vezes com 50 mL de n-hexano. Os extratos foram combinados e adicionado 100 mL de solução aquosa de Na_2WO_4 a 10% (p/v).

O extrato foi seco sobre Na_2SO_4 anidro e evaporado até o volume de 1 mL utilizando um sistema de evaporador rotativo (Laborata 4001, Heidolph) a 70 °C. Posteriormente, o extrato concentrado foi aplicado em coluna Florisil (Sep-Pak Plus Florisil, Waters) e eluído com 165 mL de n-hexano. Após a evaporação até a secagem, o resíduo foi dissolvido em 3 mL de metanol e através de uma membrana Acrodisc 25 mm GHP, GF 0,45 μm (Waters) antes da injeção no sistema cromatográfico.

Os HPAs foram separados utilizando um sistema de HPLC composto por um módulo de separação (Waters 2695, Waters), um detector de fluorescência – FLD (Waters 2475 Multi λ Fluorescence, Waters) e um detector UV/VIS (Waters 2487 Dual λ Absorbance detector, Waters). A separação foi realizada em uma coluna analítica PAH C18 de fase reversa, S-5 μm ; 250 x 3,0 mm (Waters), em temperatura ambiente, utilizando um programa de eluição gradiente com mistura de acetonitrila e água, o qual inicia com 20% de acetonitrila por 1 min, atingindo 56% em 5 min e 100% em 30 min sob uma taxa de fluxo de 0,5 mL min^{-1} . Para a determinação dos HPAs os seguintes parâmetros de detecção foram utilizados: UV – 254 nm – ACY; detector de fluorescência (Ex/Em) 260/366 nm – NAP, ACE, FLR, PHE; 260/430 nm – ANT, FLT, PYR, BaA, CHR, BbF, BkF, BaP, DhA, BgP e 270/500 nm – IcP. Foram calculados a soma de CHR, BaP, BaA e BbF (HPA4) e a soma de CHR, BaP, BaA e BbF, BkF, DhA, BgP e IcP (HPA8), adotados como indicadores adequados para a ocorrência e toxicidade de HPAs em alimentos (Alexander et al. 2008). Além disso, foram calculadas as quantidades de todos os HPAs (HPAs total), NAP, ACY, ACE, FLR, PHE, ANT, FLT, PYR, BaA e CHR (HPAs leves) e BbF, BkF, BaP, DhA, BgP e IcP (HPAs pesados);

3.2.4. Delineamento estatístico e análise de dados

Os dados foram coletados em cinco repetições, com cinco replicatas. Ou seja, foram realizados cinco experimentos de cocção para cada tratamento, e em cada experimento, cinco hambúrgueres foram grelhados. Os resíduos dos dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Em casos que os resíduos não apresentaram distribuição normal e homogeneidade das variâncias, aplicou-se uma transformação boxcox. Atendendo os pressupostos, a análise de variância foi realizada ($\alpha = 0,05$) seguindo um delineamento inteiramente aleatorizado, com três tratamentos relacionadas aos tipos de combustível utilizado (madeira, carvão vegetal e briquete) e uma testemunha (carne crua). Medidas de dispersão do erro padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de correlação de Pearson. Modelos de regressão foram ajustados para elucidar os resultados encontrados na matriz de correlação.

A análise multivariada de componentes principais (PCA) foi realizada para simplificar as variações presentes nos dados correspondentes ao combustível utilizado, sendo projetado em um número reduzido de dimensões, preservando ao mesmo tempo o máximo de informação. Para isto, a matriz de dados originais foi

aproximada para duas matrizes menores (matrizes de escores e de pesos), resultando em gráficos coordenados de dispersão bimensionais de scores como resultado da análise, facilitando a visualização dos dados experimentais. As médias aritméticas de todas as variáveis consideradas para o estudo foram padronizadas com média 0 e variância 1. O software R Core Team (2023) foi utilizado para as análises citadas.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Características químicas, físicas e energética do alimento grelhado

Na Figura 7 são apresentadas as propriedades da carne crua e preparada em churrasco, em diferentes biomassas avaliadas.

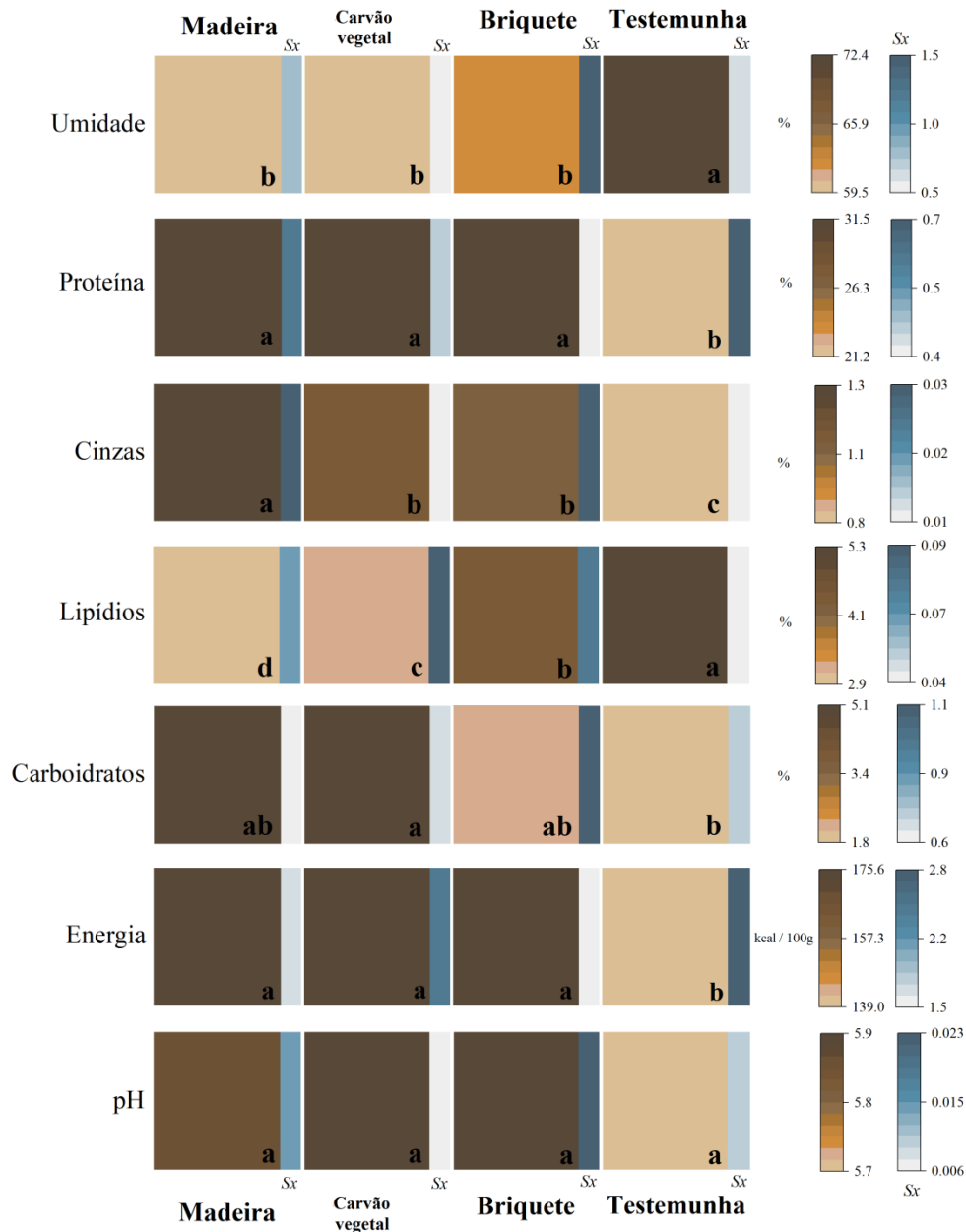


Figura 7. Propriedades químicas e energética da carne crua e grelhada com diferentes biomassas como combustível.

Médias seguidas de mesma letra, em linha, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Em que: Testemunha = carne crua; Sx = Erro padrão.

Com a cocção, a umidade da carne diminuiu aproximadamente 16%, independente da biomassa utilizada, enquanto que o teor de proteína aumentou 47%. Naturalmente, a carne possui elevado teor de proteínas (Siddiqui et al. 2024). Com o aumento da temperatura, os alimentos coccionados tendem a desidratar, seja pela evaporação da água, ou pela lixiviação, concentrando nutrientes (Aykın-Dinçer et al. 2020). O teor de cinzas também aumentou com a cocção, encontrando valores mais elevados em carne coccionada utilizando madeira como combustível. Notavelmente, existe uma forte correlação positiva entre o teor de cinzas do alimento e a velocidade de aquecimento e resfriamento da churrasqueira, de modo que quanto mais rápido a biomassa aquece e resfria, maior o teor de cinzas do alimento (Figura 8 e 9).

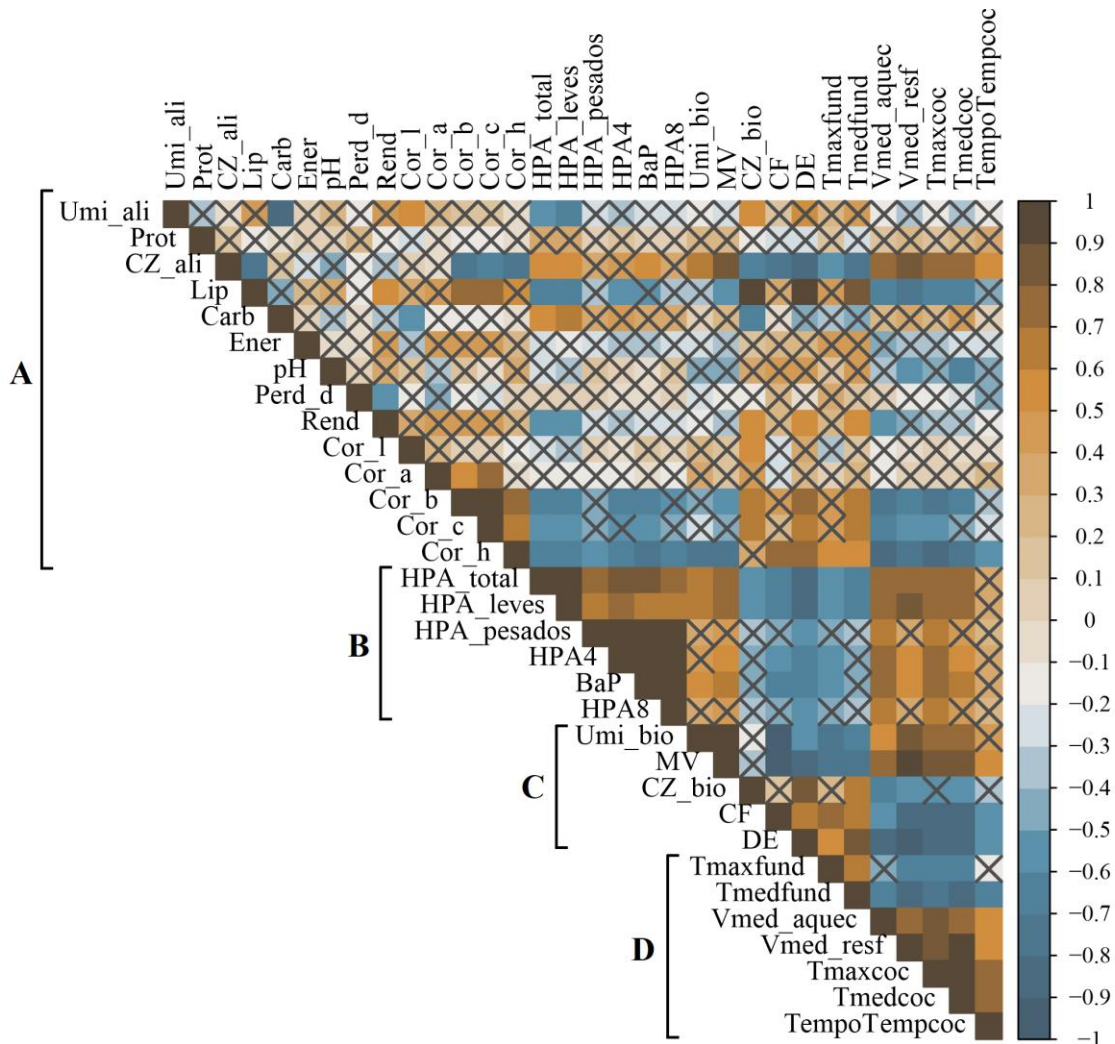


Figura 8. Matriz de correlação entre as propriedades da carne grelhada em churrasco (A), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos presentes (B), propriedades da biomassa (C) e variáveis extraídas dos ensaios de cocção em churrasco (D).

Em que: Umi_ali = umidade do alimento ; Prot = teor de proteínas; CZ_ali = teor de cinzas do alimento; Lip = teor de lipídios; Carb = teor de carboidratos; Ener = conteúdo energético; Perd_d = encolhimento; Rend = rendimento da cocção; Cor_l = colorimetria – espaço L*; Cor_a = colorimetria – espaço a*; Cor_b = colorimetria – espaço b*; Cor_c = colorimetria – espaço C*; Cor_h = colorimetria – espaço h; HPA_total = quantidade de HPAs total; HPA_leves = quantidade de HPAs leves; HPA_pesados = quantidade de HPAs pesados; Umi_bio = Umidade da biomassa; MV = teor de materiais voláteis; CZ_bio = teor de cinzas da biomassa; CF = teor de carbono fixo; DE = densidade energética; Tmaxfund = temperatura máxima da área de combustão; Tmedfund = temperatura média da área de combustão; Vmed_aquec = velocidade média de aquecimento; Vmed_resf = velocidade média de resfriamento; Tmaxcoc = temperatura máxima da área de cocção; Tmedcoc = temperatura média da área de cocção; TempoTempcoc = tempo em que a temperatura ficou dentro da ideal para cocção nas grelhas (> 190 °C); X = erro padrão.

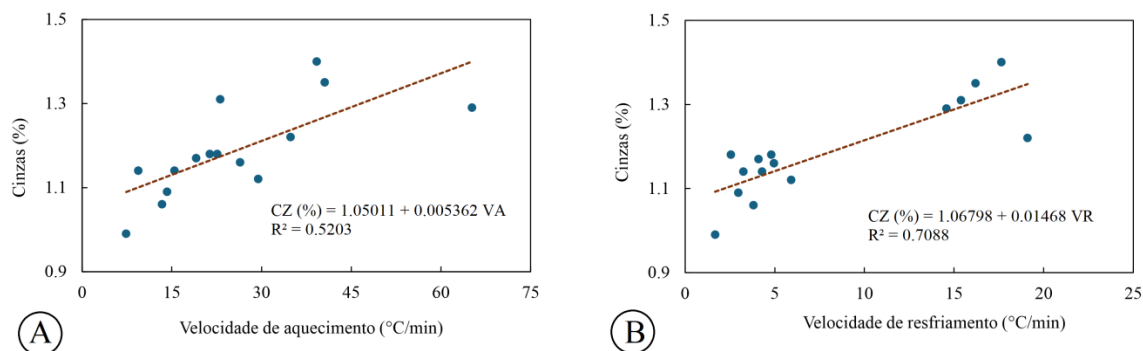


Figura 9. Ajuste de regressão entre o teor de cinzas e a velocidade de aquecimento (A) e resfriamento (B) da área de combustão da churrasqueira.

Em que: CZ = cinzas; VA = velocidade de aquecimento; VR = velocidade de resfriamento.

Como a dinâmica da cocção utilizando madeira é heterogênea, com temperaturas instáveis, que necessitam de constante abastecimento para manter a faixa de temperatura desejada, as cinzas presentes na madeira podem ter passado para o alimento. Contudo, o incremento não foi tão elevado, adicionando apenas 0,19% comparado a carvão vegetal e briquete, dentro do esperado em alimento grelhado em churrasqueira (Ali et al. 2023).

O teor de lipídios na carne coccionada diminuiu, apresentando valores mais elevados em briquete, seguido de carvão vegetal e, posteriormente, madeira. Este resultado está associado a temperatura em que cada biomassa proporcionou na área de cocção, assim como a dinâmica pela qual o combustível entra em combustão na churrasqueira, uma vez que a parte da gordura se perde por gotejamento, com intensidade ditada pelo método de grelhar (Ali et al. 2023). Carvão e briquete, apesar de possuírem temperaturas mais elevadas na área de combustão, mantem a temperatura constante na área de cocção, sem grandes variações e em uma faixa de temperatura que facilita a cocção, alternando entre as grelhas 1, 2 ou 3 da churrasqueira sem dificuldades e de modo harmônico com o tempo, a medida em que a temperatura vai caindo. Com a madeira, a temperatura da área de combustão é menor, porém a área de cocção mantém uma temperatura média elevada, comparada as outras duas biomassas. Este fenômeno é atingido porque no processo de queima da madeira são liberados elevados teores de materiais voláteis, que queimam em forma de chama, diferentemente do que acontece no carvão e no briquete, que possuem elevados teores de carbono fixo, e queimam em forma de brasa (Saravanakumar et al. 2023; Vieira et al. 2023). Portanto, quanto maiores os valores de materiais voláteis da biomassa, da temperatura máxima e média atingida na área de cocção da churrasqueira, menor é o teor de lipídios da carne grelhada (Figura 8).

A cocção concentra alguns nutrientes, inclusive os de menor expressão quantitativa, como é o caso de carboidratos em carne (Bassam et al. 2022). De modo geral, as peças utilizadas encolheram 16%, obtendo rendimento de 64% (APÊNDICE E). O rendimento foi influenciado negativamente pela velocidade de aquecimento (Figura 8), de modo que quanto maior a velocidade de aquecimento, menor o rendimento. Devido a elevada velocidade de aquecimento proporcionada pela madeira, a chama pode degradar parte do alimento em contato direto, como proteínas (Bassam et al. 2022) corroborando com o encontrado. Ainda, houve o aumento do pH e da quantidade de energia no alimento, não havendo diferença significativa entre o tipo de biomassa utilizada na cocção. O caráter ácido do alimento ajuda a manter a contagem microbiana baixa. Patógenos

importantes como *E. coli*, *S. aureus*, *Salmonella* e *Shigella* possuem crescimento ideal em pH 6,8 a 8,0 (Ogbonna et al. 2012; Ali et al. 2023).

Ao observar a colorimetria do alimento coccionado (Figura 10), no espaço de cor CIE L*a*b, carne preparada utilizando carvão apresenta menor luminosidade que utilizando briquete. Madeira é intermediária, sendo igual estatisticamente às duas. Em relação ao b, briquete tem uma cor mais próxima ao amarelo do que a madeira, sendo carvão intermediária, significativamente igual as duas. No espaço de cor CIE L*C*h, carne preparada utilizando briquete como combustível apresenta uma cor mais saturada do utilizando madeira, sendo carvão intermediário. Enquanto que utilizando briquete e carvão se obtém carne com cores mais tendendo ao amarelo do que a madeira. Tanto *b, *C quanto h possuíram forte correlação negativa com as variáveis extraídas do desempenho energético (Figura 8), de modo que quanto maior a temperatura máxima da área de cocção, velocidade de aquecimento e resfriamento, por exemplo, menor os valores de b, C e h.

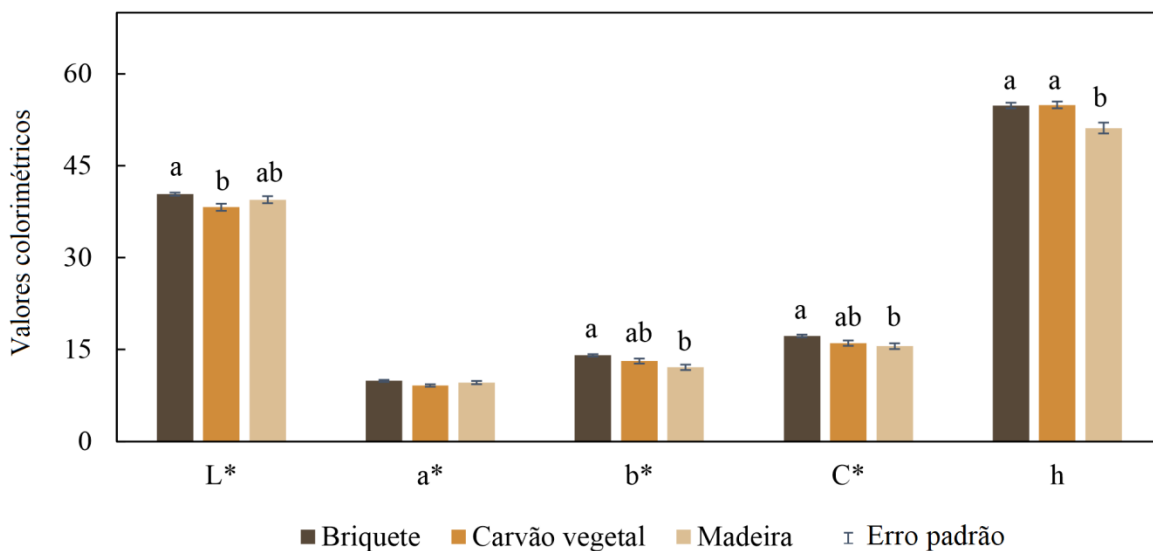


Figura 10. Propriedades colorimétricas da carne grelhada em churrasco, com diferentes biomassas como combustível. Médias seguidas de mesma letra, por propriedade, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudos envolvendo carne bovina (Salim et al. 2020; Lee et al. 2021), em que o aumento da temperatura de cocção fez com que ocorresse o avermelhamento do alimento. O efeito da chama na área de cocção, quando utilizada madeira, pode ser determinante para o resultado apresentado, que deixou o alimento com cor menos saturada e menos tendendo ao amarelo do que os alimentos coccionados com carvão ou briquete. A cor de um produto alimentício geralmente varia devido à composição das matérias-primas utilizadas, à umidade presente e às reações que ocorrem durante o processo de cozimento (Zhou et al. 2022; Peñaranda and Garrido 2024). Fatores como desnaturação de proteínas, evaporação de água, degradação de pigmentos e reações de Maillard desempenham papéis importantes nessa variação, podendo influenciar diretamente nas características de cor das amostras (Zhou et al. 2022; Peñaranda and Garrido 2024). Neste contexto, o aumento da temperatura média da área de cocção do churrasco eleva a velocidade das reações, o que proporciona carnes com coloração menos tendendo ao amarelo, e mais ao vermelho, com menor qualidade de cores em termos de saturação.

3.3.2. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Apesar de não haver diferença significativa entre a maioria dos valores encontrados para os HPAs analisados, mesmo em grupos de importância (Tabela 1, APÊNDICE F), quando as variáveis são exploradas em conjunto, é possível perceber tendências e comportamentos, inclusive com agrupamento em função da biomassa utilizada (Figura 11).

Tabela 1. Grupos de importância prioritária de HPAs presente na carne grelhada em churrasco, com diferentes biomassas como combustível.

Biomassa	Total (µg/kg)	Leves (µg/kg)	Pesados (µg/kg)	HPA4 (µg/kg)	BaP (µg/kg)	HPA8 (µg/kg)
Briquete	163.94 (±9.61)	153.28 (±9.48)	10.66 (±0.16)	1.32 (±0.51) ab	0.1 (±0.03)	11.73 (±0.48)
Carvão	265.13 (±21.89)	244.95 (±16.87)	20.19 (±5.73)	3.75 (±0.83) b	0.18 (±0.06)	22.67 (±6.32)
Madeira	566.16 (±184.73)	486.95 (±140.58)	79.21 (±69.38)	10.42 (±5.75) a	0.65 (±0.34)	87.48 (±73.39)
Testemunha	197.56 (±50.3)	191.2 (±47.77)	6.36 (±2.65)	2.51 (±0.69) ab	0.1 (±0.04)	8.66 (±3.11)

Médias seguidas de mesma letra, em coluna, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

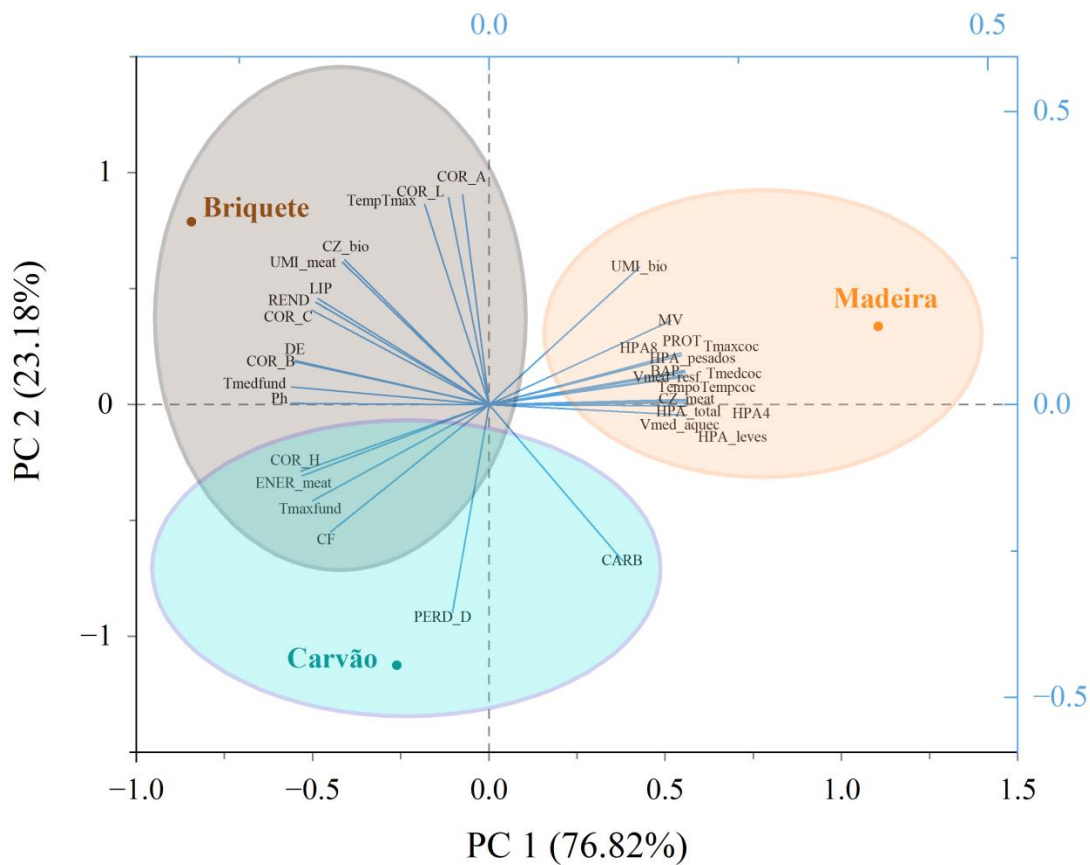


Figura 11. Análise dos componentes principais das propriedades da carne grelhada em churrasco, quantidade de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos presentes e as características de combustão das biomassas utilizadas.

Em que: Umi_ali = umidade do alimento ; Prot = teor de proteínas; CZ_ali = teor de cinzas do alimento; Lip = teor de lípidios; Carb = teor de carboidratos; Ener = conteúdo energético; Perd_d = encolhimento; Rend = rendimento da cocção; Cor_l = colorimetria – espaço L*; Cor_a = colorimetria – espaço a*; Cor_b = colorimetria – espaço b*; Cor_c = colorimetria – espaço C*; Cor_h = colorimetria – espaço h; HPA_total = quantidade de HPAs total; HPA_leves = quantidade de HPAs leves; HPA_pesados = quantidade de HPAs pesados; Umi_bio = Umidade da biomassa; MV = teor de materiais voláteis; CZ_bio = teor de cinzas da biomassa; CF = teor de carbono fixo; DE = densidade energética; Tmaxfund = temperatura máxima da área de combustão; Tmedfund = temperatura média da área de combustão; TempTmax = tempo entre a ignição e a temperatura máxima da área de combustão; Vmed_aquec = velocidade média de aquecimento; Vmed_resf = velocidade média de resfriamento; Tmaxcoc = temperatura máxima da área de cocção; Tmedcoc = temperatura média da área de cocção; TempoTempcoc = tempo em que a temperatura ficou dentro da ideal para cocção nas grelhas (> 190 °C).

Os HPAs podem ser evidenciados na água, no ar, no solo e na vegetação (Barbosa et al. 2023), ou seja, a presença destes componentes no alimento cárneo pode estar relacionada ao ambiente em que o animal é criado, bem como sua alimentação (Roseiro et al. 2011). Contudo, o agrupamento realizado pela análise de componentes principais evidencia uma tendencia a encontrar valores mais elevados de HPAs no alimento quando utilizada madeira como biomassa combustível. Este comportamento é observado em todos os grupos

prioritários de HPAs analisados, incluindo BaP, utilizado como marcador limitante para o consumo de alimentos devido a sua forte relação com doenças cancerígenas nos seres humanos (Karşı et al. 2023; Barbosa et al. 2023). Este resultado está totalmente ligado a dinâmica de cocção apresentada pelo uso das diferentes biomassas, discutido anteriormente. A cocção do alimento pelo método de grelhar está entre os métodos com maior potencial de aumento de HPAs no alimento (Wang et al. 2022). Porém, sua evidência pode ser potencializada pela escolha do combustível utilizado na combustão (Wang et al. 2022), de modo que quanto maior a exposição do alimento a fumaça do combustível, maior a quantidade de HPAs (Roseiro et al. 2024). Queimas incompletas de combustíveis, como observado nas biomassas utilizadas neste estudo (Capítulo 1 deste documento), gera uma grande quantidade de fumaça, que carrega os HAP's para a superfície dos alimentos (Wang et al. 2022), seja eles grandes ou pequenos. Geralmente, HPAs menores são formados quando temperaturas de combustão não ultrapassam 500°C (Wang et al. 2017). Contudo, a longa exposição e o aumento da temperatura faz com que HPAs menores e radicais formados por carbono e hidrogênio contribuam para a formação de HPAs maiores (Wang et al. 2022).

Ainda, a interação entre o método de cocção e o teor de gordura do alimento pode também ser uma fonte potencial deste componente (Xu et al. 2023). Correlacionando negativamente com a quantidade de HPAs neste estudo, a gordura presente na carne grelhada tende a sair no alimento mais facilmente quando a temperatura de cocção é elevada, como observado ao utilizar madeira como combustível. Quando gotículas de gordura e água caem sobre a chama, ocorre a combustão incompleta dos lipídios, formando os HPAs que entram em contato com o alimento, aumentando sua presença (Zhu et al. 2022). Apesar de neste estudo os níveis de HPAs estarem dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes (EU 2014), mesmo que em alguns países como Brasil, Estados Unidos e Canadá não tenham regulamentos específicos para carnes (US-ASTDR 2001; ANVISA 2007; HCFD 2016), os HPAs representam uma séria ameaça à saúde e precisam de atenção, uma vez que são conhecidos por seu potencial carcinogênico. O processo principal pelo qual os HPAs desencadeiam a carcinogênese envolve a formação de metabólitos nos rins e no fígado, os quais têm a capacidade de se ligar a segmentos específicos de DNA (Qin et al. 2021; Wang et al. 2022). Essa ligação pode resultar em mutações genéticas, desencadeando assim o desenvolvimento de diversos tipos de câncer (Qin et al. 2021).

Para evitar a formação de HPAs no churrasco é essencial adotar práticas adequadas durante o preparo e o armazenamento da carne. Controlar a temperatura da churrasqueira e o tempo de grelhar Lee et al. (2016), escolher cortes com menor teor de gordura associada quando possível (Lee et al. 2016; Wang et al. 2022), reduzir o contato da carne com a fumaça (Lee et al. 2016), preparar a carne com uso de marinadas (Park et al. 2017), minimizar o contato com fontes de calor excessivo e remover o contato das gotas de gordura da fonte de aquecimento (Lee et al. 2016; Wang et al. 2022) são medidas importantes. Adotar essas práticas pode contribuir significativamente para a segurança do alimento em churrascos, minimizando os riscos associados à presença de HPAs em carne grelhada.

3.3.3. Aplicações práticas e políticas públicas

O churrasco é uma prática culinária amplamente apreciada em todo o mundo, e as escolhas de combustível para o seu preparo não apenas podem influenciar o sabor dos alimentos, como também suas características químicas, físicas e até mesmo seus potenciais riscos à saúde. Diferentes biomassas são utilizadas

no preparo de churrascos, como madeira, carvão vegetal e briquete de carvão. Ao analisá-las, percebemos distintos impactos em diversos aspectos do processo de cocção e nas propriedades dos alimentos grelhados. A madeira é uma das opções mais tradicionais e amplamente utilizadas para cocção, devido à sua facilidade de acesso e ao seu potencial de fornecer altas temperaturas em um tempo relativamente rápido. Ao ser utilizada como combustível, a madeira proporciona altas temperaturas na área de cocção, porém sua queima é rápida, exigindo um abastecimento frequente. Esse processo dinâmico de queima afeta diretamente as características físicas e químicas dos alimentos. Por exemplo, observa-se uma redução no teor de lipídios dos alimentos grelhados com madeira e uma maior quantidade de cinzas nos alimentos grelhados, impactando na cor, rendimento e tendência a elevadas valores de HPAs, representando um potencial risco à saúde humana.

O carvão vegetal e o briquete são outras opções populares para o preparo de churrascos, e suas escolhas como fonte de energia para cocção também tem impacto significativo nas propriedades dos alimentos grelhados. Ao contrário da madeira, o carvão vegetal e o briquete proporcionam temperaturas mais estáveis durante o processo de cocção, resultando em uma queima mais controlada e em uma menor variação nas características físicas e químicas dos alimentos. Além disso, ambas biomassas tendem a deixar uma quantidade menor de cinzas nos alimentos grelhados. Assim como no caso da madeira, o uso de carvão vegetal e briquete para cocção estão associados à presença de HPAs nos alimentos, ainda que em menor quantidade, o que merece atenção.

No atual panorama global, a busca por soluções sustentáveis tornou-se uma prioridade. Nesse sentido, a análise do uso de biomassas como fonte de energia para cocção não apenas desperta interesse pelo seu potencial energético, mas também pelas implicações socioambientais. O estudo detalhado das propriedades e desempenho das biomassas utilizadas no preparo de churrascos permite uma avaliação mais precisa dos potenciais riscos à saúde associados ao consumo de alimentos grelhados. Os resultados deste estudo contribuem diretamente para uma reflexão mais profunda sobre as aplicações práticas das diferentes biomassas utilizadas no preparo de churrascos e seus impactos na saúde, no meio ambiente e na segurança do alimento. Dessa forma, entender a dinâmica incorporada ao uso de diferentes biomassas contribui diretamente para o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), incluindo: Saúde e Bem-Estar (ODS 3); Energia Limpa e Acessível (ODS 7); e Consumo e Produção Responsáveis (ODS 12). Mais esforços devem ser empregados em estudos que envolvam a avaliação sensorial do alimento grelhado com diferentes biomassas e tecnologia de churrasqueiras que minimizem a presença de HPAs nas carnes grelhadas. Através dessas recomendações, esperamos ampliar o conhecimento sobre o uso de biomassas no preparo de churrascos e promover práticas mais sustentáveis e seguras para todos.

3.4. Conclusões

A madeira, apesar de elevar a temperatura da área de cocção na churrasqueira de forma rápida, possui também resfriamento rápido, que exige constante abastecimento. Aliada a inconsistência da temperatura, a combustão da madeira no churrasco eleva o teor de cinzas na carne. A elevada temperatura média da área de cocção faz com que a carne grelhada com madeira tenha a coloração mais avermelhada, além de potencializar a diminuição do teor de gordura que, associada a elevada quantidade de emissões resultante da combustão incompleta, eleva a quantidade de HPAs, comparada a carvão vegetal e briquete. A combustão destas duas

biomassas, por sua vez, dispõe de uma temperatura mais homogênea, resultando em uma coloração mais amarelada da carne coccionada. Ainda, mantém maior quantidade de lipídios na carne, o que diminui a quantidade de HPAs, mesmo que ainda presente, ligada as emissões da combustão das biomassas.

Referências

- Alexander J, Benford D, Cockburn A, et al (2008) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food - Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *EFSA Journal* 6:724. <https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2008.724>
- Ali A, Ahmad N, Liaqat A, et al (2023) Safety and quality assessment of street-vended barbecue chicken samples from Faisalabad, Pakistan. *Food Sci Nutr* 11:930–939. <https://doi.org/10.1002/FSN3.3127>
- ANVISA (2007) RESOLUÇÃO - RDC N° 2, DE 15 DE JANEIRO DE 2007. In: Agência Nacional de Vigilância Sanitária. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2007/rdc0002_15_01_2007.html. Accessed 5 May 2024
- AOAC (1997) Official Methods of Analysis of AOAC International, 32nd edn. Gaithersburg
- Arshad MS, Sohaib M, Ahmad RS, et al (2018) Ruminant meat flavor influenced by different factors with special reference to fatty acids. *Lipids in Health and Disease* 2018 17:1 17:1–13. <https://doi.org/10.1186/S12944-018-0860-Z>
- Aykın-Dinçer E, Kılıç-Büyükkurt Ö, Erbaş M (2020) Influence of drying techniques and temperatures on drying kinetics and quality characteristics of beef slices. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung* 56:315–320. <https://doi.org/10.1007/S00231-019-02712-Z/TABLES/3>
- Barbosa AD, Alexandre B, Tondo EC, Malheiros P da S (2022) Microbial survival in gourmet hamburger thermally processed by different degrees of doneness. *Int J Gastron Food Sci* 28:100501. <https://doi.org/10.1016/J.IJGFS.2022.100501>
- Barbosa F, Rocha BA, Souza MCO, et al (2023) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* 26:28–65. <https://doi.org/10.1080/10937404.2022.2164390>
- Bassam SM, Noletto-Dias C, Farag MA (2022) Dissecting grilled red and white meat flavor: Its characteristics, production mechanisms, influencing factors and chemical hazards. *Food Chem* 371:131139. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131139>
- BERRY BW (1992) Low Fat Level Effects on Sensory, Shear, Cooking, and Chemical Properties of Ground Beef Patties. *J Food Sci* 57:537–537. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb08037.x>
- BRASIL (2003) RESOLUÇÃO - RDC N° 360, DE 23 DE DEZEMBRO DE 2003. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2003/res0360_23_12_2003.html. Accessed 8 Aug 2022
- Caner C, Aday MS (2009) Maintaining quality of fresh strawberries through various modified atmosphere packaging. *Packaging Technology and Science* 22:115–122. <https://doi.org/10.1002/pts.831>
- Dias Junior AF, Esteves RP, Silva ÁM, et al (2020) Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. *European Journal of Wood and Wood Products* 78:193–204. <https://doi.org/10.1007/S00107-019-01489-6/FIGURES/10>

- EU (2014) COMMISSION REGULATION (EU) No 1327/2014 of 12 December 2014 Amending Regulation (EC) No 1881/2006 as Regards Maximum Levels of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Traditionally Smoked Meat and Meat Products and Traditionally Smoked Fish and Fishery Products. *Official Journal of the European Union* 358:13–14
- Gayler P (2010) Burgers. *Castle Book* (ed), 1th ed. pp 01-144.
- Gonnet J-F (1998) Colour effects of co-pigmentation of anthocyanins revisited—1. A colorimetric definition using the CIELAB scale. *Food Chem* 63:409–415. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00053-3)
- HCFD (2016) Health Canada's food directorate. In: *Canadian Standards for Various Chemical Contaminants in Foods*. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/food-safety/chemical-contaminants/maximum-levels-chemical-contaminants-foods.html>. Accessed 5 May 2024
- IAL - Instituto Adolfo Lutz (2008a) Análise Sensorial. In: *Editora Digital* (ed) *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*, 4th edn. pp 279–320
- IAL - Instituto Adolfo Lutz (2008b) Análise Sensorial. In: *Editora Digital* (ed) *Procedimentos e Determinações Gerais*, 4th edn. pp 83–160
- Ignacio LH da S, Santos PE de A, Duarte CAR (2019) An experimental assessment of Eucalyptus urosemite energy potential for biomass production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103:361–369. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.12.053>
- Karşı MBB, Berberler E, Kurhan Ş, et al (2023) Levels, Dietary Exposure, and Health Risk Estimation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Bread Baked with Different Oven and Fuel Types. *Polycycl Aromat Compd* 43:811–825. <https://doi.org/10.1080/10406638.2021.2020306>
- Lee D, Lee HJ, Yoon JW, et al (2021) Effects of cooking conditions on the physicochemical and sensory characteristics of dry- and wet-aged beef. *Anim Biosci* 34:1705–1716. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0852>
- Lee JG, Kim SY, Moon JS, et al (2016) Effects of grilling procedures on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chem* 199:632–638. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.12.017>
- Ogbonna IO, Danladi MS, Akinmusire O, Odu CE (2012) Microbiological Safety and proximate composition of suya stored at ambient temperature for six hours from maiduguri, Northern Nigeria. *Internet Journal of Food Safety* 14:11–16
- Park KC, Pyo HS, Kim WS, Yoon KS (2017) Effects of cooking methods and tea marinades on the formation of benzo[a]pyrene in grilled pork belly (Samgyeopsal). *Meat Sci* 129:1–8. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2017.02.012>
- Peñaranda I, Garrido MD (2024) Viability of fructooligosaccharides as substitutes for methylcellulose reduction in plant-based burgers. *Food Hydrocoll* 154:110104. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.110104>
- Qin C, Hu X, Yang B, et al (2021) Amino, nitro, chloro, hydroxyl and methyl substitutions may inhibit the binding of PAHs with DNA. *Environmental Pollution* 268:115798. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.115798>

- R Core Team (2023) R: A Language and Environment for Statistical Computing
- Ramos EM, Gomide LA de M (2007) Avaliação da qualidade de carnes: fundamentos e metodologias
- Roseiro C, Gonçalves H, Santos C (2024) Incidence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Portuguese Traditional Dry Smoked Meat Products Manufactured at Home for Self-Consumption and by Micro Industrial Plants. *Polycycl Aromat Compd* 44:1011–1018. <https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2185266>
- Roseiro LC, Gomes A, Santos C (2011) Influence of processing in the prevalence of polycyclic aromatic hydrocarbons in a Portuguese traditional meat product. *Food and Chemical Toxicology* 49:1340–1345. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2011.03.017>
- Salim APAA, Wang Y, Li S, et al (2020) Sarcoplasmic Proteome Profile and Internal Color of Beef Longissimus Lumborum Steaks Cooked to Different Endpoint Temperatures. *Meat and Muscle Biology* 4:15–16. <https://doi.org/10.22175/MMB.9470>
- Saravanakumar A, Vijayakumar P, Hoang AT, et al (2023) Thermochemical conversion of large-size woody biomass for carbon neutrality: Principles, applications, and issues. *Bioresour Technol* 370:128562. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128562>
- Siddiqui SA, Bhowmik S, Afreen M, et al (2024) Bodybuilders and high-level meat consumers' behavior towards rabbit, beef, chicken, turkey, and lamb meat: A comparative review. *Nutrition* 119:112305. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2023.112305>
- US-ASTDR (2001) The United States agency for toxic substances and disease registry division of toxicology and human health sciences. In: Toxic Substances Portal - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). https://www.cdc.gov/biomonitoring/pahs_factsheet.html. Accessed 5 May 2024
- Vieira TAS;, Trugilho PF;, Carabineiro SAC;, et al (2023) Impact of Chemical Composition on Eucalyptus Wood Clones for Sustainable Energy Production. *Forests* 2023, Vol 14, Page 2240 14:2240. <https://doi.org/10.3390/F14112240>
- Wang C, Wang Y, Herath HMSK (2017) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in biochar – Their formation, occurrence and analysis: A review. *Org Geochem* 114:1–11. <https://doi.org/10.1016/J.ORGGEOCHEM.2017.09.001>
- Wang Z, Ng K, Warner RD, et al (2022) Reduction strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons in processed foods. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 21:1598–1626. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12905>
- Warnes A (2008) *Savage Barbecue: Race, Culture, and the Invention of America's First Food*. Georgia
- Wright J, Treuille E (2017) *Le Cordon Bleu : Todas as técnicas culinárias*, 1st edn.
- Xu C, Chen J, Zhang X, et al (2023) Emission characteristics and quantitative assessment of the health risks of cooking fumes during outdoor barbecuing. *Environmental Pollution* 323:121319. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2023.121319>

Zhou H, Vu G, Gong X, McClements DJ (2022) Comparison of the Cooking Behaviors of Meat and Plant-Based Meat Analogues: Appearance, Texture, and Fluid Holding Properties. *ACS Food Science and Technology* 2: 844–851.
https://doi.org/10.1021/ACSFOODSCITECH.2C00016/ASSET/IMAGES/LARGE/FS2C00016_0005.JPEG

Zhu Z, Xu Y, Huang T, et al (2022) The contamination, formation, determination and control of polycyclic aromatic hydrocarbons in meat products. *Food Control* 141:109194.
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2022.109194>

Apêndices

APÊNDICE A. Médias das propriedades físicas, químicas e energéticas das biomassas utilizadas para cocção.

Propriedades	Biomassa		
	Madeira	Carvão	Briquete
Umidade (%)	13.99 (± 0.22) a	4.89 (± 0.11) c	8.55 (± 0.09) b
MV (%)	82.18 (± 0.4) a	24.97 (± 0.2) c	31.9 (± 0.35) b
CZ (%)	0.51 (± 0.02) b	0.46 (± 0.01) b	13.86 (± 0.01) a
CF (%)	17.31 (± 0.4) c	74.57 (± 0.21) a	54.71 (± 0.45) b
DG (kg m^{-3})	263.02 (± 3.64) b	175.8 (± 2.55) c	280.67 (± 1.37) a
PCS (MJ kg^{-1})	20.14 (± 0.12) c	30.94 (± 0.16) a	23.53 (± 0.19) b
PCI (MJ kg^{-1})	18.87 (± 0.12) c	29.66 (± 0.16) a	22.26 (± 0.19) b
PCU (MJ kg^{-1})	15.88 (± 0.15) c	28.09 (± 0.18) a	20.14 (± 0.16) b
DE (GJ m^{-3})	4.17 (± 0.05) c	4.94 (± 0.05) b	5.65 (± 0.05) a

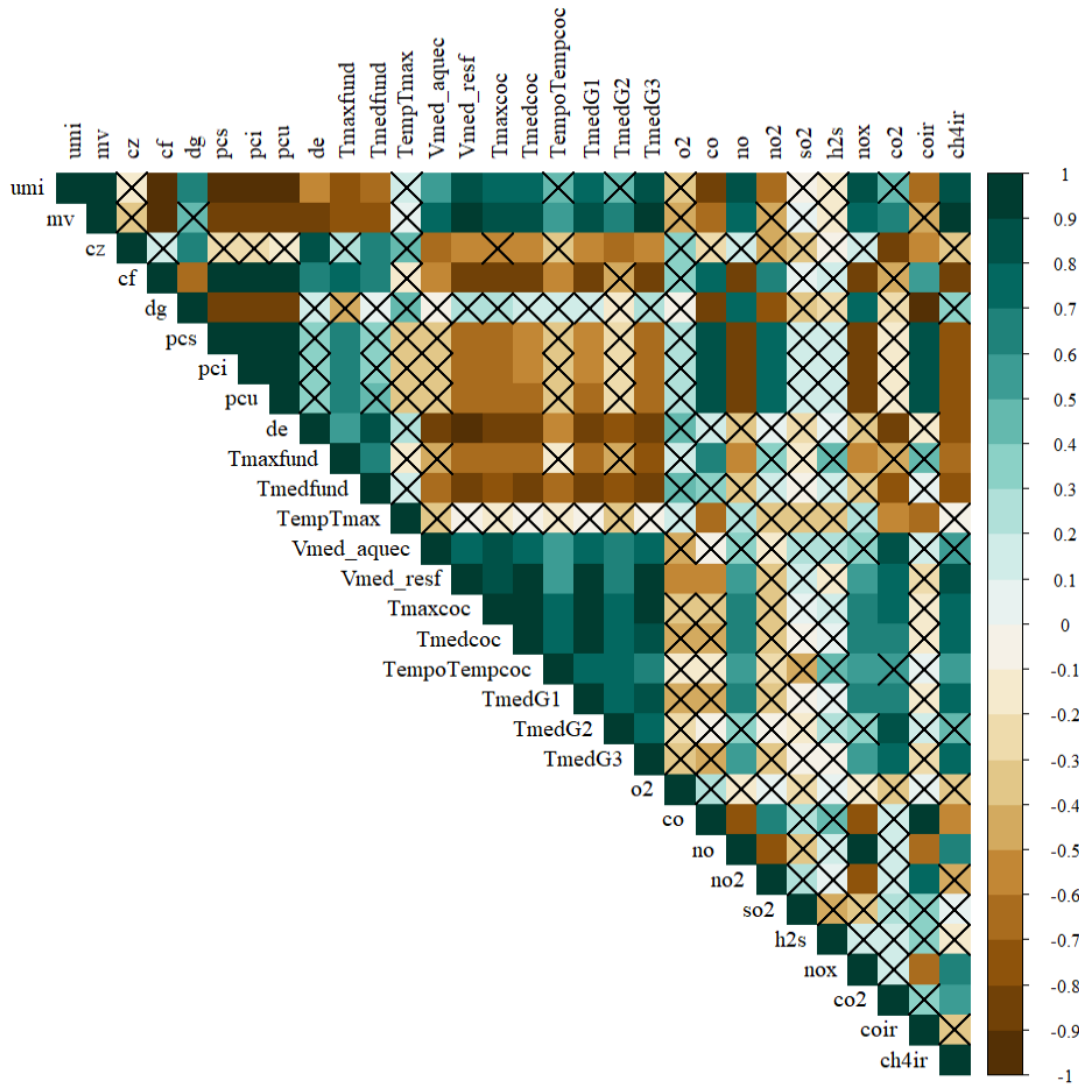
Médias seguidas de mesma letra, em linha, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Em que: MV = materiais voláteis; CZ = cinzas; CF = carbono fixo; DG = densidade a granel; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico útil; DE = densidade energética. (): erro padrão.

APÊNDICE B. Médias das variáveis extraídas das temperaturas nos testes de cocção.

Variáveis	Biomassa		
	Madeira	Carvão	Briquete
Tmaxfund ($^{\circ}\text{C}$)	593.93 (± 14.22) b	729.7 (± 20.86) a	704.58 (± 33.31) a
Tmedfund ($^{\circ}\text{C}$)	227.22 (± 25.27) b	396 (± 39.12) a	497.32 (± 17.01) a
TempTmax ($^{\circ}\text{C}$)	46.07 (± 12.48)	34.46 (± 4.21)	59.2 (± 8.09)
Vmed_aquec ($^{\circ}\text{C min}^{-1}$)	40.62 (± 6.87) a	22.61 (± 2.5) b	13.16 (± 2.41) b
Vmed_resf ($^{\circ}\text{C min}^{-1}$)	16.59 (± 0.81) a	4.81 (± 0.32) b	2.86 (± 0.36) b
Tmaxcoc ($^{\circ}\text{C}$)	603.12 (± 37.5) a	331.03 (± 30.58) b	310.86 (± 17.38) b
Tmedcoc ($^{\circ}\text{C}$)	319.7 (± 6.19) a	251.06 (± 10.22) b	238.61 (± 7.77) b
TempoTempcoc (Minutos)	84.5 (± 3)	69.29 (± 7.84)	66.57 (± 4.35)
TmedG1 ($^{\circ}\text{C}$)	319.7 (± 6.19) a	251.06 (± 10.22) b	238.61 (± 7.77) b
TmedG2 ($^{\circ}\text{C}$)	208.85 (± 9.47) a	171.75 (± 13.39) ab	132.23 (± 12.94) b
TmedG3 ($^{\circ}\text{C}$)	153.23 (± 7.31) a	83.16 (± 4.38) b	75.09 (± 2.8) b
Cham ($^{\circ}\text{C}$)	92.77 (± 2.73) a	76.4 (± 3.96) b	66.36 (± 1.91) b

Médias seguidas de mesma letra, em linha, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Em que: Tmaxfund = temperatura máxima da área de combustão; Tmedfund = temperatura média da área de combustão; TempTmax = tempo entre a ignição e a temperatura máxima da área de combustão; Vmed_aquec = velocidade média de aquecimento; Vmed_resf = velocidade média de resfriamento; Tmaxcoc = temperatura máxima da área de cocção; Tmedcoc = temperatura média da área de cocção; TempoTempcoc = tempo em que a temperatura ficou dentro da ideal para cocção nas grelhas (> 190 $^{\circ}\text{C}$); TmedG1 = temperatura média na grelha 1; TmedG2 = temperatura média na grelha 2; TmedG3 = temperatura média na grelha 2; Cham = temperatura média da chaminé. (): erro padrão.

APÊNDICE C. Matriz de correlação entre as propriedades das biomassas, variáveis da temperatura extraídas e emissões totais dos testes de cocção.



Em que: MV = materiais voláteis; CZ = cinzas; CF = carbono fixo; DG = densidade a granel; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico útil; DE = densidade energética; Tmaxfund = temperatura máxima da área de combustão; Tmedfund = temperatura média da área de combustão; TempTmax = tempo entre a ignição e a temperatura máxima da área de combustão; Vmed_aquec = velocidade média de aquecimento; Vmed_resf = velocidade média de resfriamento; Tmaxcoc = temperatura máxima da área de cocção; Tmedcoc = temperatura média da área de cocção; TempoTempcoc = tempo em que a temperatura ficou dentro da ideal para cocção nas grelhas (> 190 °C); TmedG1 = temperatura média na grelha 1; TmedG2 = temperatura média na grelha 2; TmedG3 = temperatura média na grelha 3; Cham = temperatura média da chaminé. X: não significativo a nível de 5%.

APÊNDICE D.

Emissões totais coletadas nos testes de cocção.

Emissões	Biomassa		
	Madeira	Carvão	Briquete
SO ₂ (ppm)	37 (22.09) a	0 (0) b	0 (0) b
H ₂ S (ppm)	6252.8 (970.68)	7204.55 (1409.02)	6715.7 (377.59)
NO _x (ppm)	12919.1 (176.27) a	5821.2 (462.63) c	9626.8 (522.68) b
CO ₂ (ppm)	9025050 (495007.69) a	6835485 (214585.52) b	4051460 (267135.37) c
CO (ppm)	1018834 (92287.26) b	1573850.5 (32001.77) a	904916 (63415.54) b
CH ₄ (ppm)	34470 (5731.09) a	0 (0) b	0 (0) b

Médias seguidas de mesma letra, em linha, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. (): erro padrão.

APÊNDICE E.

Médias das propriedades físicas, químicas e energética da carne grelhada em churrasco, com diferentes biomassas.

Propriedades	Biomassa utilizada			Carne crua
	Briquete	Carvão vegetal	Madeira	
Umidade (%)	62.42 (±0.78) b	59.55 (±0.46) b	59.5 (±1.45) b	72.32 (±0.62) a
Proteínas (%)	30.92 (±0.62) a	30.94 (±0.45) a	31.44 (±0.36) a	21.17 (±0.74) b
Cinzas (%)	1.09 (±0.03) b	1.16 (±0.01) b	1.31 (±0.03) a	0.84 (±0.01) c
Lipídios (%)	4.42 (±0.06) b	3.24 (±0.09) c	2.88 (±0.08) d	5.25 (±0.04) a
Carboidratos (%)	2.28 (±0.63) ab	5.11 (±0.68) a	4.86 (±1.09) ab	1.77 (±0.71) b
Energia (kcal/100g)	175.38 (±1.69) a	175.54 (±2.39) a	172.55 (±1.54) a	139.01 (±2.76) b
pH	5.88 (±0.01) a	5.87 (±0.01) a	5.84 (±0.02) a	5.65 (±0.01) b
L*	40.38 (±0.25) a	38.24 (±0.58) b	39.48 (±0.57) ab	-
a*	9.9 (±0.17)	9.15 (±0.2)	9.63 (±0.26)	-
b*	14.07 (±0.19) a	13.14 (±0.41) ab	12.12 (±0.44) b	-
C*	17.24 (±0.22) a	16.06 (±0.44) ab	15.57 (±0.47) b	-
h	54.84 (±0.46) a	54.94 (±0.55) a	51.17 (±0.89) b	-
Encolhimento (%)	15.91 (±0.57)	16.89 (±0.82)	15.95 (±0.43)	-
Rendimento (%)	65.82 (±0.82)	63.37 (±1.47)	62.54 (±0.84)	-

Médias seguidas de mesma letra, em linha, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

APÊNDICE F. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos presentes na carne grelhada em churrasco, com diferentes biomassas.

Propriedades	Biomassa utilizada			Carne crua
	Briquete	Carvão vegetal	Madeira	
Naphthalene (µg/kg)	72.64 (±5.5)	31.81 (±1.69)	197.67 (±145.61)	72.57 (±49.33)
Acenaphthylene (µg/kg)	40.36 (±10.37)	75.13 (±10.84)	78.42 (±22.68)	28.42 (±2.39)
Acenaphthene (µg/kg)	9.39 (±1.15) b	60.9 (±10.92) a	71.77 (±24.3) a	41.63 (±8.54) ab
Fluorene (µg/kg)	16.65 (±1.42)	35.02 (±14.68)	80.87 (±42.65)	34.61 (±13.4)
Phenanthrene (µg/kg)	11.66 (±2.33)	30.98 (±18.4)	28.39 (±20.71)	10.28 (±2.18)
Anthracene (µg/kg)	0.66 (±0.21)	4.47 (±2.65)	18.05 (±17.48)	0.48 (±0.06)
Fluoranthene (µg/kg)	0.7 (±0.19) ab	3.16 (±1.95) ab	3.27 (±0.95) a	0.62 (±0.14) b
Pyrene (µg/kg)	0.16 (±0.12)	1 (±0.89)	0.24 (±0.2)	0.31 (±0.26)
Benzo[a]anthracene (µg/kg)	0.55 (±0.09) b	0.92 (±0.17) ab	5.81 (±3.86) a	0.9 (±0.25) ab
Chrysene (µg/kg)	0.51 (±0.35)	1.57 (±1.03)	2.47 (±0.31)	1.4 (±0.63)
Benzo[b]fluoranthene (µg/kg)	0.16 (±0.06)	1.09 (±0.9)	1.49 (±1.39)	0.11 (±0.04)
Benzo[k]fluoranthene (µg/kg)	0.05 (±0.01) b	0.83 (±0.54) a	0.28 (±0.12) ab	0.04 (±0.01) b
Benzo[a] pyrene (µg/kg)	0.1 (±0.03)	0.18 (±0.06)	0.65 (±0.34)	0.1 (±0.04)
Dibenzo[a,h] anthracene (µg/kg)	9.99 (±0.22)	16.72 (±5.46)	74.31 (±65.93)	5.69 (±2.7)
Benzo[g,h,i] perylene (µg/kg)	0.2 (±0.06)	1.11 (±0.53)	1.37 (±0.93)	0.35 (±0.16)
Indenol[1,2,3-cd] pyrene (µg/kg)	0.16 (±0.05) ab	0.25 (±0.08) ab	1.1 (±0.78) a	0.08 (±0.02) b

Médias seguidas de mesma letra, em linha, são iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

4. CONCLUSÕES GERAIS

A análise comparativa das diferentes biomassas para uso em churrasco revelou que carvão vegetal e briquetes de carvão apresentam as características mais favoráveis do ponto de vista energético e de emissões. A densificação dos briquetes permite obter uma maior quantidade de energia em um menor volume, tornando a combustão mais eficiente em comparação com a madeira. Embora a madeira eleve rapidamente a temperatura da área de cocção, seu resfriamento rápido exige abastecimento constante, o que a torna menos prática em uso contínuo. Além disso, suas elevadas emissões e a instabilidade na temperatura durante a combustão a tornam indicada apenas em casos específicos, nos quais essas características contribuam para a experiência sensorial desejada no churrasco. O uso de madeira resulta em uma coloração mais avermelhada da carne devido à sua alta temperatura média da área de cocção. Isso potencializa a diminuição do teor de gordura na carne, mas também aumenta a quantidade de HPAs devido às elevadas emissões resultantes da combustão incompleta tanto da biomassa, quanto da própria gordura que goteja na fonte de calor. Por outro lado, o uso de carvão vegetal e briquete proporciona uma temperatura mais homogênea durante a combustão, resultando em uma coloração mais amarelada da carne. Além disso, essas biomassas mantêm uma maior quantidade de lipídios na carne, o que contribui para diminuir a quantidade de HPAs, mesmo que ainda estejam presentes.