



DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E
DE COMPUTADORES

EVANDRA ROSSANA DA SILVA MAGALHÃES

Licenciada em Engenharia de Recursos Naturais e Ambiente

INFLUÊNCIA DE SOLOS MARGINAIS NA PRODUTIVIDADE E NO BALANÇO ENERGÉTICO DA UTILIZAÇÃO DE SORGO PARA ENERGIA

MESTRADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2025

INFLUÊNCIA DE SOLOS MARGINAIS NA PRODUTIVIDADE E NO BALANÇO ENERGÉTICO DA UTILIZAÇÃO DE SORGO PARA ENERGIA

EVANDRA ROSSANA DA SILVA MAGALHÃES

Mestre/Licenciado em Engenharia de Recursos Naturais e Ambiente

Orientadora: Ana Luísa Almaça da cruz Fernando,
Professora Associada, Universidade NOVA de Lisboa

Influência de solos marginais na produtividade e no balanço energético da utilização de sorgo para energia,

Copyright © <Evandra Magalhães>, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicatory lorem ipsum.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, desejo expressar a minha gratidão a Deus, pela força, pela serenidade e pela luz que me concedeu em cada etapa deste percurso acadêmico e pessoal. Sem a Sua presença constante, esta caminhada teria sido muito mais árdua.

À Professora Doutora Ana Luísa Fernando, minha orientadora, deixo o meu mais sincero reconhecimento pela orientação científica rigorosa, pela paciência e pelo incentivo ao longo deste trabalho. A sua disponibilidade e dedicação foram determinantes para que esta dissertação pudesse chegar a bom porto.

À minha família, em especial aos meus pais, Gaspar Magalhães e Eva Magalhães, agradeço por todo o apoio incondicional, pela confiança depositada em mim e por nunca deixarem de acreditar na minha capacidade de alcançar os meus objetivos. Aos meus irmãos, Andreia, Carolina e Adriano, deixo igualmente um profundo agradecimento, pela presença constante, pelo carinho e pelo incentivo em cada momento.

Aos colegas, principalmente a Murina Khan e a Mariana Pereira, que partilharam comigo esta jornada, manifesto a minha gratidão pela amizade, pelo espírito de entreajuda e pelas experiências partilhadas, que tornaram este caminho mais leve e enriquecedor.

Por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, expresso um sincero e sentido obrigado.

“You cannot teach a man anything; you can only help him
discover it in himself.” (Galileo).

RESUMO

A presente dissertação analisa a influência dos solos marginais na produtividade, na qualidade da biomassa e no balanço energético do sorgo (*Sorghum bicolor* L.), avaliando o seu potencial como cultura energética sustentável.

O estudo baseou-se na análise comparativa de artigos científicos dedicados à produtividade e à qualidade da biomassa e em cálculos energéticos realizados para diferentes rotas de conversão: combustão, cogeração (CHP), gaseificação, pirólise, fermentação alcoólica e hidrólise/fermentação lignocelulósica.

A energia de entrada total no cultivo do sorgo foi estimada em 12,6 GJ/ha, incluindo consumos de gasóleo, fertilizantes, sementes, pesticidas e maquinaria. Consideraram-se dois cenários de produtividade: 4 t/ha, representando solos marginais com limitação hídrica ou nutricional, e 45 t/ha, correspondendo a condições edafoclimáticas favoráveis.

Os resultados mostram que, em solos marginais (4 t/ha), as rotas termoquímicas mantêm viabilidade energética, com NER entre 1,2 e 4,3, enquanto as rotas bioquímicas (fermentação e hidrólise) apresentam $NER < 1$, refletindo balanços negativos. Já em condições ótimas (45 t/ha), todas as rotas se tornam energeticamente favoráveis, com destaque para a combustão ($NER \approx 41,2$), cogeração ($NER \approx 24,1$) e pirólise ($NER \approx 6,9$).

A análise global confirma o baixo custo energético do sorgo face a outras culturas bioenergéticas (como milho e miscanthus), aliado à sua elevada eficiência fotossintética, tolerância ao stress hídrico e capacidade de cultivo em solos pobres.

Conclui-se que o sorgo constitui uma alternativa sólida e sustentável para a produção de bioenergia, capaz de transformar áreas degradadas em sistemas produtivos, contribuindo para a valorização de solos marginais, a redução das emissões de gases com efeito de estufa e o avanço da transição energética.

Palavras-chave: Sorgo, Solos marginais, Balanço energético, Biomassa, Bioenergia

ABSTRACT

This dissertation analyses the influence of marginal soils on the productivity, biomass quality, and energy balance of sorghum (*Sorghum bicolor* L.), assessing its potential as a sustainable energy crop.

The study was based on a comparative analysis of scientific literature addressing sorghum productivity and biomass quality, as well as on energy balance calculations for different conversion routes: combustion, combined heat and power (CHP), gasification, pyrolysis, alcoholic fermentation, and lignocellulosic hydrolysis/fermentation.

The total energy input for sorghum cultivation was estimated at 12.6 GJ/ha, including diesel, fertilizers, seeds, pesticides, and machinery. Two productivity scenarios were considered: 4 t/ha, representing marginal soils with water or nutrient limitations, and 45 t/ha, corresponding to favourable edaphoclimatic conditions.

The results show that, under marginal soil conditions (4 t/ha), thermochemical routes remain energetically viable, with NER values between 1.2 and 4.3, while biochemical routes (fermentation and hydrolysis) present $NER < 1$, reflecting negative energy balances. Under optimal conditions (45 t/ha), all conversion routes become energetically favourable, with combustion ($NER \approx 41.2$), CHP ($NER \approx 24.1$), and pyrolysis ($NER \approx 6.9$) standing out.

The overall analysis confirms the low energy cost of sorghum compared to other bioenergy crops (such as maize and miscanthus), combined with its high photosynthetic efficiency, tolerance to water stress, and ability to grow in nutrient-poor soils.

It is concluded that sorghum represents a solid and sustainable alternative for bioenergy production, capable of transforming degraded areas into productive systems, contributing to the valorisation of marginal soils, the reduction of greenhouse gas emissions, and the advancement of the energy transition.

Keywords: Sorghum, Marginal soils, Energy balance, Biomass, Bioenergy

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Introdução e Objectivos do trabalho	1
1.2	Estrutura do Trabalho	2
2	SOLOS MARGINAIS	3
2.1	Definição e Características dos solos Marginais.....	3
2.2	Limitações e Desafios da produção de Biomassa em solos Marginais.....	5
3	O SORGO COMO CULTURA ENERGÉTICA.....	8
3.1	Características Gerais do Sorgo.....	8
3.2	Aplicações Energéticas do Sorgo	11
3.3	Benefícios do Sorgo em Comparação com outras Culturas Energéticas.....	18
3.4	Influência dos solos marginais na produtividade, na qualidade da biomassa e no balanço energético do sorgo para energia.....	20
4	METODOLOGIA.....	23
4.1	Critérios de Inclusão	24
4.2	Critérios de Exclusão	24
4.3	Cálculo do balanço energético do sistema bioenergético.....	26
4.4	Cálculo do balanço energético das rotas de conversão	32
5	RESULTADOS.....	37

5.1 Efeito de diferentes Solos Marginais na Produtividade e Qualidade da Biomassa – Casos de Estudo	37
5.2 Caracterização da Biomassa de sorgo em Solos Marginais: Teores de Cinzas, Azoto e Açúcares.....	54
6 BALANÇO ENERGÉTICO DO SORGO EM SOLOS MARGINAIS	62
6.1 Balanço Energético – Inputs de Energia no Cultivo do Sorgo	62
6.2 Avaliação do balanço energético do sorgo em diferentes rotas de conversão	64
7 CONCLUSÕES	67
7.1 Principais Conclusões	67
7.2 Limitações do Trabalho	68
7.3 Perspetivas Futuras e Recomendações.....	69
8 BIBLIOGRAFIA.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-1 Características físicas do solo. A. Textura (composição e porosidade) e Retenção de água; B. Compactação; C. Agregação. Fonte: Revista Agrotecnologia, Ipameri, v. 13, n. 2, p. 46-65, 2022.....	4
Figura 3.1-1 Ilustração das estruturas vegetativas e reprodutivas do sorgo. Fonte: Salvadoretal.2022-Indicadoresdeeficinciabiologica.pdf.....	9
Figura 3.1-2 Características do sorgo biomassa. Fonte: Sorgo-para-bioenergia.pdf Foto: Leonardo D. Pimentel.	10
Figura 3.1-3 Características do sorgo sacarino. Fonte: Sorgo-para-bioenergia.pdf Foto: Leonardo D. Pimentel.	10
Figura 3.1-4 Características do sorgo Forrageiro. Fonte: Semente de Sorgo Forrageiro Biomatrix Podium 10 kg.	11
Figura 3.2-1 Composição da biomassa lignocelulósica do sorgo biomassa e a sua finalidade.	13
Figura 3.2-2 Diversas formas de uso do caule do sorgo sacarino para produção de bioenergia.	16

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química comparativa entre solos férteis e solos marginais	5
Tabela 2 - Composição do suco e fibra do sorgo sacarino em comparação com a cana energia. Fonte: Kim; Day (2011).	15
Tabela 33- Energia de processo (por rota de conversão e produtividade agrícola).....	34
Tabela 3- Produtividade do sorgo em solos marginais.....	38
Tabela 4-Produtividade do sorgo em solos marginais.....	38
Tabela 5- Produtividade do sorgo bioenergético em diferentes condições de solo marginal e de referência (Illinois, EUA).....	39
Tabela 6- Produtividade do sorgo em solos marginais do Zimbabué.....	40
Tabela 7- Produtividade do sorgo em solos marginais (Nigéria, semiárido, 2015-2016).....	41
Tabela 8- Produtividade do sorgo em solos marginais (China, 2013–2014).....	42
Tabela 9- Produtividade do sorgo sacarino em solos marginais do Noroeste da China	43
Tabela 10- Produtividade do sorgo em solos marginais e agrícolas na China (2013–2014).....	43
Tabela 11-Produtividade do sorgo em diferentes condições de solo agrícola e marginal (Illinois, EUA, 2018–2021).....	44
Tabela 12- Produtividade do sorgo forrageiro sob diferentes regimes de irrigação (Karaj, Irão, 2019–2020).....	45
Tabela 13- Produtividade do sorgo em diferentes locais e condições.....	46
Tabela 14- Produtividade do sorgo sacarino em solos marginais vs regulares (Roménia, 2020– 2021).....	47
Tabela 15- Produtividade do sorgo IPA SF-15 sob stress hídrico e salino no semiárido brasileiro	47
Tabela 16- Produtividade do sorgo em condições de irrigação deficitária em ambiente Mediterrânico.....	48

Tabela 17- Sorgo forrageiro sob rega com efluente tratado (semiárido do Brasil).....	48
Tabela 18- Produtividade do sorgo em solos marginais na Indonésia (Hazmi et al., 2022). ...	49
Tabela 19- Produtividade do sorgo nos EUA (diversos ensaios, 1985–2009).....	50
Tabela 20- Produtividade do sorgo energético em ambientes árido e semiárido do Texas (2014–2015).....	51
Tabela 21- Produtividade do sorgo em solos marginais da Nigéria (2018).	52
Tabela 22- Produtividade do sorgo (matéria seca) em consórcio com feijão-mungo (Etiópia, 2025).....	52
Tabela 23- Teores de Açúcar, Cinzas e Azoto do sorgo (Missouri, EUA).	54
Tabela 24- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Ordos, Mongólia Interior, China).	55
Tabela 25- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (China, 2013–2014).	55
Tabela 26- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Illinois, EUA, 2009–2021).	56
Tabela 27- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Roménia, 2020–2021).	56
Tabela 28- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Irão, 2019–2020).....	57
Tabela 29 Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Irão, 2022).	57
Tabela 30- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Brasil, 2017–2018).	57
Tabela 31- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (China, 2024).	58
Tabela 32- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (China, 2024).	58
Tabela 34- Energia útil, inputs energéticos, NEB e NER por rota e produtividade agrícola. Produtividade de 4t/ha.	64
Tabela 35- Energia útil, inputs energéticos, NEB e NER por rota e produtividade agrícola. Produtividade de 45t/ha.	65

GLOSSÁRIO

Biomassa – Matéria orgânica de origem vegetal ou animal, utilizada como fonte de energia renovável.

Biochar – Subproduto sólido da pirólise da biomassa, utilizado para sequestro de carbono e melhoria da fertilidade do solo.

Biorrefinaria – Unidade industrial que integra diferentes processos de conversão da biomassa para produção de energia, combustíveis e coprodutos.

Fitorremediação – Técnica de remediação ambiental que utiliza plantas para remover, imobilizar ou degradar contaminantes do solo ou da água.

Matéria seca (MS) – Fração da biomassa obtida após remoção da água; usada como base de comparação em produtividade agrícola.

Poder Calorífico Inferior (PCI) – Quantidade de energia liberada pela combustão completa de um combustível, desconsiderando a energia de condensação da água.

Rácio EROEI – Indicador que relaciona a energia produzida com a energia investida ao longo do ciclo produtivo.

Sequestro de carbono – Processo de captura e armazenamento de carbono atmosférico em reservatórios naturais ou artificiais.

Solos marginais – Solos com baixa fertilidade, salinidade elevada, contaminação ou outras limitações que reduzem sua aptidão agrícola.

Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) – Cultura versátil utilizada para alimentação, forragem e produção de bioenergia, com elevada resistência a condições edafoclimáticas adversas.

SIGLAS

EROEI – Energy Return on Energy Invested (Retorno Energético do Investimento Energético)

FAO – Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura)

GEE – Gases com Efeito de Estufa

IRENA – International Renewable Energy Agency (Agência Internacional de Energias Renováveis)

LCA – Life Cycle Assessment (Avaliação do Ciclo de Vida)

MS – Matéria Seca

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OPEX – Operational Expenditure (Custos Operacionais)

PCI – Poder Calorífico Inferior

PRI – Período de Retorno do Investimento

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

USDA – United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)

VAL – Valor Atual Líquido

WUE – Water Use Efficiency (Eficiência no Uso da Água)

SÍMBOLOS

C – Carbono

C3 / C4 – Tipos de ciclo fotossintético

Ca – Cálcio

Cd – Cádmio

Cl – Cloro

Cu – Cobre

H – Hidrogénio

Hg – Mercúrio

K – Potássio

Li – Lítio

N – Azoto (Nitrogénio)

Na – Sódio

O – Oxigénio

P – Fósforo

Pb – Chumbo

S – Enxofre

Zn – Zinco

MJ – Megajoule

ha – hectare

kg – quilograma

t – Tonelada

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e Objectivos do trabalho

Ao longo dos anos, a busca por fontes de energia renovável e sustentável tornou-se um tema central nas discussões globais sobre mudanças climáticas e segurança energética. O uso da biomassa ganhou destaque pelo seu potencial energético, especialmente por ser um substituto dos combustíveis fósseis e ajudar na redução de emissões de gases de estufa.

A necessidade de conciliar a produção de energia com a preservação dos recursos naturais tem levado à busca de alternativas que diminuam a pressão dos solos agrícolas férteis, indispensáveis para a produção de alimentos. Neste contexto, o aproveitamento de terrenos que apresentam limitações físicas, químicas ou biológicas (solos marginais) surge como alternativa promissora (FAO, 2016; Kang et al., 2013). Apesar de serem subestimados, solos marginais quando bem aproveitados podem servir para o cultivo destinados exclusivamente à geração de energia, evitando a concorrência com a produção alimentícia (Batidzirai et al., 2012). A utilização de sorgo em solos marginais levanta, no entanto, várias questões científicas e técnicas, relativamente ao impacto da produtividade, à qualidade da biomassa obtida e à eficiência energética do processo como um todo. As diferentes condições do solo podem influenciar significativamente o rendimento por hectare, mas também as características físicas e químicas da biomassa produzida (Baldini et al., 2022; Xu et al., 2017).

Diante deste contexto, o presente estudo busca analisar criticamente o estado actual do conhecimento científico sobre a relação entre a utilização dos solos marginais e o desempenho do sorgo como cultura energética. Por meio de uma revisão bibliográfica, pretende-se compreender os principais fatores que influenciam essa relação, identificar abordagens adotadas em pesquisas anteriores e destacar os desafios quanto às possibilidades para a valorização

energética do sorgo em áreas de baixa qualidade do solo. Será efetuado um balanço energético da produção, processamento e utilização do sorgo cultivado em solos marginais para energia, estudando-se diferentes processamentos - combustão, gasificação, pirólise, fermentação e hidrólise e fermentação para produção de bioetanol. Os resultados permitem identificar a tecnologia mais promissora do ponto de vista de balanço energético para a utilização de sorgo cultivado em solos marginais.

1.2 Estrutura do Trabalho

Em termos de estrutura, a dissertação organiza-se da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: contextualiza o tema, justifica a sua relevância e apresenta os objetivos e estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Solos Marginais: caracteriza os diferentes tipos de solos marginais e analisa os impactos das suas limitações edáficas na produção agrícola e bioenergética.

Capítulo 3 – O Sorgo e as suas Aplicações Energéticas: apresenta uma revisão sobre as variedades de sorgo e as principais rotas de conversão energética da biomassa.

Capítulo 4 – Solos Marginais e o Sorgo: Revisão Bibliográfica: integra estudos científicos que relacionam o cultivo do sorgo com solos marginais e avalia o seu desempenho em diferentes cenários edafoclimáticos.

Capítulo 5 – Resultados e Discussão: sintetiza os resultados da revisão bibliográfica, com destaque para produtividade, qualidade da biomassa e balanço energético do sorgo em solos marginais, complementado por quadros e figuras interpretativas.

Capítulo 6 – Considerações Finais: apresenta as conclusões principais, limitações do estudo e recomendações para investigações futuras e aplicações práticas.

SOLOS MARGINAIS

2.1 Definição e Características dos solos Marginais

Solos Marginais, definidos como solos que ostentam limitações significativas que dificultam a sua utilização na agricultura convencional, devido a barreiras físicas, químicas ou biológicas que impactam negativamente o crescimento das plantas. São muitas vezes associados a funções ecológicas ou produção de benefícios para a sociedade para um dado uso ([Pulighe et al., 2019](#)).

O termo “solos marginais” geralmente é dividido em dois principais contextos, no âmbito econômico, e referente à marginalidade física do solo.

Economicamente, define-se solos marginais como aquele que não é possível atingir produções com uma relação custo-benefício boa, sob determinadas condições regionais, técnicas de cultivo, políticas agrícolas e condições macroeconômicas e legais ([Kang et al., 2013a](#); [Schroers, 2006](#)).

Na abordagem física e produtiva solos marginais são geralmente identificados por limitações que os deixam com baixo potencial ou até mesmo inadequados para actividades agrícolas ([Kang et al., 2013a](#)). A marginalidade desses solos, resulta de variados factores, que podem estar relacionados a limitações visíveis, algumas transitórias, ou a restrições do uso do solo ([Pulighe et al., 2019](#)).

A formação destes solos é directamente influenciada por factores naturais e antropogénicos que afetam directamente a fertilidade, estrutura e a capacidade produtiva dos solos. Nestes factores, estão incluídas condições climáticas extremas, características geológicas desfavoráveis, uso dos solos inadequados e impactos de actividades humanas.

Tal como foi referido anteriormente, os solos marginais são caracterizados por deficiências físicas, químicas e biológicas, onde a sua produção agrícola e sustentabilidade a longo prazo fica comprometida.

Características Físicas: Parte responsável pela produtividade e capacidade de absorção de nutrientes dos solos, onde destacam-se a Textura Pobre, baixa capacidade de retenção de água, a Compactação e baixa porosidade, Problemas de drenagem e a Erosão dos solos.

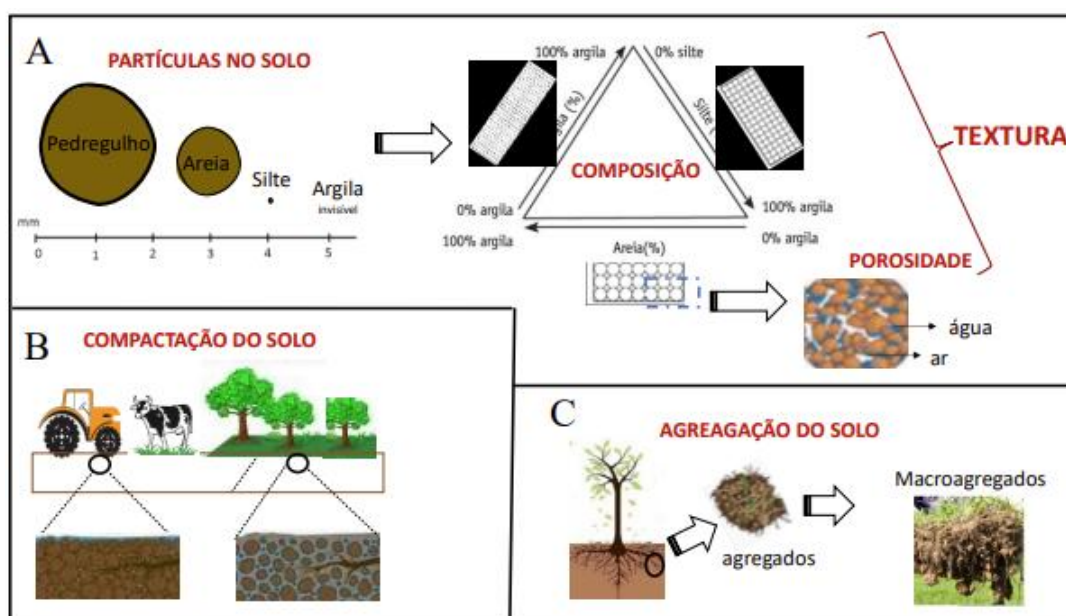


Figura 2.1-1 Características físicas do solo. A. Textura (composição e porosidade) e Retenção de água; B. Compactação; C. Agregação. Fonte: Revista Agrotecnologia, Ipameri, v. 13, n. 2, p. 46-65, 2022

Características Químicas: Está marcada pela deficiência nos nutrientes essenciais como o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), pela presença de elementos tóxicos presentes como o chumbo (Pb), cádmio (Cd) e mercúrio (Hg) e pelo pH inadequado para a absorção dos nutrientes.

Na tabela abaixo, está evidenciada uma comparação entre solos férteis e solos marginais relativamente à quantidade dos nutrientes essenciais.

Tabela 1 - Composição química comparativa entre solos férteis e solos marginais

Nutrientes	Solos Férteis (mg/kg)	Solos Marginais (mg/kg)
Nitrogênio (N)	1000 - 3000	< 500
Fósforo (P)	30 - 60	< 10
Potássio (K)	100 – 250	< 50
Cálcio (Ca)	500 – 1500	< 300
Magnésio (Mg)	100 – 500	< 50
pH	6.0 – 7.5	< 5.5 ou > 8.5

Características Biológicas: Um dos principais factores determinantes para a qualidade do solo, os solos marginais apresentam baixa atividade microbiana e biodiversidade reduzida, afetando a decomposição da matéria orgânica e o ciclo de nutrientes. Observa-se também em níveis reduzidos bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos, comprometendo a fertilidade e a saúde do solo, dificultando o desenvolvimento das plantas. A utilização de solos marginais para a produção de biomassa energética, permite reduzir o risco associado ao uso do solo para a produção de alimentos.

2.2 Limitações e Desafios da produção de Biomassa em solos Marginais

A produção de biomassa em solos marginais representa uma grande oportunidade para dar resposta a grande demanda por energias renováveis e biomateriais sustentáveis, ao mesmo tempo possibilita a reabilitação e a utilização produtiva de terras de baixa qualidade agronómica (FAO, 2017). Solos marginais são caracterizados por limitações físicas, químicas e biológicas que dificultam a agricultura convencional, mas que podem ser adequados para culturas energéticas, como o sorgo, o miscanthus, o eucalipto e outras espécies adaptadas a condições adversas (Lewandowski et al., 2003).

A utilização desses solos para a produção de biomassa tem diversas vantagens. Primeiramente, evita-se a competição com terras agricultáveis destinadas à produção de alimentos, um dos principais desafios da expansão da bioenergia (Tilman et al., 2006). Além disso, a recuperação desses solos através de práticas sustentáveis pode melhorar sua estrutura, aumentar o teor de matéria orgânica e promover a fixação de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Lal, 2004).

Outro aspecto muito vantajoso é a capacidade de algumas espécies vegetais de fitorremediação, remover metais pesados e outras substâncias tóxicas dos solos degradados. Espécies como o *Pennisetum purpureum*, popularmente conhecido como o capim-elefante e o *Salix* spp (salgueiro). São frequentemente estudadas por sua habilidade de crescer em solos contaminados e absorver poluentes (Pilon-Smits, 2005), contribuindo não só para a produção da biomassa, mas também para a recuperação ambiental.

Entretanto, apesar de tantas vantagens, a produção de biomassa em solos marginais enfrenta desafios significativos. As principais limitações estão relacionadas à baixa fertilidade dos solos, deficiências nutricionais, alta salinidade, compactação e drenagem inadequada, além da presença de toxinas que podem comprometer o crescimento das culturas energéticas (Ravindranath et al., 2005). Estes factores reduzem significativamente a produtividade e aumentam os custos de implantação e manutenção das plantações.

Além do mais, para a produção de biomassa, a disponibilidade de água é um factor crítico. Muitos solos marginais estão localizados em regiões semiáridas ou sujeitas a estresses hídricos, tornando necessária a adoção de estratégias de manejo para garantir um suprimento adequado de água (Chaves et al., 2003). O uso eficiente de fertilizantes e corretivos do solo é outra questão crítica, pois solos marginais frequentemente apresentam baixos teores de nutrientes essenciais, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) (Marschner, 1995).

Outro desafio, é a viabilidade econômica da produção em solos de baixa qualidade. A produtividade reduzida pode comprometer a rentabilidade da biomassa, exigindo incentivos políticos e estratégias de mercado para tornar esses projetos viáveis (Popp et al., 2014). Além disso, a mecanização pode ser limitada em solos de topografia acidentada ou com alto grau de compactação, aumentando os custos operacionais (Fargione et al., 2008).

Neste contexto, a exploração da biomassa em solos marginais deve ser abordada com estratégias integradas de manejo, incluindo a seleção de espécies resistentes, o uso de técnicas de melhoramento genético, a adoção de práticas conservacionistas e o emprego de biotecnologias para maximizar o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis (Baral & Guha, 2018).

Contudo, como principais desafios químicos temos:

✓ Deficiência de nutrientes essenciais: Solos marginais geralmente apresentam baixos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), comprometendo o crescimento das plantas (Marschner, 1995).

✓ Alta salinidade: Em algumas regiões, a acumulação excessiva de sais pode reduzir a absorção de água pelas raízes e inibir o desenvolvimento das plantas (Chaves et al., 2003).

✓ Presença de metais pesados e contaminantes: Certos solos marginais contêm elementos tóxicos, como chumbo (Pb), cádmio (Cd) e arsênio (As), que podem afetar a fisiologia vegetal e limitar a produtividade (Pilon-Smits, 2005).

Como principais desafios físicos temos:

✓ Compactação do solo: Muitos solos marginais apresentam elevada compactação, dificultando a penetração das raízes e a absorção de nutrientes e água (Ravindranath et al., 2005).

✓ Drenagem inadequada: A presença de solos com baixa permeabilidade pode resultar em encharcamento, afetando negativamente o crescimento das culturas energéticas (Lewandowski et al., 2003).

✓ Baixa capacidade de retenção de água: Em regiões semiáridas, a falta de matéria orgânica reduz a retenção hídrica, aumentando o risco de estresse hídrico para as plantas (Chaves et al., 2003).

Como principais desafios biológicos temos:

✓ Baixa biodiversidade microbiana: A ausência de microrganismos benéficos pode limitar a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo (Lal, 2004).

✓ Competição com espécies invasoras: Os solos marginais são frequentemente ocupados por espécies vegetais invasoras que podem competir por recursos com as culturas energéticas (Tilman et al., 2006).

✓ Susceptibilidade a pragas e doenças: A baixa fertilidade pode tornar as plantas mais vulneráveis a pragas e patógenos, reduzindo sua produtividade (Baral & Guha, 2018).

O SORGO COMO CULTURA ENERGÉTICA

3.1 Características Gerais do Sorgo

O sorgo é uma gramínea anual, pertencente à família Poaceae, à Sub-família Panicoideae, gênero *Sorghum*, espécie *Sorghum bicolor* L. Moench, e de ordem Poales é uma planta originária do continente africano. Comumente conhecido como milho-zaburro no Brasil, como maira em Moçambique e massambala em Angola. Sendo a quinta cultura mais cultivada no mundo, após trigo, arroz, milho e cevada (FAO, 2021). Devido a sua alta capacidade de adaptação às condições climáticas adversas é principalmente cultivado em regiões de climas tropicais e subtropicais onde a escassez hídrica é um fator limitante para outras culturas ([RAT-NAYAKE et al., 2021](#)).

Com um sistema radicular do tipo fasciculado e profundo, as suas raízes podem alcançar até 2 metros de profundidade, o que promove maior eficiência na absorção de e de nutrientes em solos áridos ([BLÜMEL et al., 2018](#)). O seu caule é ereto, robusto e lignificado, e apresenta internódios suculentos em alguns cultivos destinados à produção de biomassa ou bioenergia ([MARQUES et al., 2022](#)). As plantas do sorgo podem alcançar uma altura de 1 e 5 metros, tendo em conta o seu genótipo e das condições ambientais. As suas folhas são alternadas, lanceoladas e têm o caule envolvido por meio de bainhas, onde são cobertas por ceras epicuticulares que reduzem significativamente a transpiração e aumentam a eficiência no uso da água ([COSTA et al., 2020](#)). As suas flores podem ser pequenas e hermafroditas, com inflorescência de panículas do tipo terminal, que podem ser abertas ou compactas, garantindo uma taxa de autofecundação elevada e estabilidade genética ([KASSAHUN et al., 2019](#)).

Os grãos do sorgo possuem forma esférica ou ovalados, são pequenos, com diâmetro de 2 a 5 mm e geralmente apresentam coloração branca, amarela ou vermelha. A cor dos grãos depende muito das culturas. Os sorgos vermelhos contêm altos teores de taninos condensados,

que afetam a digestibilidade dos nutrientes, mas possuem maior resistência a pragas e doenças ([DE ALMEIDA et al., 2021](#)).

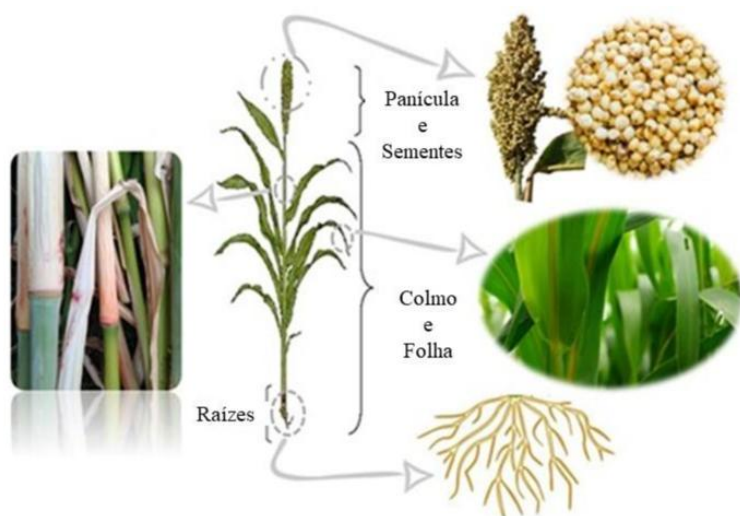


Figura 3.1-1 Ilustração das estruturas vegetativas e reprodutivas do sorgo. Fonte: Salvadoreta.2022-Indicadores de eficiência biológica.pdf

Os sorgos podem ser classificados em cinco grupos: granífero, sacarino, biomassa, vas-soura e forrageiro. Sendo o sorgo biomassa, o sacarino e o forrageiro são os mais requisitados como fonte de bioenergia devido à elevada produtividade de matéria seca.

- Sorgo Biomassa

Também conhecido como sorgo energia, esta cultivar é muito alta, com 3 metros de altura mínima, pode atingir até os 6 metros de altura, tem os colmos grossos e cheios de fibra, panículas pequenas e com poucos grãos. É sensível ao fotoperíodo, florescendo apenas em dias com menos de 12h e 20 minutos (Pereira Filho et al., 2013). Com um poder calorífico semelhante ao da cana, do eucalipto e do capim é adequado para a geração de energia ([Embrapa, 2014](#)). Muito utilizado em usinas termoelétricas e em indústrias com caldeiras que geram energia para consumo próprio. O material é muito econômico e produz bastante biomassa em pouco tempo, alcança 150 toneladas de matéria fresca por hectare e até 50 toneladas de matéria seca. Este tipo de sorgo é bastante vigoroso, resistente a pragas e doenças, e tolera muito o acamamento (Torres, 2013).



Figura 3.1-2 Características do sorgo biomassa. Fonte: Sorgo-para-bioenergia.pdf Foto: Leonardo D. Pimentel.

- Sorgo Sacarino

Cultivar com mais de 3 metros, possui colmos suculentos. O caldo do colmo contém sacarose, frutose e glicose, o que facilita a fermentação alcoólica (Saidur et al., 2011). Este sorgo, é muito semelhante à cana-de-açúcar, uma vez que armazena açúcares simples nos seus colmos, revelando um elevado potencial para a produção de bioetanol. No entanto, distingue-se da cana-de-açúcar pela rapidez do seu ciclo produtivo, pela maior mecanização da cultura e pela possibilidade de antecipar a colheita em até quatro meses ([Embrapa, 2008](#)). Quando o caldo é extraído, o bagaço gerado pode ser aproveitado para a geração de energia térmica ou elétrica, ou até mesmo para produção de etanol de celulose ou de segunda geração como também é conhecido.



Figura 3.1-3 Características do sorgo sacarino. Fonte: Sorgo-para-bioenergia.pdf Foto: Leonardo D. Pimentel.

- Sorgo Forrageiro

Cultivares de sorgo com altura entre 2 e 3 metros, podem apresentar colmos suculentos ou secos, doces ou insossos e grãos pequenos. Estas variedades possuem características fenotípicas que facilitam o plantio, o manejo, a colheita e o armazenamento. Além disso, destacam-se pela elevada concentração de carboidratos solúveis, favorecendo a fermentação láctica, pelo alto valor nutritivo e pelos elevados rendimentos de massa seca por unidade de área, o que as torna amplamente utilizadas na produção de silagem para a alimentação de bovinos ([Castro, 2014](#)).

De modo geral, estas cultivares produzem uma grande quantidade de massa verde, e para atender às necessidades das pecuaristas é a opção mais viável. Suas características bromatológicas, são semelhantes às do milho, e permitem uma fermentação adequada e, consequentemente, a conservação deste alimento de forma de silagem ([Gomes et al., 2006](#)).



Figura 3.1-4 Características do sorgo Forrageiro. Fonte: Semente de Sorgo Forrageiro Biomatrix Podium 10 kg.

3.2 Aplicações Energéticas do Sorgo

O sorgo biomassa apresenta na sua composição lignocelulose que é propícia para a geração de energia elétrica, isso deve-se a predominância de carboidratos presentes na sua biomassa, mesmo contendo também uma fração de carboidratos não estruturais pequena. ([ROONEY, 2014](#)). É comparado o seu poder calorífico, o seu teor de cinzas, a sua concentração de carbono, e as suas propriedades químicas com as de outras gramíneas que são também utilizadas para a produção de energia ([MAY et al., 2013](#)).

Os essenciais carboidratos estruturais, celulose, lignina e hemicelulose, têm um papel essencial na sustentação das células vegetais e, podem aumentar significativamente a capacidade de combustão do material vegetal dependendo das suas proporções.

O poder calorífico é o fator que determina o potencial energético da biomassa, o que corresponde a quantidade de energia que essa biomassa no processo de combustão consegue liberar. No caso do sorgo biomassa o poder calorífico médio é de 4000 kcal/kg, fazendo-o uma fonte energética viável, isso deve-se a presença da celulose, lignina e hemicelulose na sua composição, em comparação a açúcares solúveis e cinzas contribuindo para a sua eficiência como biocombustível.

Tanto nas folhas quanto nos colmos do sorgo biomassa estão presentes os carboidratos estruturais, portanto, a produção de açúcares solúveis e cinzas ocorre em diferentes partes da planta e de forma diferenciada. (TANG et al., 2018). Em geral, os cultivares de sorgo biomassa apresentam 5% e 10% de teores de lignina, 15% e 25% de hemicelulose e variando 35% a 45% de celulose como valores médios ([MAY et al., 2013](#)).

Aplicação Energética do sorgo biomassa

O sorgo biomassa apresenta grande potencial para a produção de bioenergia, devido aos seus componentes como o amido, açúcares fermentescíveis e lignocelulose. Para fins energéticos, os seus componentes lignocelulósicos permitem a sua utilização em vários processos. Nos processos de combustão pode-se aproveitar a lignina presente na biomassa do sorgo para fornecer energia para as caldeiras em usinas termoelétricas e, posteriormente, gerar eletricidade. Além disso, a hemicelulose e a celulose podem ser convertidas em biocombustível (etanol).

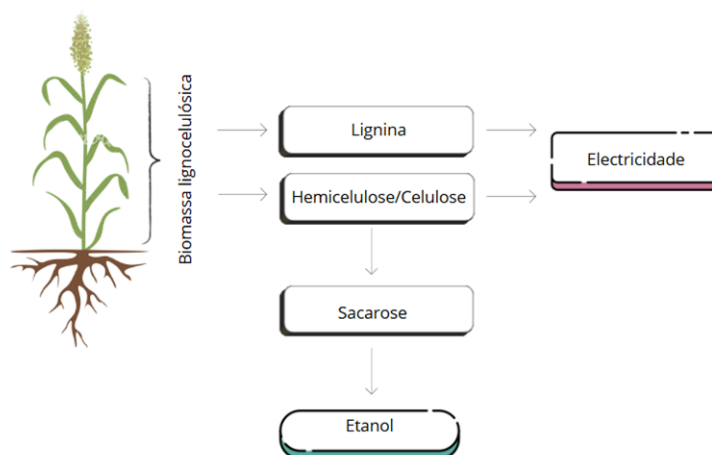


Figura 3.2-1 Composição da biomassa lignocelulósica do sorgo biomassa e a sua finalidade.

Um dos principais parâmetros para avaliar o potencial energético de combustíveis provenientes da biomassa é o poder calorífico, porque contabiliza a quantidade de energia que é liberada durante o processo da queima de uma unidade de massa do material (PROTÁSIO et al., 2011).

Dentre todas as aplicações energéticas do sorgo biomassa a combustão direta é a que mais se destaca, é utilizada para a conversão do sorgo biomassa em eletricidade ou produção de calor. É no processo de combustão direta que a biomassa seca é queimada com a presença de oxigênio, libertando energia térmica que pode ser aproveitada ou convertida em eletricidade através de cogeração, como em turbinas a vapor (Zegada-Lizarazu & Monti, 2011).

Outra rota tecnológica para o aproveitamento do sorgo biomassa para fins energéticos é a gaseificação, diferente da combustão direta, a gaseificação é um processo termoquímico realizado com limitações da presença de oxigênio e com temperaturas por volta dos 800-1000 °C, onde a biomassa converte-se em gás de síntese (syngas), composto predominantemente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). O gás resultante, pode ser aproveitado como combustível em motores de combustão interna ou em turbinas para a produção de eletricidade, pode ainda, ser transformado em combustíveis líquidos através de síntese química, como o método Fischer-Tropsch (Basu, 2010). Devido a sua alta densidade energética e ao baixo teor de humidade residual após secagem, o sorgo biomassa é uma matéria-prima adequada à gaseificação (Sims et al., 2006).

A pirólise, que também é uma rota tecnológica de conversão aplicável ao sorgo biomassa, focaliza na decomposição térmica da biomassa sem a presença do oxigênio a

temperaturas que variam de 400-600 °C, originando frações como o bio-óleo (líquido), o biochar (sólido) e o gás de pirólise. O bio-óleo pode ser utilizado como combustível líquido ou refinado como insumo para indústria química; o biochar, com poder calorífico de ~ 25 MJ/kg pode ser valorizado tanto como combustível sólido ou como condicionador de solos, contribuindo também para o sequestro carbônico (Lehmann & Joseph, 2015). Por sua vez, o gás gerado pode ser reutilizado como fonte de energia para o próprio processo. Esta tecnologia permite descentralizar a conversão energética e o uso de biomassa em locais afastados dos pólos industriais (Bridgwater, 2012).

Apesar de os processos termoquímicos serem os mais indicados para a biomassa lignificada do sorgo energético, esta cultura também pode ser submetida à digestão anaeróbica, sobretudo quando é ensilada previamente. No entanto, devido ao seu alto teor de lignina, a sua degradação biológica é limitada, o que obriga, aplicar frequentemente pré-tratamentos (físicos, químicos ou térmicos) para melhorar a acessibilidade microbiana (Kaparaju et al., 2009). O biogás resultante deste processo, com um teor significativo de metano, pode ser utilizado para a conversão em energia térmica e elétrica ou, após processos de purificação, transformado em biometano apto à injeção em rede de gás natural ou à utilização como combustível veicular (Angelidaki et al., 2011).

Sendo assim, o sorgo evidencia-se como uma cultura energética altamente adaptável, com variadas possibilidades de aplicações energéticas, produção de calor, eletricidade, e a produção de combustíveis quer sejam eles líquidos e gasosos, além de contribuir de forma relevante para estratégias de bioeconomia circular. A sua elevada produtividade em solos deficientes, reduzida exigência hídrica e resiliência a condições climáticas adversas, tornam-no especialmente interessante para regiões semiáridas, colocando o sorgo biomassa como uma opção estratégica no contexto da transição energética e na diversificação da matriz energética baseada em fontes renováveis (Bentsen & Felby, 2012; FAO, 2010).

Aplicação Energética do sorgo sacarino

Entre os materiais que são utilizados para a produção de bioenergia, o foco está na geração de carboidratos, que são classificados em estruturais, como a celulose, a hemicelulose e a lignina, e não estruturais, como o açúcar e o amido (ISIKGOR; BECER, 2015). Diferente do

sorgo biomassa, no sorgo sacarino os não estruturais são mais relevantes, pois o açúcar presente no suco extraído do colmo é composto por sacarose ou glicose.

A composição química da casca e do mesocarpo do sorgo sacarino é muito variada (Tabela 3). No mesocarpo é onde contém 71% dos carboidratos não estruturais, sendo a sacarose o componente principal, a seguir vem a glicose. Já na casca há 45,5 % de carboidratos estruturais, além de 32,2% de sacarose (BILLA et al., 1997).

Para a produção de etanol, estas características do sorgo sacarino fazem dele ideal para esta produção pois há baixa quantidade de lignina e elevada concentração de açúcares solúveis, facilitando a fermentação. Para que a produção de bioetanol aconteça, as variedades que têm menor teor de lignina na parede celular são mais apropriadas, pois permitem uma conversão mais eficiente dos açúcares em combustível renovável.

Na tabela abaixo apresentamos a composição da cana energia em comparação ao sorgo sacarino. O caldo do sorgo sacarino contém 11,8% de açúcar dividido entre sacarose, glicose e frutose, que prontamente podem ser convertidos em etanol, quando a cana energia só possui 9,8%.

Tabela 2 - Composição do suco e fibra do sorgo sacarino em comparação com a cana energia.
Fonte: Kim; Day (2011).

Componentes	Sorgo Sacarino (%)	Cana Energia (%)
Suco	71.9	53.6
Sacarose	7.6	9.6
Glicose	2.6	0.1
Frutose	1.6	0.1
Açúcares	11.8	9.8
Fibras (Massa seca)	13	26.7
Celulose (Massa seca)	44.6	43.3
Hemicelulose (Massa seca)	27.1	23.8
Lignina (Massa seca)	20.7	21.7
Cinzas	0.4	0.8

Como consta na tabela acima, o sorgo sacarino produz maior quantidade de etanol a partir do caldo em comparação a cana energia (KIM; DAY, 2011). Na sua composição também contém arabinose, galactose, manose e xilose (BILLA et al., 1997; DAR et al., 2008). Segundo

Teixeira et al. (2017), depois do florescimento, o momento ideal para a colheita é quando os grãos da panícula atingem o estágio de grão leitoso. nesta etapa, o sorgo apresenta os melhores rendimentos industriais, garantindo maior eficiência na produção de bioetanol.

Aplicações energéticas do sorgo sacarino

É nos colmos que está o principal componente do sorgo sacarino para a produção de bioenergia, onde os açúcares estão acumulados em forma de sucos, e podem ser extraídos e fermentados para produção de etanol. Neste processo, pode-se utilizar a mesma estrutura e processo da produção da cana-de-açúcar. Na primeira fase o sorgo é tratado, e a seguir passa por aquecimento, decantação e filtração (FERREIRA, 2015).

Além do colmo, o bagaço, vinhaça vapor e espuma também são utilizados como matéria-prima para outras finalidades. Na figura abaixo, ilustramos algumas dessas finalidades.

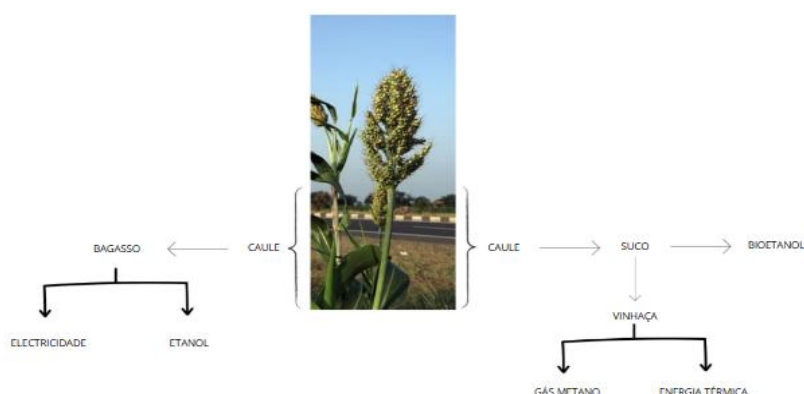


Figura 3.2-2 Diversas formas de uso do caule do sorgo sacarino para produção de bioenergia.

Depois da extração do suco, o bagaço, serve como matéria-prima para geração de eletricidade, também se pode utilizar a biomassa lignocelulósica para produzir etanol e plásticos biodegradáveis, e como subproduto da produção de etanol podemos obter um líquido destilado chamado vinhaça.

A Partir do sorgo sacarino, pode ser também produzido o biogás. Um combustível limpo e amigo do meio ambiente por causa do menor número de derramamento de poluentes precários (APPELS et al., 2011).

A utilização energética do sorgo sacarino contribui significativamente para a redução da dependência de combustíveis fósseis, possibilitando a produção de bioetanol renovável com baixo custo energético e ambiental. Além disso, a sua adaptabilidade agronômica e o elevado rendimento energético por hectare tornam esta cultura uma alternativa viável e sustentável para regiões tropicais e subtropicais, reforçando o seu papel estratégico na matriz energética baseada em fontes renováveis (FAO, 2010; Bentsen & Felby, 2012).

Composição do sorgo forrageiro

A composição deste sorgo, pode mudar consoante a fase de crescimento e as condições ambientais. No entanto, a sua biomassa contém principalmente carboidratos estruturais, proteínas, minerais e humidade. Os carboidratos estruturais estão presentes como celulose 30-40%, hemicelulose 20-30% e lignina 5-15%, o que influencia o seu aproveitamento energético e a digestibilidade da biomassa (Oliveira et al., 2021). O sorgo forrageiro, possui também pequenas quantidades de amido e açúcares solúveis, o que faz dele um concorrente apto para a processos de conversão bioquímica, como na produção etanol de segunda geração (Teixeira et al., 2017).

O teor de proteína bruta do sorgo varia entre 6 e 12%, é um factor de extrema importância para sua digestibilidade e aproveitamento em processos para produção de biogás através da digestão anaeróbica ([Costa et al., 2018](#)). A concentração de lipídios é inferior a 3%, o que faz com que seu valor energético seja reduzido em processos de combustão direta (Pereira et al., 2020).

Na biomassa deste sorgo, há minerais essenciais, como o potássio (K), fósforo (P) e cálcio (Ca), que influenciam não só no aproveitamento energético dos resíduos, como também na qualidade dos solos ([Almeida et al., 2022](#)). É necessário um processo de secagem para a planta do sorgo forrageiro porque a planta fresca tem um teor de humidade que varia de 60% e 80% (Mendonça et al., 2019).

Aplicações energéticas do sorgo forrageiro

Devido a sua elevada produtividade, o sorgo forrageiro tem grande potencial para a produção de energia renovável em variados formatos, incluindo biogás, combustão, gaseificação e produção de etanol de segunda geração.

Através da digestão anaeróbica é possível produzir biogás a partir da biomassa do sorgo forrageiro. Biogás que é um combustível rico em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), é geralmente utilizado para a geração de eletricidade, calor em motores e turbinas a gás, além do mais, pode ser injetado quando purificado na rede de gás natural (Ferreira et al., 2021). Segundo (Lopes et al., 2022), a produção de biogás a partir do sorgo forrageiro pode ser comparável a do milho.

A biomassa do sorgo forrageiro, pode ser utilizada como combustível sólido para gerar eletricidade e calor em caldeiras e sistemas de combustão industriais para serem utilizados em aquecimentos de instalações agrícolas/industriais (Santos et al., 2023), gerar electricidade em centrais térmicas (Carvalho et al., 2021).

Já na gaseificação, a biomassa do sorgo forrageiro é convertida em (syngas), contendo na sua composição monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2) e metano (CH_4). O syngas que resulta do processo termoquímico da biomassa do sorgo forrageiro pode ser utilizado para alimentar turbinas e motores para geração de electricidade ([Oliveira et al., 2021](#)), produzir biocombustíveis líquidos, como diesel e metanol (Moreira et al., 2022).

Mesmo o sorgo forrageiro contendo uma pequena quantidade de açúcares solúveis, a sua biomassa pode ser convertida em bioetanol de segunda geração (2G), mas para isso será necessário um pré-tratamento da biomassa para que as cadeias celulósicas e hemiceluloses quebrem, ocorrerá também o processo de hidrólise para conversão dos polissacarídeos em açúcares fermentáveis e também ocorrerá a fermentação alcoólica e destilação para obtenção do etanol (Silva et al., 2022).

3.3 Benefícios do Sorgo em Comparação com outras Culturas Energéticas

O sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench), nas suas diferentes variantes — sacarino, forrageiro e biomassa — tem vindo a destacar-se como uma cultura energética promissora, especialmente quando comparado com outras culturas utilizadas para fins energéticos, como o milho, a cana-de-açúcar, o trigo, o miscanthus ou o switchgrass. Esta superioridade relativa decorre de um conjunto de características agronômicas, ecológicas e energéticas que tornam o sorgo particularmente competitivo no atual contexto de transição energética e alterações climáticas.

Um dos principais benefícios do sorgo face a outras culturas bioenergéticas é a sua elevada tolerância a condições de stress hídrico. Trata-se de uma espécie originária de regiões semiáridas, com adaptações fisiológicas que incluem mecanismos de regulação estomática, eficiente uso da água e elevado índice de tolerância à seca (Reddy et al., 2009). Em comparação, culturas como o milho (*Zea mays*) e o trigo (*Triticum aestivum*) são altamente sensíveis a défices hídricos, sofrendo reduções significativas de produtividade em cenários de escassez de água (Sanchez et al., 2002). O sorgo, pelo contrário, mantém produtividade satisfatória mesmo sob regimes de pluviosidade reduzida, o que o torna ideal para regiões com irregularidade hídrica ou onde os recursos hídricos são limitados.

Adicionalmente, o sorgo possui elevada eficiência fotossintética, associada ao seu metabolismo C4. Este tipo de metabolismo permite-lhe converter a radiação solar em biomassa de forma mais eficaz do que culturas com metabolismo C3, como a soja ou o trigo, principalmente em condições de elevada luminosidade e temperatura (Zegada-Lizarazu & Monti, 2011). Tal característica resulta em altos rendimentos de matéria seca por hectare, mesmo em solos marginais. Culturas como o miscanthus também apresentam elevada produtividade, mas exigem um maior investimento inicial, mais tempo para atingir a produtividade máxima e menor flexibilidade de uso agronómico (Heaton et al., 2008).

Outro ponto favorável ao sorgo é a sua versatilidade de aproveitamento energético. Dependendo da variedade, o sorgo pode ser usado para produção de bioetanol (sorgo sacarina), biomassa lignocelulósica para combustão, gaseificação ou pirólise (sorgo biomassa), ou ainda como substrato para digestão anaeróbia (sorgo forrageiro ou os seus resíduos) (Gnan-sounou et al., 2005). Esta multifuncionalidade confere ao sorgo uma flexibilidade industrial que nem sempre está presente em outras culturas energéticas mais específicas, como a cana-de-açúcar, que se destina quase exclusivamente à produção de etanol, ou o switchgrass, majoritariamente usado para combustão ou gaseificação.

Em termos ecológicos, o sorgo apresenta menor risco de invasividade do que outras espécies perenes exóticas, como o miscanthus ou o switchgrass, sendo também mais fácil de integrar em sistemas de rotação de culturas. Além disso, exige menos fertilizantes e produtos fitossanitários do que o milho, contribuindo assim para a redução da pegada ambiental e do custo de produção (FAO, 2010). Em cenários de agricultura sustentável, esta menor

dependência de insumos sintéticos torna o sorgo uma alternativa mais alinhada com os objetivos de conservação dos solos e de proteção dos recursos naturais.

Do ponto de vista socioeconómico, o sorgo representa uma cultura de baixo custo de produção, acessível a pequenos e médios agricultores, especialmente em países em desenvolvimento. A sua capacidade de adaptação a solos degradados e o seu ciclo curto favorecem o cultivo em regiões de menor aptidão agrícola, promovendo a inclusão socioeconómica e o uso produtivo de terras marginalizadas (Rooney et al., 2007). Em contrapartida, culturas como a cana-de-açúcar ou o milho requerem maiores volumes de investimento inicial, mecanização intensiva e irrigação, o que pode limitar a sua viabilidade económica em contextos rurais menos desenvolvidos.

Por fim, o sorgo destaca-se também pela sua capacidade de integração em estratégias de bioeconomia circular, permitindo o aproveitamento integral da planta (colmos, folhas e resíduos) e a valorização dos subprodutos gerados ao longo da cadeia de conversão energética. Esta abordagem favorece a sustentabilidade dos sistemas bioenergéticos e a redução das perdas energéticas ao longo do ciclo de vida da cultura (Bentsen & Felby, 2012).

3.4 Influência dos solos marginais na produtividade, na qualidade da biomassa e no balanço energético do sorgo para energia

A crescente procura por fontes renováveis de energia tem impulsionado a valorização de culturas bioenergéticas adaptáveis a condições edafoclimáticas adversas, com destaque para o sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench). Esta cultura tem demonstrado particular aptidão para cultivo em solos marginais — áreas com limitações físicas, químicas ou biológicas que comprometem o desempenho agronómico de culturas convencionais (FAO, 2010; Zegada-Lizarazu & Monti, 2011). A análise da performance do sorgo nestes ambientes desfavoráveis é essencial para avaliar a sua viabilidade como cultura energética sustentável, especialmente no contexto da transição energética e da recuperação de terrenos subutilizados.

3.4.1.1 Solos marginais e produtividade do sorgo

A produtividade do sorgo em solos marginais depende de múltiplos fatores, nomeadamente a textura do solo, a capacidade de retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a salinidade. Apesar das limitações intrínsecas desses solos, o sorgo apresenta características morfofisiológicas que lhe conferem elevada resiliência, incluindo um sistema radicular profundo e ramificado, elevada eficiência no uso da água e tolerância à seca e à salinidade (Reddy et al., 2009). Estudos indicam que, mesmo sob condições de baixa fertilidade e pluviosidade limitada, o sorgo pode alcançar produtividades de biomassa superiores a 10 t/ha, especialmente quando são aplicadas práticas agronómicas adequadas, como adubação corretiva e seleção varietal (Rooney et al., 2007; Zegada-Lizarazu & Monti, 2011).

Contudo, deve reconhecer-se que a produtividade tende a ser inferior à obtida em solos agrícolas de elevada qualidade. Ainda assim, a relação custo-benefício permanece favorável, uma vez que o uso de insumos é reduzido, e o cultivo em solos marginais evita a competição direta com a produção alimentar, promovendo uma abordagem mais ética e sustentável para a produção de energia (Bentsen & Felby, 2012).

3.4.1.2 Qualidade da biomassa produzida

A qualidade da biomassa do sorgo, avaliada em termos de composição lignocelulósica, teor de humidade, concentração de açúcares (no caso do sorgo sacarino) ou digestibilidade (no caso do forrageiro), pode ser afetada pelos atributos do solo. Solos com baixa disponibilidade de nutrientes, especialmente azoto, fósforo e potássio, podem limitar a formação de tecidos vegetais estruturais e afetar negativamente a acumulação de açúcares e a proporção entre celulose, hemicelulose e lignina (Heaton et al., 2004). Em particular, o aumento do teor de lignina em condições de stress hídrico ou salino pode reduzir a eficiência de conversão bioquímica da biomassa, tanto na fermentação como na digestão anaeróbia (Saini et al., 2015).

Por outro lado, certas condições de estresse controlado podem induzir respostas fisiológicas que aumentam a concentração de açúcares nos colmos, beneficiando a produção de bioetanol em sorgos sacarinos. Assim, a qualidade da biomassa em solos marginais não é necessariamente inferior, mas depende do equilíbrio entre a tolerância varietal e as práticas de manejo adaptadas às limitações edáficas específicas.

3.4.1.3 Impacto no balanço energético

O balanço energético de uma cultura bioenergética é determinado pela razão entre a energia útil obtida a partir da biomassa e a energia investida em todo o ciclo de produção, desde a preparação do solo até à conversão final em combustível. Neste aspeto, o cultivo de sorgo em solos marginais pode oferecer vantagens significativas. Devido à baixa exigência em fertilizantes, pesticidas e irrigação, o consumo energético associado ao cultivo é relativamente reduzido (FAO, 2010; Sims et al., 2006).

Mesmo que a produtividade em termos absolutos seja mais baixa, a redução do uso de insumos e o aproveitamento de terrenos improdutivos contribuem para um balanço energético positivo e robusto, especialmente quando a biomassa é valorizada integralmente (incluindo resíduos e subprodutos). Por exemplo, em sistemas de co-produção de etanol e energia térmica a partir do bagaço, ou de biogás a partir dos resíduos da extração, a eficiência global do sistema bioenergético pode atingir valores superiores aos de culturas mais exigentes, cultivadas em solos férteis (Gnansounou et al., 2005).

METODOLOGIA

A presente dissertação assenta numa revisão bibliográfica sistemática e integrativa, cujo objetivo é compilar, organizar e analisar criticamente a literatura existente acerca da influência de solos marginais na produtividade, qualidade da biomassa e balanço energético do sorgo destinado a fins energéticos. Esta opção metodológica justifica-se pela diversidade de estudos já desenvolvidos a nível internacional e pela necessidade de reunir, comparar e discutir os resultados disponíveis, de modo a extrair conclusões sólidas e sustentadas cientificamente.

A pesquisa bibliográfica foi conduzida em bases de dados científicas internacionais de elevada relevância, nomeadamente Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink e Google Scholar. Foram ainda incluídos relatórios técnicos da FAO, IRENA e Agência Internacional de Energia, bem como documentos de acesso aberto publicados em repositórios institucionais. Esta abrangência permitiu integrar tanto artigos de investigação experimental como revisões anteriores, garantindo uma visão global do estado da arte.

A estratégia de pesquisa baseou-se na utilização de palavras-chave cuidadosamente selecionadas, de forma isolada e em combinações booleanas. Exemplos incluem: “*sorghum biomass*”, “*sweet sorghum ethanol yield*”, “*forage sorghum bioenergy*”, “*marginal soils bioenergy crops*”, “*energy balance sorghum*”, “*sorghum lignocellulosic composition*”. Foram ainda consideradas variantes em português e espanhol, para incluir literatura da Península Ibérica e da América Latina.

4.1 Critérios de Inclusão

Os critérios de inclusão definidos foram:

- (i) Artigos publicados entre 2015 e 2025, com revisão por pares;
- (ii) Estudos que abordem explicitamente a produtividade, qualidade ou balanço energético do sorgo;
- (iii) Investigações em condições de solos marginais (salinos, semiáridos, de baixa fertilidade, contaminados ou irrigados com efluentes);
- (iv) Documentos técnicos de organismos internacionais relevantes.

4.2 Critérios de Exclusão

Por sua vez, os critérios de exclusão compreenderam:

- (i) Estudos meramente exploratórios sem dados quantitativos;
- (ii) Trabalhos repetidos em diferentes bases de dados;
- (iii) Publicações sem rigor científico (ex.: relatórios não técnicos, literatura cinzenta sem revisão).

Tabela 3- Tabela Metodológica

ELEMENTO	DESCRIÇÃO
Bases de dados	Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, FAO, IRENA
Intervalo temporal	2015–2025
Palavras-chave	<i>sorghum biomass, sweet sorghum ethanol yield, forage sorghum bioenergy, marginal soils bioenergy, energy balance sorghum</i>
CrITÉRIOS de inclusÃO	Artigos peer-reviewed; estudos com dados de produtividade, qualidade ou balanço energético; condições de solos marginais
CrITÉRIOS de exclusÃO	Estudos sem dados quantitativos; duplicados; documentos sem rigor científico
Ferramentas de apoio	Mendeley e Zotero para gestão bibliográfica; Excel para sistematização de dados

Após a recolha inicial, procedeu-se a uma triagem em duas fases: numa primeira etapa, avaliou-se a pertinência dos estudos através da leitura de títulos e resumos; numa segunda etapa, foi realizada a leitura integral dos artigos selecionados, com identificação das variáveis relevantes para esta dissertação. Este processo permitiu filtrar um conjunto representativo de estudos de diferentes regiões do mundo, assegurando comparabilidade de dados.

Para a organização da informação, os trabalhos selecionados foram classificados em três grandes eixos temáticos: (i) produtividade do sorgo em solos marginais, (ii) qualidade da biomassa em função das condições edáficas e (iii) balanço energético associado à utilização do sorgo como cultura bioenergética. Esta classificação serviu de base à estrutura dos capítulos 3 e 5 da dissertação, garantindo coerência interna.

A análise dos resultados recolhidos envolveu a normalização de unidades, sempre que necessário, para permitir comparações consistentes. A produtividade foi expressa em toneladas de matéria seca por hectare (t MS/ha), o rendimento teórico de etanol em litros por hectare (L/ha) e o poder calorífico inferior em megajoules por quilograma (MJ/kg). Os valores foram, sempre que possível, convertidos para unidades padrões da literatura científica em bioenergia.

De modo a facilitar a comparação entre estudos, recorreu-se à representação gráfica e tabular dos dados. As informações foram sintetizadas em quadros comparativos e

transformadas em gráficos no Microsoft Excel, seguindo uma metodologia uniforme que garante clareza e transparência. Estes gráficos foram posteriormente numerados e incluídos nos capítulos correspondentes (3 e 5), sendo parte integrante da análise crítica.

A análise comparativa focou-se na identificação de padrões recorrentes entre diferentes tipos de solos marginais e variedades de sorgo (biomassa, sacarino e forrageiro). Sempre que os dados disponíveis o permitiram, foi realizada uma comparação quantitativa direta entre o desempenho do sorgo e o de outras culturas bioenergéticas, como milho, cana-de-açúcar ou *miscanthus*.

Por fim, importa destacar as limitações inerentes à revisão bibliográfica. Entre elas, salientam-se: (i) a escassez de estudos de longo prazo em solos marginais, (ii) a diversidade de metodologias analíticas utilizadas por diferentes autores, o que pode dificultar a comparação direta dos resultados, e (iii) a maior concentração de investigações em determinadas regiões (EUA, China, Índia), com menor representatividade de contextos africanos e sul-americanos.

Apesar destas limitações, a metodologia adotada permitiu reunir um corpo de evidências robusto, que suporta as análises realizadas nos capítulos seguintes. O recurso à revisão bibliográfica sistemática garante que as conclusões apresentadas refletem o estado atual do conhecimento científico sobre a utilização do sorgo em solos marginais e o seu potencial para bioenergia.

4.3 Cálculo do balanço energético do sistema bioenergético

O balanço energético em sistemas agrícolas é amplamente utilizado como indicador de sustentabilidade, permitindo comparar a energia investida com a energia recuperada na forma de biomassa colhida (Pimentel & Pimentel, 2008; Lal, 2004).

No caso do sorgo, enquanto cultura C4 com elevada eficiência fotossintética, a contabilização rigorosa dos inputs energéticos é essencial para avaliar o seu potencial em sistemas de bioenergia (Rooney et al., 2007; Kim & Dale, 2004).

Os inputs energéticos foram classificados em **fluxos diretos** (gasóleo e eletricidade) e **fluxos indiretos**, correspondentes à energia incorporada nos insumos (fertilizantes, corretivos, sementes, pesticidas) e na produção e manutenção de maquinaria agrícola (Stout, 1990; Fluck, 1992).

Os cálculos seguiram as expressões apresentadas por Pimentel e Lal, considerando o somatório de todos os consumos energéticos por hectare.

Os coeficientes energéticos adotados foram:

- Diesel: 38,6 MJ/L
- N: 60 MJ/kg; P₂O₅: 12 MJ/kg; K₂O: 8 MJ/kg
- Sementes: 18 MJ/kg
- Herbicida: 300 MJ/kg
- Calcário: 1 MJ/kg
- Maquinaria: 3,0 GJ/ha
- Transporte: 0,8 MJ/t·km

Combustível (gasóleo agrícola)

O gasóleo constitui o principal input direto no cultivo do sorgo, utilizado em operações mecanizadas como lavoura, gradagem, sementeira, pulverizações, transporte e colheita. O cálculo baseia-se no volume consumido por hectare e no poder calorífico inferior (PCI), que varia entre 35,8 e 38,6 MJ/L (FAO, 2001; Pimentel & Pimentel, 2008).

$$PCI_{diesel} = 38,6 \text{ MJ/L}$$

$$V_{diesel} = 70 \text{ L/ha. (consume anual por hectare)}$$

$$E_{diesel} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = \frac{V_{diesel}[L/ha] \times PCI_{diesel}[MJ/L]}{1000}$$

Onde:

E_{diesel} = Energia proveniente do consumo de gasóleo (GJ/ha)

V_{diesel} = Volume de gasóleo consumido (L/ha)

PCI_{diesel} = Poder calorífico inferior do gasóleo (MJ/L)

Lubrificantes e óleos

A energia relativa ao consumo de lubrificantes pode ser aproximada como fração da energia do gasóleo, variando entre 2% e 5% (Singh et al., 2008; Uhlin, 1998). Mas para este caso vamos usar o valor estimado de 3%.

$$E_{lub} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = f_{lub} \times E_{diesel}, \quad f_{lub} \in [0.03]$$

Onde:

E_{lub} = Energia dos lubrificantes (GJ/ha)

f_{lub} = Fator percentual (3%)

E_{diesel} = Energia do gasóleo (GJ/ha)

Fertilizantes (energia incorporada)

Os fertilizantes, em especial os azotados, são os insumos com maior peso energético, devido à elevada intensidade energética da sua produção (Lal, 2004; IFA, 2020).

Doses anuais: N= 80 kg/ha; P_2O_5 = 40 kg/ha ; K_2O = 40 kg/ha

$$E_{fert} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = \frac{\sum_j m_j [kg/ha] \times CE_j [MJ/kg]}{1000}$$

Onde:

E_{fert} = Energia incorporada nos fertilizantes (GJ/ha)

m_j = Massa de fertilizante j aplicada (kg/ha)

CE_j = Coeficiente energético do fertilizante (MJ/kg)

Corretivos de solo

A aplicação de corretivos como calcário ou gesso envolve energia associada à sua extração, moagem e transporte, estimada em ≈ 1 MJ/kg (Macedo, 2008).

Calcário: 500 kg/ha; CE=1 MJ/kg

$$E_{corr} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = \frac{m_{corr}[kg/ha] \times CE_{corr}[MJ/kg]}{1000}$$

Onde:

E_{corr} = Energia incorporada em corretivos de solo (GJ/ha)

m_{corr} = Massa de corretivo aplicado (kg/ha)

CE_{corr} = Coeficiente energético do corretivo (MJ/kg)

Sementes

A energia incorporada nas sementes corresponde ao processo de produção, processamento e transporte, com coeficientes entre 15 e 20 MJ/kg (Uhlin, 1998; Pimentel & Pimentel, 2008).

Dose: 12 kg/ha; CE=18 MJ/kg

$$E_{sem}[GJ/ha] = \frac{m_{sem}[kg/ha] \times CE_{sem}[MJ/kg]}{1000}$$

Onde:

E_{sem} = Energia incorporada nas sementes (GJ/ha)

m_{sem} = Massa de sementes aplicada (kg/ha)

CE_{sem} = Coeficiente energético das sementes (MJ/kg)

Pesticidas

Os pesticidas possuem energia incorporada elevada devido aos processos químicos da sua síntese industrial, variando entre 200 e 500 MJ/kg de ingrediente ativo (Green, 1987; Lal, 2004).

Herbicida: 1,5 kg i.a./ha; CE=300 MJ/kg i.a..

$$E_{pest} [GJ/ha] = \frac{\sum_k m_{k,i.a.}[kg/ha] \times CE_k[MJ/kg]}{1000}$$

Onde:

E_{pest} = Energia incorporada nos pesticidas (GJ/ha)

$m_{k,i.a.}$ = Massa de ingrediente ativo kkk aplicada (kg/ha)

CE_k = Coeficiente energético do pesticida kkk (MJ/kg)

Transporte de insumos

A energia do transporte de fertilizantes, sementes e pesticidas até à exploração pode ser calculada com base na massa transportada, distância percorrida e coeficiente modal (Ecoinvent, 2007). Para transporte rodoviário médio europeu considera-se ≈ 0.8 MJ/t·km.

Massa total transportada: sementes (0,012 t) + fertilizantes (0,160 t) + calcário (0,500 t) + pesticidas (0,002 t) = 0,674 t.

Distância média: 100 km; $CE_{tkm} = 0,8$ MJ/t·km

$$E_{transp-in} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = \frac{\sum_i M_i[t] \times D_i[km] \times CE_{tkm}[MJ/(t \cdot km)]}{1000}$$

Onde:

$E_{transp-in}$ = Energia do transporte de insumos até à exploração (GJ/ha)

M_i = Massa transportada (t)

D_i = Distância percorrida (km)

CE_{tkm} = Coeficiente energético modal (MJ/t·km)

Transporte interno

Movimentações internas na exploração agrícola, caso sejam contabilizadas separadamente, podem ser estimadas pelo volume de gasóleo consumido.

$$E_{transp-int} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = \frac{V_{diesel,int}[L/ha] \times PCI_{diesel}[MJ/L]}{1000}$$

Onde:

$E_{transp-int}$ = Energia do transporte interno na exploração (GJ/ha)

$V_{diesel,int}$ = Volume de gasóleo para transporte interno (L/ha)

PCI_{diesel} = Poder calorífico inferior do gasóleo (MJ/L)

Maquinaria agrícola

A energia de fabrico e manutenção da maquinaria agrícola deve ser alocada à área total trabalhada ao longo da sua vida útil, sendo comumente estimada em 2–8 GJ/ha (Stout, 1990; Fluck, 1992). Alocação por área trabalhada (valor médio): 3,000 GJ/ha, portanto

$$E_{maq} = 3000 \text{ GJ/ha}$$

$$E_{maq} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ha}} \right] = \sum_q \left(\frac{E_{fab,q} [\text{GJ}]}{A_{vida,q} [\text{ha}]} \times f_{aloc,q} \right)$$

Onde:

E_{maq} = Energia incorporada da maquinaria (GJ/ha)

$E_{fab,q}$ = Energia de fabrico da máquina q (GJ)

$A_{vida,q}$ = Área total trabalhada pela máquina durante a vida útil (ha)

$f_{aloc,q}$ = Fração de utilização atribuída ao cultivo de sorgo (–)

Mão-de-obra

A energia metabólica humana é, em geral, excluída dos balanços energéticos agrícolas modernos por ser desprezável quando comparada com os restantes inputs (Fluck, 1992). Para este caso assumimos $E_{hum} = 0$

$$E_{hum} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ha}} \right] = \frac{h[h/\text{ha}] \times \text{kcal}/h \times 4184}{10^9}$$

Onde:

E_{hum} = Energia metabólica humana (GJ/ha)

h = Horas de trabalho aplicadas por hectare (h/ha)

$\frac{\text{kcal}}{h}$ = Energia metabólica média por hora (kcal/h)

4184 = Conversão de kcal para joule (J)

Total de inputs energéticos no cultivo

O somatório de todos os inputs permite estimar a energia total investida na produção de sorgo por hectare:

$$E_{inputs,cultivo} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = E_{diesel} + E_{lub} + E_{el} + E_{fert} + E_{corr} + E_{sem} + E_{pest} + E_{H2O-inc} + E_{transp-in} + E_{transp-int} + E_{maq} + E_{hum}$$

Onde:

$E_{inputs,cultivo}$ = Energia total investida no cultivo (GJ/ha)

4.4 Cálculo do balanço energético das rotas de conversão

A avaliação do balanço energético da utilização do sorgo (*Sorghum bicolor* L.) em diferentes rotas de conversão foi realizada com base em pressupostos que asseguram a comparabilidade entre cenários e a consistência dos resultados. A unidade funcional adotada foi a tonelada de biomassa seca (t MS), e a produtividade agrícola foi expressa em toneladas de matéria seca por hectare (t MS/ha). Dois cenários foram considerados: 4 t/ha, associado a solos marginais com limitação hídrica ou de fertilidade, e 45 t/ha, representativo de condições edafoclimáticas favoráveis e maior intensificação tecnológica (Pulighe et al., 2019; Kang et al., 2013).

O poder calorífico inferior (PCI) da biomassa seca foi assumido como 17 MJ/kg (17 GJ/t), em conformidade com valores médios reportados para gramíneas C4, incluindo o sorgo biomassa, forrageiro e sacarino (Zegada-Lizarazu et al., 2012; Monti et al., 2016). Este valor situa-se na mesma ordem de grandeza de culturas bioenergéticas consolidadas como o *miscanthus* e a cana-de-açúcar (Patel et al., 2023; Karan et al., 2024).

As eficiências de conversão de cada rota tecnológica foram definidas com base em revisões de literatura e dados experimentais:

- **Combustão direta:** rendimento elétrico 25% e rendimento térmico 80%;
- **Cogeração (CHP):** 25% em eletricidade e 50% em calor útil (IEA Bioenergy, 2019);
- **Gaseificação:** rendimento elétrico 30% e eficiência global de 60% quando aplicada à produção de combustíveis líquidos (Tumuluru et al., 2011);

- **Pirólise rápida:** 60% em bio-óleo, 15% em biochar e 25% em gases, considerando apenas o bio-óleo como energia líquida útil;
- **Fermentação alcoólica (sorgo sacarino):** rendimento médio de 261 kg de etanol/t MS, equivalente a 7,0 GJ/t (Zhang et al., 2021; Li et al., 2019);
- **Hidrólise/fermentação lignocelulósica:** rendimento médio de 250 L/t ($\approx 5,3$ GJ/t) (Sun & Cheng, 2002; Chandel et al., 2018).

Inputs Energéticos de Processo

O balanço energético incorpora ainda os consumos de energia associados às operações industriais de conversão, designados por $E_{in,processo}^{(ha)}$. Estes consumos incluem calor, vapor e eletricidade, sendo calculados como:

$$E_{in,processo}^{(ha)} = P \times (E_{th} + E_{el}) \quad [GJ/ha]$$

Onde:

P: corresponde à produtividade (4 ou 45 t/ha)

$(E_{th} + E_{el})$: representa o consumo específico do processo (GJ/t MS).

Os valores médios utilizados para cada rota foram obtidos da literatura especializada (Basu, 2010; Bridgwater, 2012; Chandel et al., 2018; IEA Bioenergy, 2019) e encontram-se na Tabela abaixo.

Tabela 4- Energia de processo (por rota de conversão e produtividade agrícola).

Rota	Consumo específico (GJ/t)	$E_{in,processo}^{(ha)} \left(\frac{4t}{ha} \right)$	$E_{in,processo}^{(ha)} \left(\frac{45t}{ha} \right)$
Combustão (eletricidade)	0,20	0,80	9,00
Combustão (calor)	0,05	0,20	2,25
Combustão (CHP)	0,25	1,00	11,25
Gaseificação → eletricidade	1,10	4,40	49,50
Gaseificação → combustíveis	2,50	10,00	112,50
Pirólise (bio-óleo)	1,20	4,80	54,00
Fermentação (EtOH)	3,55	14,20	159,75
Hidrólise/ Fermentação (EtOH LC)	7,00	28,00	315,00

Input Energético Total

O input energético total por hectare resulta da soma entre o cultivo e o processo:

$$E_{in,total} = E_{in,cultivo} + E_{in,processo}^{(ha)}$$

Energia útil produzida

A energia útil por hectare foi calculada a partir do PCI da biomassa (17 GJ/t) multiplicado pela eficiência de conversão de cada rota e pela produtividade agrícola:

$$E_{out}^{(ha)} = P \times (PCI \times \eta)$$

Indicadores energéticos

Os indicadores foram calculados como:

$$NEB = E_{out}^{(ha)} - E_{in,total}$$

$$NER = \frac{E_{out}^{(ha)}}{E_{in,total}}$$

RESULTADOS

5.1 Efeito de diferentes Solos Marginais na Produtividade e Qualidade da Biomassa – Casos de Estudo

Foi feita uma pesquisa bibliográfica de dados referente a ensaios em campo de cultivo de sorgo em solos marginais. Foi feita uma pesquisa na literatura académica e também em bases de dados de projetos. Os resultados apresentam-se nas tabelas seguintes.

Tabela 5- Produtividade do sorgo em solos marginais.

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
New Franklin Missouri	S. Sacarino (cv. M-81E)	19,4 t MS/ha	Solo com declive e risco de erosão	Maw, Houx & Fritschi (2017)
New Franklin Missouri	S. biomassa (cv. ES5200)	20,8 t MS/ha	Solo com declive e risco de erosão	Maw, Houx & Fritschi (2017)
Mount Vernon Missouri	S. Sacarino (cv. M-81E)	11,7 t MS/ha	Solo com suscetibilidade a cheias	Maw, Houx & Fritschi (2017)
Mount Vernon Missouri	S. biomassa (cv. ES5200)	8,7 t MS/ha	Solo com suscetibilidade a cheias	Maw, Houx & Fritschi (2017)

Tabela 6-Produtividade do sorgo em solos marginais.

Local	Tipo de Sorgo	Fertilização azotada (kg N/ha)	Produtividade em matéria seca (t MS/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Ordos Mongólia	Sorgo sacarino (GT-8)	0-240	6,0 – 9,0	Solo arenoso, semiárido	Tang et al. (2018)
Ordos Mongólia	Sorgo biomassa (GN-11)	0-240	6,5 – 9,3	Solo arenoso, semiárido	Tang et al. (2018)

Tabela 7- Produtividade do sorgo bioenergético em diferentes condições de solo marginal e de referência (Illinois, EUA)

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Urbana (Illinois, terras férteis)	Sorgo biomassa (TX17500, foto- período sensí- vel)	20,2 (17,0 – 23,2)	Solo de alta fer- tilidade	Jang et al. (2024)
Ewing Illinois	Sorgo biomassa (TX17500)	18,1 (13,1 – 19,8)	Baixa fertilidade em P e K	Jang et al. (2024)
Fairbury Illinois	Sorgo biomassa (TX17500)	13,8 (9,0 – 17,3)	Erosão e lixiviação de nutrientes	Jang et al. (2024)
Pesotum Illinois	Sorgo biomassa (TX17500)	23,3 (14,6 – 33,0)	Alagamento, erosão e escorrência su- perficial	Jang et al. (2024)

Tabela 8- Produtividade do sorgo em solos marginais do Zimbabué.

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Mbire Zimbabwe	Sorgo de grão (<i>Sorghum bicolor</i>)	0,2 – 0,5	Solo degradado (<0,4% C or- gânico)	Makuchete et al. (2024)
Mbire Zimbabwe	Sorgo de grão (<i>Sorghum bicolor</i>)	0,6 – 1,4	Solo degradado (<0,4% C or- gânico)	Makuchete et al. (2024)
Mutasa Zimbabwe	Sorgo de grão (<i>Sorghum bicolor</i>)	0,9 – 1,5	Solo produtivo (>0,6% C or- gânico)	Makuchete et al. (2024)
Mutasa Zimbabwe	Sorgo de grão (<i>Sorghum bicolor</i>)	1,5 – 2,1	Solo produtivo (>0,6% C or- gânico)	Makuchete et al. (2024)

Nota: os dados apresentados refletem apenas a produção do grão e não da totalidade da biomassa.

Tabela 9- Produtividade do sorgo em solos marginais (Nigéria, semiárido, 2015-2016).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Dutsin-Ma (Nigéria)	Sorgo de grão (<i>Sorghum bicolor</i> L., var. SAM- SORG 40)	0,609	Solo arenoso po- bre, ácido (pH ~4,7), baixo N e P	Adesoji et al. (2018)
Dutsin-Ma (Nigéria)	Sorgo de grão	1,007	Solo arenoso po- bre, ácido (pH ~4,7), baixo N e P	Adesoji et al. (2018)
Dutsin-Ma (Nigéria)	Sorgo de grão	1,152	Solo arenoso po- bre, ácido (pH ~4,7), baixo N e P	Adesoji et al. (2018)
Dutsin-Ma (Nigéria)	Sorgo de grão	~1,250*	Solo arenoso po- bre, ácido (pH ~4,7), baixo N e P	Adesoji et al. (2018)

Nota: os dados apresentados refletem apenas a produção do grão e não da totalidade da bio-massa

* Valor estimado a partir da percentagem de incremento reportada no artigo.

Tabela 10- Produtividade do sorgo em solos marginais (China, 2013–2014).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Binzhou (Shandong)	Biomassa e sacarino (híbridos GN-2, GN-4, GN-10; GT-3, GT-7)	12,2	Solo salino-álcali (clima sub- húmido)	Tang et al. (2018)
Ordos (Mongólia Interior)	Biomassa e sacarino	8,6	Solo degradado (semiárido, baixo teor orgânico e alta evaporação)	Tang et al. (2018)
Zhuozhou (Hebei)	Biomassa e sacarino	32,6	Solo fértil agrícola (sub-húmido)	Tang et al. (2018)
Média em todos os locais	Biomassa	17,3	-	Tang et al. (2018)
Média em todos os locais	Sacarino	14,7	-	Tang et al. (2018)
Média em todos os locais	Biomassa GN-10	17,4	-	Tang et al. (2018)
SHC (cropland fértil, controle)	Biomassa GN-4	42,1	Solo agrícola	Tang et al. (2018)

Tabela 11- Produtividade do sorgo sacarino em solos marginais do Noroeste da China

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Wuwei, Gansu	Sorgo sacarino (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	103,1 (colmos frescos) ~30–35 (esti- mado com 70% humidade)	Solo arenoso- siltoso marginal, limitado por re- cursos hídricos	Shi, X.; Du, T.; Dong, P.; Hu, T.

Tabela 12- Produtividade do sorgo em solos marginais e agrícolas na China (2013–2014).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Ordos, China (SAW)	Sorgo biomassa & sacarino	8,6 (média 2 anos)	Solo arenoso, clima semiárido	Tang, C.; Li, S.; Li, M.; Xie, G.H. (2018)
Binzhou, China (SHS)	Sorgo biomassa & sacarino	12,2 (média, 2 anos)	Solo salino, clima sub-húmido	Tang, C.; Li, S.; Li, M.; Xie, G.H. (2018)
Zhuozhou, China (SHC – re- ferência agrícola)	Sorgo biomassa & sacarino	32,6 (média, 2 anos – não mar- ginal)	Cropland fértil, clima sub-hú- mido	Tang, C.; Li, S.; Li, M.; Xie, G.H. (2018)

Tabela 13-Produtividade do sorgo em diferentes condições de solo agrícola e marginal (Illinois, EUA, 2018–2021.

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Urbana, Illinois (EUA)	Sorgo biomassa (híbrido TX17500, fotoperíodo sen- sível)	18–21	Solo agrícola fértil (cropland de referência)	Schetter, A.; Yu, J.; Gomez, J.; McKinley, B.; Maughan, M.; Olson, S.; et al.
Ewing, Illinois (EUA)	Sorgo biomassa (TX17500)	7,5–11	Solo marginal po- bre em P e K	Schetter, A.; Yu, J.; Gomez, J.; McKinley, B.; Maughan, M.; Olson, S.; et al.
Fairbury, Illinois (EUA)	Sorgo biomassa (TX17500)	9–13	Solo marginal su- jeito a erosão e li- xiviação	Schetter, A.; Yu, J.; Gomez, J.; McKinley, B.; Maughan, M.; Olson, S.; et al.
Pesotum, Illinois (EUA)	Sorgo biomassa (TX17500)	10–14	Solo marginal com baixa fertili- dade e drenagem limitada	Schetter, A.; Yu, J.; Gomez, J.; McKinley, B.; Maughan, M.; Ol- son, S.; et al.

Tabela 14- Produtividade do sorgo forrageiro sob diferentes regimes de irrigação (Karaj, Irão, 2019–2020).

Local	Tipo de Sorgo	Tratamento (irrigação)	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Karaj, Irão (semiárido)	Sorgo forrageiro híbrido	DRIP × I100	27,24	Solo franco argiloso	Ghalkhani, A. et al.
Karaj, Irão (semiárido)	Sorgo forrageiro híbrido	FURW × I100	25,76	Solo franco argiloso	Ghalkhani, A. et al.
Karaj, Irão (semiárido)	Sorgo forrageiro híbrido	DRIP × I75	23,85	Solo franco argiloso	Ghalkhani, A. et al.
Karaj, Irão (semiárido)	Sorgo forrageiro híbrido	FURW × I75	21,31	Solo franco argiloso	Ghalkhani, A. et al.
Karaj, Irão (semiárido)	Sorgo forrageiro híbrido	DRIP × I50	19,95	Solo franco argiloso	Ghalkhani, A. et al.
Karaj, Irão (semiárido)	Sorgo forrageiro híbrido	FURW × I50	16,74	Solo franco argiloso	Ghalkhani, A. et al.

Tabela 15- Produtividade do sorgo em diferentes locais e condições.

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginali- dade do solo	Autores
EUA (Texas, Iowa, Kansas, Kentucky, Mississippi, Carolina do Norte)	Grão	9,0	Marginal não irrigado	Cherney et al. (1990); Owens (2009)
EUA (Texas, Iowa, Kansas, Kentucky, Mississippi, Carolina do Norte)	Sorgo forrageiro	27,0	Marginal não irrigado	Cherney et al. (1990); Owens (2009)
EUA (Texas, Iowa, Kansas, Kentucky, Mississippi, Carolina do Norte)	Sorgo Biomassa	27–34	Marginal não irrigado	Cherney et al. (1990); Owens (2009)
Indiana, EUA (1988 – seca severa)	Sacarino / Sorgo × sudão	8,6	Solo seco (sequeiro)	Cherney et al. (1990)
Indiana, EUA (1988 – plantio antecipado)	Sorgo Sacarino	até 33,0	Solo seco (sequeiro)	Cherney et al. (1990)

Tabela 16- Produtividade do sorgo sacarino em solos marginais vs regulares (Roménia, 2020–2021).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t MS/ha)	Tipo de marginali- dade do solo	Autores
Roménia (Europa de Leste)	Sorgo sacarino (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	14,7	Solo marginal de- gradado (Classe VI USDA-NRCS, baixa fertilidade, sem irrigação, sem fertilização)	Popescu, A.; Marinescu, D.; Enache, M.; et al.
Roménia (referência)	Sorgo sacarino (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	23,6	Solo agrícola regu- lar (sem irrigação, sem fertilização)	Popescu, A.; Marinescu, D.; Enache, M.; et al.

Tabela 17- Produtividade do sorgo IPA SF-15 sob stress hídrico e salino no semiárido brasileiro

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Upanema–RN, Brasil (semiárido)	Sorgo forrageiro (cultivar IPA SF-15)	15 – 33 (76 a 95 DAP, de- pendendo da irri- gação)	Condições de dé- fice hídrico e irri- gação com água salina (1,5–6,0 dS m ⁻¹)	da Silva, R.R.; de Medeiros, J.F.; de Queiroz, G.C.M.; de Sousa, L.V.; de Souza, M.V.P.; et al. (2023)

Tabela 18- Produtividade do sorgo em condições de irrigação deficitária em ambiente Mediterrâneo.

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Região Mediterrânea (Itália)	Sorgo Biomassa (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	6,7 (0% ETc). 16,5 (33–66%ETc). 27,8 (100% ETc)	Solo agrícola marginal sujeito a déficit hídrico	Barbera, A.C.; Maucieri, C.; Cavallaro, V.; Ioppolo, A.; Spagna, G. 2016

Tabela 19- Sorgo forrageiro sob rega com efluente tratado (semiárido do Brasil).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Pesqueira–PE, Brasil (semiárido)	Sorgo forrageiro (<i>Sorghum sudanense</i> IPA SU-DAN 4202)	6,7 (0% ETc) – 27,8 (100% ETc) – valores máximos até ~30 t MS/ha (140% ETc com mulch)	Planossolo Hiperêutrico Albico (arenoso, salino)	Carvalho, A.A. de; Montenegro, A.A. de A.; de Lima, J.L.M.P.; Silva, T.G.F.; Pedrosa, E.M.R.; Almeida, T.A.B.

Tabela 20- Produtividade do sorgo em solos marginais na Indonésia (Hazmi et al., 2022).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Gunungkidul, Nusa Tenggara, Java Ori- ental (Indonésia)	Sorgo de grão (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	4–6 (média)	Solos secos e po- bres em nutrien- tes, baixa fertili- dade (marginal dry land)	Hazmi, M.; Uma- rie, I.; Mur- tiyaningsih, H.; Arum, L.S.
Indonésia (variedades melhora- das)	Sorgo de grão (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	até 10	Marginal dry land	Hazmi, M.; Uma- rie, I.; Mur- tiyaningsih, H.; Arum, L.S.

Tabela 21- Produtividade do sorgo nos EUA (diversos ensaios, 1985–2009)

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
EUA (Yield Contest, 2009)	Grão (<i>Sorghum bicolor</i>)	23 (máx.)	Irrigado e sequeiro	National Sorghum Producers (2009)
EUA (Texas A&M, meta)	Energético (forrageiro de alta biomassa)	45 (meta de melhoramento)	Experimen. tal	Schill (2007)
Indiana (Cherney et al., 1990)	Sacarino (sweet sorghum)	8,6	Sub-húmido; seca 1988	Cherney et al. (1990)
EUA (7 estados, 2008)	Grão	9	Multi-locais, não irrigado	Owens (2009)
EUA (7 estados, 2008)	Forrageiro	27	Multi-locais, não irrigado	Owens (2009)
EUA (7 estados, 2008)	Energético (alta biomassa)	27 – 34	Multi-locais, não irrigado	Owens (2009)

Tabela 22- Produtividade do sorgo energético em ambientes árido e semiárido do Texas (2014–2015)

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Weslaco, Texas (semiárido)	Sorgo biomassa (Blade ES 5140)	24,7–25,2	Solo argiloso-sil- toso fértil, baixa salinidade (EC = 1,42 dS/m)	Enciso et al. (2019)
Weslaco, Texas (semiárido)	Sorgo biomassa (Blade ES 5200)	28,0–28,7	Solo argiloso-sil- toso fértil, baixa salinidade	Enciso et al. (2019)
Pecos, Texas (árido; solo salino-sódico)	Sorgo biomassa (Blade ES 5140)	≈12,0 (média)	Solo argiloso-sil- toso salino-só- dico; água de irri- gação altamente salina (EC = 6,4 dS/m; SAR = 19,2)	Enciso et al. (2019)
Pecos, Texas (árido; solo salino-sódico)	Sorgo biomassa (Blade ES 5200)	≈14,1 (média)	Solo argiloso- siltoso salino- sódico	Enciso et al. (2019)

Tabela 23- Produtividade do sorgo em solos marginais da Nigéria (2018).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Nigéria (semiárido)	Sorgo biomassa (palha seca de <i>Sorghum bicolor</i>)	4,5 – 7,8	Solos de baixa fertilidade, pobres em nutrientes	Ogunwole, J.O.; Panuccio, M.R.; Adesodun, J.K.; Sarli, G.

Tabela 24- Produtividade do sorgo (matéria seca) em consórcio com feijão-mungo (Etiópia, 2025).

Local	Tipo de Sorgo	Produtividade em matéria seca (t/ha)	Tipo de marginalidade do solo	Autores
Lasta (Etiópia)	Sorgo biomassa (palha seca de <i>Sorghum bicolor</i>)	4,96 – 6,70	Solos marginais, semiáridos; ensaio de consórcio com feijão-mungo (<i>Vigna radiata</i>)	Assefa, A.; Abate, M.; Haile, M.; Hunegnaw, Y.

A análise comparativa da produtividade do sorgo em solos marginais evidencia reduções substanciais face aos valores médios registados em solos de elevada aptidão agrícola (20–40 t·ha⁻¹). Nos cenários compilados, a produtividade mínima atingiu cerca de 4 t·ha⁻¹ em condições de forte limitação hídrica ou salinidade, enquanto em ambientes marginais menos severos observaram-se rendimentos até 25–30 t·ha⁻¹, ainda assim aquém do intervalo típico de solos normais (Pulighe et al., 2019; Li et al., 2020; Marques et al., 2022). Esta diferença confirma que a disponibilidade hídrica, a fertilidade do solo e a acumulação de sais são determinantes críticos na expressão produtiva da cultura, reduzindo a capacidade fotossintética e a partição de biomassa em colmo e folhas.

Contudo, é relevante destacar que, mesmo sob restrição edafoclimática, o sorgo mantém rendimentos que superam os de várias culturas convencionais quando expostas às mesmas condições, o que evidencia a sua elevada plasticidade fisiológica. Esta resiliência está associada ao seu metabolismo C4, ao sistema radicular profundo e à capacidade de ajustar o ciclo fenológico em resposta a condições adversas (Ratnayake et al., 2021). Do ponto de vista bioenergético, a manutenção de produtividades entre 10 e 20 t·ha⁻¹ em contextos marginais representa uma vantagem estratégica, pois assegura um balanço energético positivo em rotas termoquímicas e permite valorizar terras subaproveitadas sem competir diretamente com solos de maior aptidão agrícola.

Assim, a comparação direta demonstra que os solos marginais não apenas reduzem a produtividade absoluta do sorgo, mas também ampliam a variabilidade interanual e espacial dos rendimentos. Este aspeto deve ser considerado em análises de viabilidade, reforçando a necessidade de integrar metodologias de avaliação geoespacial (GIS) e simulações de longo prazo para captar a dinâmica real da produção em diferentes regiões e sob diferentes cenários de alterações climáticas.

5.2 Caracterização da Biomassa de sorgo em Solos Marginais: Teores de Cinzas, Azoto e Açúcares.

A qualidade da biomassa deve igualmente ser avaliada, pois a produção de biomassa em solos marginais pode não só ter impacto apenas na produtividade, mas também na qualidade da biomassa para energia. As seguintes tabelas apresentam dados de caracterização da biomassa de sorgo obtida em solos marginais em diferentes locais.

Tabela 25- Teores de Açúcar, Cinzas e Azoto do sorgo (Missouri, EUA).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
New Franklin, Missouri (EUA)	Solo marginal (slope 2–9%, risco erosão)	Sorgo sacarino (M81-E)	-	-	15,5 % (°Brix)
Mount Vernon, Missouri (EUA)	Solo marginal (fluvisso, risco de inundação e textura variável)	Sorgo sacarino (M81-E)	-	-	13,3 % (°Brix)

Tabela 26- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Ordos, Mongólia Interior, China).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Ordos, Mongólia Interior (China)	Solo semiárido marginal; ensaio de doses de N (0–240 kg/ha)	Sorgo biomassa (GN-11) e sacarino (GT-8)	-	0,60 – 1,32	-

Tabela 27- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (China, 2013–2014).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Binzhou (SHS, salino) e Ordos (SAW, semiárido) – China	Solos salino-álcali e semiáridos marginais	Sorgo biomassa (GN-2, GN-4, GN-10)	≈ 4,2	-	≈ 10,9
Binzhou (SHS, salino) e Ordos (SAW, semiárido) – China	Solos salino-álcali e semiáridos marginais	Sorgo sacarino (GT-3, GT-7)	≈ 5,0	-	≈ 21,0

Tabela 28- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Illinois, EUA, 2009–2021).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Illinois (EUA) Fairbury, Pe- sotum, Ewing	Solos marginais (baixa fertili- dade, erosão, inundações)	Sorgo biomassa (híbrido TX17500)	-	1,0 – 1,3	-

Tabela 29- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Roménia, 2020–2021).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Roménia	Solo marginal (baixa fertili- dade, sem adu- bação, não irri- gado)	Sorgo sacarino (híbrido local)	-	-	≈ 11,0 %

Tabela 30- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Irão, 2019–2020).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Karaj (Irão)	Solo semiárido marginal; regimes de irrigação deficitária (50–100% ETc)	Sorgo forrageiro (Speedfeed híbrido)	-	1,0 – 1,2	-

Tabela 31 Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Irão, 2022).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Isfahan (Irão)	Solos marginais com salinidade (0–120 mM NaCl)	Sorgo forrageiro (8 genótipos)	-	-	6,5 – 12,0

Tabela 32- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (Brasil, 2017–2018).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Bogor (Indonésia, casa de vegetação)	Simulação de stress salino (NaCl) e déficit hídrico	Sorgo grão (Numbu, Samurai 2, Kualu)	-	1,2 – 1,6	-

Tabela 33- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (China, 2024).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
China (32,23 milhões ha de terras margi- nais)	Solos salino-ál- cali, terras de- gradadas, áreas costeiras	Sorgo sacarino	-	-	> 11,0 (°Brix)

Tabela 34- Teores de Cinzas, Azoto e Açúcar (China, 2024).

Local	Tipo de marginalidade do solo	Tipo de Sorgo	Cinzas (%)	Azoto (%)	Açúcares (%)
Vários locais (China)	Solos marginais (salinos, degra- dados, baixa fertilidade)	Sorgo sacarino	-	-	15 – 18 (°Brix) ≈ 10,5 – 12,0 %

A comparação dos resultados obtidos com valores de referência para solos considerados “normais” (cinzas: 2–4%; azoto: 0,6–1,1%; açúcares: 14–20%) evidencia que a qualidade da biomassa do sorgo sofre alterações relevantes quando cultivado em solos marginais.

Em primeiro lugar, verifica-se uma tendência para teores de cinzas mais elevados em solos marginais, em especial os de natureza salina ou com baixa fertilidade. Este comportamento está associado ao maior acúmulo de minerais inorgânicos (sílica, potássio, sódio, cloretos), frequentemente absorvidos em excesso quando a planta é sujeita a condições de stress edáfico. Este aumento da fração inorgânica resulta em penalizações diretas no poder calorífico inferior (PCI) e potenciais riscos operacionais em sistemas termoquímicos, como a formação de escórias e incrustações nas caldeiras (Lewandowski et al., 2003; Basu, 2010).

Relativamente ao azoto, os solos marginais podem induzir concentrações relativamente superiores, especialmente em cenários de baixa produtividade. Este efeito decorre do facto de que, em solos pobres, a biomassa produzida é menor e, consequentemente, a mesma quantidade de azoto assimilado pela planta fica distribuída por uma massa reduzida de tecido vegetal, aumentando a sua percentagem relativa. Tal situação, embora fisiologicamente coerente, tem implicações negativas do ponto de vista energético e ambiental, uma vez que maiores teores de azoto estão associados a emissões acrescidas de óxidos de azoto (NO_x) durante a combustão, comprometendo a sustentabilidade ambiental do processo (Popp et al., 2014).

No que diz respeito aos açúcares solúveis, observa-se frequentemente uma redução em solos marginais, sobretudo em condições de stress hídrico. A limitação de água prejudica a fotossíntese e restringe o transporte e acumulação de sacarose e açúcares redutores nos colmos, reduzindo diretamente o rendimento em bioetanol da fermentação alcoólica. Este efeito já foi reportado em diversos trabalhos com sorgo sacarino, em que produtividades limitadas em ambientes áridos ou salinos foram acompanhadas de reduções significativas nos teores de açúcares disponíveis (Li et al., 2019; Zhang et al., 2021).

De forma geral, pode concluir-se que os solos marginais tendem a aumentar a fração de cinzas e azoto e a reduzir o teor de açúcares da biomassa do sorgo.

A qualidade da biomassa de culturas bioenergéticas é um parâmetro essencial na avaliação da sua adequação para diferentes rotas de conversão energética. No caso do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), destacam-se como principais indicadores o teor de cinzas, o teor de azoto e o teor de açúcares, cuja variação resulta não apenas do genótipo considerado (biomassa, sacarino, forrageiro ou grão), mas também das condições edafoclimáticas em que a cultura é estabelecida. Em solos marginais, que se caracterizam por limitações de fertilidade, salinidade ou défice hídrico, estes parâmetros podem sofrer alterações significativas, condicionando tanto o valor energético da biomassa como a sustentabilidade ambiental do seu uso (Tang et al., 2018a; Jang et al., 2024).

No que respeita ao teor de cinzas, este corresponde à fração mineral da biomassa e influencia diretamente a eficiência da combustão e a propensão para a formação de escórias em caldeiras. Estudos demonstram que o sorgo cultivado em solos marginais apresenta valores de cinzas relativamente estáveis, entre 3,9 e 5,4 % da matéria seca. Em condições de semi-aridez e salinidade no norte da China, o sorgo biomassa apresentou cerca de 4,2 % MS, enquanto o sorgo sacarino apresentou teores ligeiramente superiores, próximos de 5,0 % MS (Tang et al., 2018a). Esta diferença pode estar associada ao maior acúmulo de sais minerais nos

colmos do sorgo sacarino, em função da sua fisiologia de armazenamento de açúcares. A salinidade tende a aumentar o teor de cinzas, o que reforça a importância da seleção de genótipos com maior eficiência de exclusão iônica, capazes de reduzir a acumulação de sais nos tecidos vegetais.

O teor de azoto na biomassa, por sua vez, assume dupla relevância, uma vez que está associado à emissão de óxidos de azoto durante a combustão, mas também representa um indicador da qualidade proteica em contextos forrageiros. Os valores registados em solos marginais variaram entre 0,6 e 1,6 % da matéria seca. Em ensaios no semiárido da Mongólia Interior, Tang et al. (2018b) reportaram valores de 0,60 a 1,32 %, diretamente relacionados com a dose de fertilizante azotado. Em croplands marginais do Illinois, Jang et al. (2024) registaram teores entre 1,0 e 1,3 %, enquanto em condições de irrigação deficitária no Irão, Ghalkhani et al. (2023) observaram valores entre 1,0 e 1,2 %. Resultados ligeiramente mais elevados, entre 1,2 e 1,6 %, foram registados por Hidayati et al. (2023) em ensaios sob stress salino e hídrico na Indonésia, evidenciando o efeito concentrador do ajustamento osmótico. Do ponto de vista energético, valores superiores a 1,5 % são indesejáveis, por aumentarem as emissões de NO_x, mas em termos de alimentação animal constituem uma vantagem, reforçando o caráter multi-propósito do sorgo.

Relativamente ao teor de açúcares, parâmetro mais relevante no caso do sorgo sacarino, os resultados demonstram uma estabilidade notável mesmo em condições marginais. Nos Estados Unidos, Maw et al. (2017) reportaram valores de 13,3 a 15,5 % Brix, enquanto na Roménia Popescu et al. (2022) encontraram cerca de 19 % Brix, equivalentes a aproximadamente 11 % de açúcares no sumo. Em solos marginais da China, Tang et al. (2018a) observaram valores de 10,9 % da matéria seca em sorgo biomassa e 21 % em sorgo sacarino, confirmando a superioridade deste último para a produção de bioetanol. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhang et al. (2024), que confirmaram teores superiores a 11 % Brix em larga escala, abrangendo mais de 32 milhões de hectares de terras marginais. Interessantemente, a salinidade pode induzir um aumento da concentração de açúcares solúveis, como demonstrado por Rajabi Dehnavi et al. (2024), que registaram teores entre 6,5 e 12 % em genótipos forrageiros sob stress salino. Tal fenómeno reflete a capacidade de ajustamento osmótico da planta e reforça a sua resiliência em ambientes hostis.

A análise comparativa entre os diferentes tipos de sorgo confirma a versatilidade da cultura em solos marginais. O sorgo biomassa caracteriza-se por baixos teores de açúcares, cinzas

moderadas e azoto reduzido, mostrando adequação para combustão. O sorgo sacarino, por outro lado, apresenta teores elevados de açúcares (11–21 %), sendo altamente eficiente para bioetanol, ainda que com ligeiro aumento no teor de cinzas. Já o sorgo forrageiro evidencia teores mais elevados de azoto, até 1,6 %, o que o torna mais apropriado para alimentação animal, mas menos interessante para processos termoquímicos.

No conjunto, os resultados indicam que as limitações impostas pelos solos marginais se refletem sobretudo na quantidade de biomassa produzida, e não na sua qualidade intrínseca. Apesar das restrições de fertilidade e disponibilidade hídrica, os teores de cinzas, azoto e açúcares permanecem dentro de gamas compatíveis com diferentes aplicações energéticas. Assim, o sorgo revela-se uma cultura bioenergética robusta e versátil, capaz de conciliar a utilização de terras de baixo valor agrícola com a produção sustentável de energia renovável.

BALANÇO ENERGÉTICO DO SORGO EM SOLOS MARGINAIS

6.1 Balanço Energético – Inputs de Energia no Cultivo do Sorgo

A energia total de entrada (E_{in}) no cultivo do sorgo foi calculada a partir da soma de todos os consumos energéticos diretos e indiretos associados à produção agrícola. Os valores individuais de cada input encontram-se abaixo, expressos em gigajoules por hectare (GJ/ha).

Combustível (gasóleo agrícola)

$$E_{diesel} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = \frac{70[L/ha] \times 38,6 \text{ MJ/L}}{1000} = 2,702 \text{ GJ/ha}$$

Lubrificantes e óleos

$$E_{lub} = 0,03 \times 2,702 = 0,081 \text{ GJ/ha}$$

Fertilizantes (energia incorporada)

$$E_{fert} = \frac{80 \times 60 \times +40 \times 12 + 40 \times 8}{1000} = 5,600 \text{ GJ/ha}$$

Corretivos de solo

$$E_{corr} = \frac{500 \times 1}{1000} = 0,500 \text{ GJ/ha}$$

Sementes

$$E_{sem} = \frac{12 \times 18}{1000} = 0,216 \text{ GJ/ha}$$

Pesticidas

$$E_{pest}[\text{GJ/ha}] = \frac{1,5 \times 300}{1000} = 0,450 \text{ GJ/ha}$$

Transporte de insumos

$$E_{transp-in} = \frac{0,674 \times 100 \times 0,8}{1000} = 0,054 \text{ GJ/ha}$$

Total de inputs energéticos no cultivo

$$E_{inputs,cultivo} = 2,702 + 0,081 + 0 + 5,600 + 0,500 + 0,216 + 0,450 + 0 + 0,054 + 0 + 3,000$$

$$E_{inputs,cultivo} = 12,603 \text{ GJ/ha}$$

6.2 Avaliação do balanço energético do sorgo em diferentes rotas de conversão

Resultados do balanço energético

Com base nestas suposições, os resultados obtidos para as diferentes rotas de conversão encontram-se sintetizados na Tabela 3, apresentando-se a energia útil obtida por hectare (E_{out}), a energia total investida, o balanço energético líquido (NEB) e a razão de energia líquida (NER). Foram considerados os dois cenários de produtividade, mínimo (4 t/ha) e máximo (45 t/ha), correspondendo, respetivamente, a condições de solos marginais limitantes e a cenários agrícolas de alta produtividade.

Tabela 35- Energia útil, inputs energéticos, NEB e NER por rota e produtividade agrícola. Produtividade de 4t/ha.

Rota	E_{out} (GJ/ha) 4 t/ha	$E_{in,total}$ (GJ/ha)	NEB (GJ/ha)	NER
Combustão (eletricidade)	17,00	13,4	3,6	1,27
Combustão (calor)	54,40	12,8	41,6	4,25
Combustão (CHP)	51,00	13,6	37,4	3,75
Gaseificação → eletricidade	14,28	17,0	-2,7	0,84
Gaseificação → combustíveis	28,56	22,6	6,0	1,26
Pirólise (bio- óleo)	40,80	17,4	23,4	2,34
Fermentação (EtOH)	28,00	26,8	1,2	1,04

Hidrólise/ Fermentação (EtOH LC)	21,20	40,6	-19,4	0,52
---	-------	------	-------	------

Tabela 36- Energia útil, inputs energéticos, NEB e NER por rota e produtividade agrícola. Produtividade de 45t/ha.

Rota	E_out (GJ/ha) – 45 t/ha	$E_{in,total}$ (GJ/ha)	NEB (GJ/ha)	NER
Combustão (eletricidade)	191,25	21,6	169,7	8,86
Combustão (calor)	612,00	14,9	597,1	41,2
Combustão (CHP)	573,75	23,9	549,9	24,1
Gaseificação → eletricidade	160,65	62,1	98,6	2,59
Gaseificação → combustíveis	321,30	125,1	196,2	2,57
Pirólise (bio- óleo)	459,00	66,6	392,4	6,89
Fermentação (EtOH)	315,00	172,4	142,6	1,83
Hidrólise/ Fermentação (EtOH LC)	238,50	327,6	-89,1	0,73

Os resultados evidenciam que a inclusão dos inputs energéticos de processo altera de forma substancial o desempenho das rotas de conversão. Em cenários de baixa produtividade (4 t/ha), rotas como a gaseificação para eletricidade e a hidrólise/fermentação lignocelulósica apresentam $NER < 1$, revelando balanços negativos. Em contrapartida, a combustão e a cogeração destacam-se como as opções mais robustas, mantendo viabilidade energética mesmo em solos marginais.

No cenário de alta produtividade (45 t/ha), todas as rotas melhoram o desempenho, mas a hierarquia mantém-se: a combustão para calor (NER = 41,2) e a cogeração (NER = 24,1) apresentam os melhores resultados, seguidas pela pirólise (NER = 6,9). As rotas bioquímicas, embora viáveis, revelam um desempenho limitado devido ao elevado consumo energético de processo.

De forma geral, conclui-se que o sorgo possui elevado potencial como cultura bioenergética, mas a sua viabilidade depende fortemente da produtividade agrícola e da rota tecnológica selecionada, sendo as rotas termoquímicas mais diretas as mais promissoras em condições de solos marginais.

7.1 Principais Conclusões

O presente estudo demonstrou que o sorgo possui um potencial notável como cultura energética sustentável, sobretudo quando cultivado em solos marginais.

Os resultados obtidos revelaram que, mesmo sob condições edáficas adversas, o sorgo mantém níveis de produtividade consideráveis e uma qualidade de biomassa adequada, com teores de cinzas, azoto e açúcares compatíveis com as principais rotas de conversão energética. Em média, os valores de cinzas variaram entre 2 e 4,6%, o azoto entre 0,4 e 0,8%, e os açúcares entre 10,5 e 14,4%.

A análise bibliográfica mostrou que as produtividades médias variaram entre 4 e 45 t/ha, dependendo do genótipo, do manejo e das condições de solo, com destaque para o sorgo sacarino, que apresentou os melhores rendimentos energéticos.

A análise do balanço energético evidenciou que as rotas termoquímicas, como a combustão, cogeração (CHP) e pirólise, apresentam maiores rendimentos energéticos líquidos ($NER > 3$), mesmo em cenários de baixa produtividade, destacando-se pela sua robustez e estabilidade. Em contrapartida, as rotas bioquímicas, nomeadamente a fermentação e o etanol lignocelulósico, mostraram-se dependentes de rendimentos agrícolas superiores a 20 t/ha para se tornarem energeticamente viáveis, com $NER < 1$ em condições menos favoráveis.

Além disso, o estudo comprovou que o consumo energético do cultivo ($E_{in} \approx 12,6$ GJ/ha) é relativamente baixo quando comparado com outras culturas energéticas, como o milho (25–45 GJ/ha) ou o miscanthus (10–22 GJ/ha), o que reforça a eficiência do sorgo em termos de custo energético.

Estes fatores, aliados à elevada eficiência fotossintética e à tolerância ao stress hídrico, consolidam o sorgo como uma alternativa sólida para diversificar as matrizes energéticas e valorizar terras degradadas.

Conclui-se, assim, que o sorgo tem a capacidade de transformar limitações em oportunidades, integrando-se numa estratégia de bioenergia sustentável e circular. O seu aproveitamento em solos marginais não só contribui para a produção de energia renovável, como

também promove benefícios ambientais e socioeconómicos, nomeadamente a mitigação da erosão, o sequestro de carbono e a criação de valor em regiões rurais.

Em síntese, o sorgo afirma-se como uma cultura energética resiliente, eficiente e estratégica, capaz de apoiar a transição energética global através de uma utilização inteligente dos recursos naturais e da recuperação produtiva dos solos menos férteis.

7.2 Limitações do Trabalho

Apesar do cuidado metodológico adotado, subsistem limitações que condicionam a generalização plena dos resultados. Em primeiro lugar, os cálculos basearam-se em valores de referência de poder calorífico inferior (PCI), rendimentos de conversão e eficiências médias por rota tecnológica (Apêndice B), que representam estados da arte plausíveis reportados na literatura, mas não capturam a variabilidade associada a fatores como a escala industrial, a configuração específica dos equipamentos, o grau de integração térmica, o controlo da humidade da biomassa e a composição química diferenciada entre genótipos de sorgo. Do mesmo modo, os valores de utilidades (vapor/calor e eletricidade por tonelada de matéria seca) utilizados para estimar o autoconsumo energético foram extraídos de fontes bibliográficas e podem divergir substancialmente de condições reais, sobretudo em cenários em que a recuperação de calor, a integração de múltiplos efeitos (p. ex., na destilação) ou a valorização de co-produtos (lignina, piro-gás, biochar) desempenham um papel relevante e reduzem a energia líquida efetivamente consumida.

Em segundo lugar, a análise considerou $E_{inputs,cultivo} = 12,603 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ e não explorou exaustivamente a sensibilidade a práticas agronómicas (dose de fertilizante, mecanização, irrigação, logística), ao teor de humidade na biomassa entregue ao processo, ou a perdas na colheita e armazenamento. Estes fatores podem alterar tanto a energia investida no campo como a energia líquida à saída da fábrica (via secagem adicional ou degradação).

Em terceiro lugar, o estudo focou-se em balanços energéticos; não foram quantificados, nesta etapa, impactos ambientais (p. ex., emissões de GEE “do berço ao portão”, uso de água, alterações no carbono do solo, biodiversidade) nem a viabilidade tecno-económica (CAPEX/OPEX, custo nivelado da energia/combustível, análise de risco), aspetos essenciais para suportar decisões de investimento.

Por fim, a escala espaço-temporal foi tratada de forma estática (dois cenários de produtividade). Em contexto real, a produtividade do sorgo apresenta variabilidade interanual (clima) e espacial (solo, manejo), pelo que a extrapolação regional exigiria análise geoespacial (GIS) com camadas de solo/clima, logística e mercados de energia/combustíveis. Estas limitações não invalidam as tendências identificadas, mas sublinham a necessidade de refinar parâmetros com dados locais e expandir o âmbito analítico para além do balanço energético.

7.3 Perspetivas Futuras e Recomendações

Os resultados obtidos evidenciam que a consolidação do sorgo como cultura energética em solos marginais exige avanços simultâneos a nível científico, tecnológico e político-institucional, de modo a reduzir incertezas e ampliar a sustentabilidade do sistema.

Do ponto de vista experimental, é prioritário o desenvolvimento de ensaios de campo em solos marginais com diferentes características edafoclimáticas, explorando variedades de sorgo biomassa, sacarino e forrageiro. Apenas dados empíricos locais e multirregionais permitirão calibrar de forma robusta os parâmetros de produtividade e qualidade da biomassa, ultrapassando a dependência exclusiva de valores médios reportados na literatura. A caracterização detalhada da composição química da biomassa em distintos cenários de stress hídrico, salinidade ou baixa fertilidade é igualmente necessária, dado o impacto direto que exerce na eficiência das rotas de conversão energética.

Em paralelo, destaca-se a necessidade de avaliações integradas de ciclo de vida (LCA), que complementem a análise energética com a contabilização de emissões de gases com efeito de estufa, fluxos de carbono no solo, impactos no uso da água e efeitos sobre a biodiversidade. Este tipo de abordagem holística é essencial para aferir o verdadeiro contributo do sorgo para a mitigação das alterações climáticas e para a sustentabilidade agrícola em regiões marginais.

No domínio tecnológico, torna-se fundamental investir na otimização das rotas bioquímicas, em particular na hidrólise/fermentação lignocelulósica, através do desenvolvimento de pré-tratamentos de baixa intensidade energética, da valorização sistemática da lignina como co-produto energético e da integração de processos híbridos que combinem rotas termoquímicas e bioquímicas. Estas melhorias poderão reduzir significativamente os consumos internos e aproximar a competitividade destas rotas ao nível já observado nas conversões termoquímicas.

Do ponto de vista económico e socioambiental, recomenda-se o desenvolvimento de modelos integrados de viabilidade, que incorporem custos de produção agrícola, logística, CAPEX/OPEX das unidades industriais, preço de mercado da energia e cenários de políticas de incentivo. A análise da competitividade do sorgo deve também contemplar externalidades positivas, como a recuperação de solos degradados, a redução da pressão sobre terras agrícolas férteis, a diversificação de rendimentos para comunidades agrícolas e a contribuição para a segurança energética em contextos globais de transição.

Finalmente, a nível político-estratégico, é necessária a implementação de políticas públicas e programas de incentivo que promovam a utilização de solos marginais para culturas bioenergéticas, assegurando que não exista competição direta com culturas alimentares e que sejam estimuladas soluções tecnológicas inovadoras. A criação de mecanismos de valorização de co-produtos, a promoção de bioeconomias circulares e a integração do sorgo em estratégias nacionais e internacionais de energia renovável poderão acelerar a sua adoção em larga escala.

Assim, a expansão do sorgo em solos marginais deve ser entendida não como uma solução isolada, mas como parte integrante de estratégias mais amplas de transição energética, bioeconomia sustentável e adaptação climática. A concretização destas perspetivas poderá reforçar a segurança energética global e, simultaneamente, valorizar ecossistemas agrícolas subaproveitados, contribuindo para a resiliência socioeconómica e ambiental em múltiplas regiões.

8 BIBLIOGRAFIA

- ALLOWAY, B. J. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. Springer Science & Business Media, 2013.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, 1998.
- APPIAH-NKANSAH, N. B. et al. A review of sweet sorghum as a viable renewable bio-energy crop. *Renewable Energy*, v. 143, p. 1121–1132, 2019.
- BARAL, S. S.; GUHA, A. K. *Biotechnology for Sustainable Agriculture: Emerging Approaches and Strategies*. Elsevier, 2018.
- BASU, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press, 2010.
- BLÜMEL, M. et al. Sorghum forage quality and the role of plant secondary metabolites. *Frontiers in Plant Science*, v. 9, p. 1352, 2018.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson, 2008.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, v. 38, p. 68–94, 2012.
- CAPECCHI, L. et al. Crop factors influencing ethanol production from sorghum juice and bagasse. *Energies*, v. 10, p. 1–15, 2017.
- CHAGANTI, V. N.; CROHN, D. M.; PAGAY, V. Reuse of treated wastewater for irrigation of bioenergy crops: impacts on yield and soil properties. *Agricultural Water Management*, v. 241, p. 106345, 2020.
- CHANDEL, A. K. et al. The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. *Bioresource Technology*, v. 264, p. 370–381, 2018.
- CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, v. 30, n. 3, p. 239–264, 2003.
- COSTA, C. et al. Physiological traits associated with drought tolerance in sorghum. *Journal of Plant Physiology*, v. 248, p. 153163, 2020.
- DE ALMEIDA, C. et al. Sorghum as a functional food: Bioactive compounds and health benefits. *Food Research International*, v. 140, p. 109902, 2021.
- Ecoinvent. *Life cycle inventories of bioenergy*. Ecoinvent Report No. 17, 2007.
- EMBRAPA. *Fertilidade dos Solos Tropicais: Princípios e Práticas Agronômicas*. 2020. Disponível em: <www.infoteca.cnptia.embrapa.br>.

- FAO. *Energy in biomass production*. Rome: FAO, 2001.
- FAO. *Energy-smart food for people and climate*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- FAO. *Status of the World's Soil Resources (SWSR)*. Rome: FAO, 2015.
- FAO. *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. Rome: FAO, 2017. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/10986/26548>.
- FAGERIA, N. K. *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press, 2009.
- FARGIONE, J. et al. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, v. 319, n. 5867, p. 1235–1238, 2008.
- FLUCK, R. C. *Energy in farm production*. Elsevier, 1992.
- GNANSOUNOU, E. et al. Life cycle assessment of bioethanol: Energy and greenhouse gas balances. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 21, p. 8371–8381, 2005.
- GREEN, M. Energy in pesticide manufacture, distribution and use. In: FLUCK, R. C. (Ed.). *Energy in farm production*. Elsevier, 1987. p. 165–177.
- HABERZETTL, J. et al. A critical review on lignocellulosic biomass yield and sustainability on marginal lands. *Agronomy*, v. 11, n. 8, p. 1604, 2021.
- HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, M. *Gasification*. Elsevier, 2008.
- IEA Bioenergy. *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*. International Energy Agency, 2019. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com>.
- IFA – International Fertilizer Association. *Energy efficiency and CO₂ emissions in ammonia production*. Paris: IFA, 2020.
- JANG, M.; KIM, D.; LEE, H. Biomass yield responses of bioenergy sorghum under marginal cropland management. *Field Crops Research*, v. 305, p. 108789, 2024.
- KASSAHUN, B. et al. Genetic basis of drought tolerance in sorghum. *Theoretical and Applied Genetics*, v. 132, p. 3251–3265, 2019.
- KHAN, S.; HANJRA, M. A. Footprints of water and energy inputs in food production. *Agricultural Systems*, v. 99, n. 2–3, p. 168–176, 2009.
- KIM, S.; DALE, B. E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy*, v. 26, n. 4, p. 361–375, 2004.
- KNOEF, H. A. M. *Handbook of Biomass Gasification*. BTG Biomass Technology Group, 2012.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.

- LAL, R. *Soil Degradation and Global Warming*. CRC Press, 2019.
- LAURENÇO, J. M. *The NOVAthesis LaTeX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon, 2021. Disponível em: <https://github.com/joaomlourengo/novathesis/raw/main/template.pdf>.
- LEWANDOWSKI, I. et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*, v. 25, n. 4, p. 335–361, 2003.
- LI, W. et al. Mapping the yields of lignocellulosic bioenergy crops at a global scale. *Earth System Science Data*, v. 12, n. 2, p. 965–981, 2020.
- LI, W. et al. Marginal land bioethanol production of sweet sorghum based on limited water resources in Northwest China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 12, n. 1, p. 97–104, 2019.
- LIU, Y. et al. Assessing the sweet sorghum-based ethanol potential on saline–alkali land with DSSAT and life cycle assessment. *Biotechnology for Biofuels*, v. 14, p. 112, 2021.
- MACEDO, I. *Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil*. São Paulo: UNICA, 2008.
- MAKUCHETE, L. et al. Productivity of sorghum and millets under different in-field rainwater management options on soils of varying fertility status in Zimbabwe. *Frontiers in Agronomy*, v. 6, p. 1378339, 2024.
- MARSCHNER, H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2. ed. Academic Press, 1995.
- MARSCHNER, P. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. ed. Academic Press, 2011.
- MARQUES, P. et al. Bioenergy potential of sorghum. *Renewable Energy*, v. 178, p. 1162–1174, 2022.
- MAY, A.; DA SILVA, D. D.; SANTOS, F. C. *Cultivo do sorgo biomassa para a cogeração de energia elétrica*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. (Documentos, 152).
- MONTI, A.; ZATTA, A.; ZEGADA-LIZARAZU, W. Sowing date and nitrogen fertilization affects fiber sorghum biomass and quality. *Industrial Crops and Products*, v. 94, p. 835–841, 2016.
- MOORE, C. E. et al. Ecosystem-scale biogeochemical fluxes of bioenergy sorghum. *GCB Bioenergy*, v. 13, n. 7, p. 1180–1196, 2021.
- MORRISSEY, K. G. et al. Life cycle impact assessment of biofuels derived from sweet sorghum. *Biotechnology for Biofuels*, v. 14, n. 1, p. 1–15, 2021.
- MUPAMBWA, H. A.; MNKENI, P. N. S.; MOYO, M. Sorghum productivity in marginal soils under conservation agriculture practices in South Africa. *Agronomy*, v. 9, n. 8, p. 422, 2019.

- NEUMANN, M. et al. Avaliação do valor nutritivo da planta e da silagem de diferentes híbridos de sorgo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 31, n. 1, p. 293–301, 2002.
- PAN-CALDI, F.; TRINDADE, L. M. Marginal lands to grow novel bio-based crops: a plant breeding perspective. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 227, 2020.
- PATEL, M.; MEHER, K.; SHAH, S. Evaluation of sweet sorghum bagasse as a sustainable feedstock for bioenergy. *Renewable Energy*, v. 208, p. 304–313, 2023.
- PIMENTEL, D.; PATZEK, T. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood. *Natural Resources Research*, v. 14, n. 1, p. 65–76, 2005.
- PIMENTEL, D.; PIMENTEL, M. *Food, energy, and society*. 3. ed. CRC Press, 2008.
- PILON-SMITS, E. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, v. 56, p. 15–39, 2005.
- POPP, J. et al. The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 32, p. 559–578, 2014.
- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 77, n. 1, p. 28–34, 2006.
- PULIGHE, G. et al. Ongoing and emerging issues for sustainable bioenergy production on marginal lands in the Mediterranean regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 103, p. 58–70, 2019.
- RATNAYAKE, P. et al. Water-use efficiency and drought adaptation in sorghum. *Agricultural Water Management*, v. 256, p. 107084, 2021.
- REDDY, B. V. S. et al. Sweet sorghum as a bioenergy crop for the tropics. *Sugar Tech*, v. 10, n. 3, p. 197–202, 2008.
- REDDY, P. S. et al. Productivity and sustainability of sorghum under saline conditions. *Journal of Plant Nutrition*, v. 35, n. 4, p. 573–590, 2012.
- ROBY, M. C.; MULLET, J. E.; ROONEY, W. L. Biomass sorghum and maize have similar water-use efficiency under semi-arid conditions. *Field Crops Research*, v. 206, p. 57–69, 2017.
- ROONEY, W. L. et al. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 1, n. 2, p. 147–157, 2007.
- ROONEY, W. L. et al. Genetic improvement of sorghum as a bioenergy crop. *Field Crops Research*, v. 227, p. 84–92, 2018.
- SINGH, J. et al. Energy consumption pattern of wheat production in India. *Energy*, v. 33, n. 4, p. 452–457, 2008.

- SHRESTHA, R. et al. Biomass yield and water-use efficiency in photoperiod-sensitive sorghum. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, v. 8, n. 1, p. 234–245, 2025.
- STOUT, B. A. *Handbook of energy for world agriculture*. CRC Press, 1990.
- SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technology*, v. 83, n. 1, p. 1–11, 2002.
- TANG, C. et al. Energy sorghum production in marginal environments: biomass composition and biofuel potential. *Frontiers in Plant Science*, v. 9, p. 440, 2018.
- TAYLOR, J. R. Sorghum: Origin, history, and nutritional quality. *Cereal Chemistry*, v. 96, p. 123–134, 2019.
- TILMAN, D.; HILL, J.; LEHMAN, C. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, v. 314, n. 5805, p. 1598–1600, 2006.
- TODARO, L. et al. Energy of sorghum biomass under deficit irrigation in a semi-arid Mediterranean area. *Water*, v. 17, n. 5, p. 733, 2025.
- TUMULURU, J. S. et al. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, v. 7, n. 5, p. 384–401, 2011.
- UPPALAPATI, S. et al. Environmental impact and energy balance assessment in ethanol supply chains from sorghum. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 187, p. 113–130, 2024.
- USDA. *Soil Quality Indicators*. United States Department of Agriculture, 2019.
- UHLIN, H. E. Why energy productivity differs between countries in agriculture: A case study on Sweden and the United States. *Agricultural Systems*, v. 56, n. 4, p. 443–462, 1998.
- VON HADEN, A. C. et al. Crop and environmental factors influencing biomass sorghum yields on marginal land. *Agronomy Journal*, v. 113, n. 3, p. 2142–2154, 2021.
- WANG, F. (Ed.). *Automated Technology for Verification and Analysis: Second International Conference, ATVA 2004, Taipei, Taiwan, ROC, October 31–November 3, 2004. Proceedings*. Lecture Notes in Computer Science, v. 3299. Springer, 2004. ISBN: 3-540-23610-4.
- ZEGADA-LIZARAZU, W.; MONTI, A.; ALEXOPOULOU, E. Switchgrass and giant reed for biomass production in the Mediterranean region: Establishment, yields, and N use efficiency. *European Journal of Agronomy*, v. 34, n. 4, p. 248–256, 2012.
- ZHANG, H. et al. Genotypic variation of sorghum for salt tolerance and productivity on saline soils. *Industrial Crops and Products*, v. 160, p. 113–124, 2021.
- ZHANG, L. et al. Enhancing salt-stress tolerance of forage sorghum by foliar application of ortho-silicic acid. *Grass Research*, v. 34, p. 112–123, 2024.

ZHANG, Y. et al. High-grade chemicals and biofuels produced from sweet sorghum on marginal soils. *Sustainability

APÊNDICE

A determinação da energia investida no cultivo do sorgo ($E_{inputs,cultivo}$) constitui a base do balanço energético, permitindo quantificar todas as entradas energéticas necessárias à produção agrícola antes da conversão da biomassa em energia útil. Neste trabalho, foram contabilizados consumos diretos (combustíveis, eletricidade, lubrificantes) e consumos indiretos (energia incorporada em fertilizantes, corretivos, sementes, pesticidas, irrigação, maquinaria e transporte), seguindo metodologias habitualmente aplicadas em estudos de análise energética de sistemas agrícolas (Pimentel & Patzek, 2005; Gnansounou et al., 2005).

A.1 Cálculo do input energético do cultivo

Equação 1

$$E_{inputs,cultivo} \left[\frac{GJ}{ha} \right] = E_{diesel} + E_{lub} + E_{el} + E_{fert} + E_{corr} + E_{sem} + E_{pest} + E_{H2O-inc} + E_{transp-in} + E_{transp-int} + E_{maq} + E_{hum}$$

Substituindo os valores:

$$E_{inputs,cultivo} = 2,702 + 0,081 + 0 + 5,600 + 0,500 + 0,216 + 0,450 + 0 + 0,054 + 0 + 3,000$$

$$E_{inputs,cultivo} = \mathbf{12,603 \text{ GJ/ha}}$$

O somatório destas parcelas resultou num valor total de **12,603 GJ/ha**, considerado uniforme em todas as rotas de conversão de energia analisadas. Este valor encontra-se dentro da gama reportada em estudos sobre culturas energéticas cultivadas em solos marginais, onde os inputs são geralmente inferiores aos observados em sistemas agrícolas intensivos, devido à menor utilização de fertilizantes, pesticidas e irrigação (Pulighe et al., 2019; Li et al., 2019).

DADOS DE APOIO E PARÂMETROS DE REFERÊNCIA

A avaliação do balanço energético requer a definição prévia de parâmetros físico-químicos e produtivos da biomassa de sorgo. Neste trabalho, adotou-se como referência um poder calorífico inferior (PCI) de 17 MJ/kg de biomassa seca, valor médio reportado para gramíneas C4, incluindo o sorgo biomassa, forrageiro e sacarino, cujos valores variam entre 16 e 19 MJ/kg (Zegada-Lizarazu et al., 2012; Monti et al., 2016; Patel et al., 2023).

Em termos de produtividade, foram estabelecidos dois limites de análise: **4 t/ha** como valor mínimo, representativo de condições de solos marginais com baixa disponibilidade hídrica e fertilidade limitada, e **45 t/ha** como valor máximo, característico de sistemas intensivos e altamente produtivos (Pulighe et al., 2019; Kang et al., 2013).

Os rendimentos energéticos e de produtos considerados para cada rota de conversão foram definidos com base em valores médios da literatura científica e encontram-se sintetizados na Tabela B1.

Tabela B1 – Parâmetros assumidos para cada rota de conversão energética do sorgo.

Rota	Parâmetro assumido	Fonte
Combustão (elétrica)	$\eta_{el} = 0,25$	IEA Bioenergy (2019)
Combustão (calor)	$\eta_{th} = 0,80$	IEA Bioenergy (2019)
Cogeração (CHP)	$\eta_{el} = 0,25 ; \eta_{th} = 0,50$	IEA Bioenergy (2019)
Gaseificação → eletricidade	$CGE = 0,70 ; \eta_{el} = 0,30$	Tumuluru et al. (2011)
Gaseificação→combustíveis	$CGE = 0,70 ; \eta_{sin} = 0,60$	Tumuluru et al. (2011)
Pirólise rápida	$y_{oleo} = 0,60$ (<i>massa seca</i>)	Basu (2010)
Fermentação (etanol)	261 kg EtOH/t MS $\approx$ 331 L/t	Zhang et al. (2021)
Hidrólise/fermentação (EtOH LC)	250 L/t MS $\approx$ 197 kg/t	Sun & Cheng (2002)

Estes parâmetros constituem a base de cálculo para o balanço energético, sendo aplicados às produtividades de 4 t/ha e 45 t/ha, de modo a refletir a variabilidade potencial da cultura do sorgo em diferentes condições edafoclimáticas.

CÁLCULOS DETALHADOS DO BALANÇO ENERGÉTICO

Com base nos parâmetros definidos, foi possível calcular a energia útil obtida em cada rota por tonelada de biomassa seca (E_{out}), bem como a energia resultante por hectare, considerando os cenários de produtividade mínima e máxima. O cálculo seguiu as fórmulas apresentadas de forma resumida abaixo.

Fórmulas Aplicadas

Combustão (elétrica):

$$E_{out} = \eta_{el} \times PCI \times 1000$$

Combustão (calor):

$$E_{out} = \eta_{th} \times PCI \times 1000$$

Cogeração (CHP):

$$E_{out} = (\eta_{th} + \eta_{el}) \times PCI \times 1000$$

Gaseificação (eletricidade):

$$E_{out} = \eta_{el} \times (CGE \times PCI \times 1000)$$

Gaseificação (combustíveis):

$$E_{out} = \eta_{sin} \times (CGE \times PCI \times 1000)$$

Pirólise rápida (bio-óleo):

$$E_{out} = y_{óleo} \times PCI \times 1000$$

Fermentação alcoólica:

$$E_{out} = y_{EtOH} \times PCI_{EtOH}$$

Hidrólise/fermentação (etanol lignocelulósico):

$$E_{out} = y_{EtOH,LC} \times PCI_{EtOH,LC}$$

A partir de E_{out} e $E_{in,total}$, calcularam-se os indicadores energéticos:

$$NEB = E_{out} - E_{in,total}$$

$$NER = \frac{E_{out}}{E_{in,total}}$$

Resultados por Produtividade

Os valores de $E_{out,gross}$ por tonelada foram multiplicados pela produtividade agrícola (4 e 45 t/ha), sendo depois comparados com o input energético do cultivo (12,603 GJ/ha). As Tabelas C1 e C2 apresentam os resultados iniciais (sem autoconsumos).

Tabela C1 – Resultados do balanço energético (produtividade de 4 t/ha).

Rota	E_out (GJ/ha) – 4 t/ha	NEB (GJ/ha)	NER
Combustão (eletricidade)	17,00	4,40	1,35
Combustão (calor)	54,40	41,80	4,32
Combustão (CHP)	51,00	38,40	4,05
Gaseificação → eletricidade	14,28	1,68	1,13
Gaseificação → combustíveis	28,56	15,96	2,27
Pirólise (bio-óleo)	40,80	28,20	3,24
Fermentação (EtOH)	28,00	15,40	2,22
Hidrólise/ Fermentação (EtOH LC)	21,20	8,60	1,68

Tabela C2 – Resultados do balanço energético (produtividade de 45 t/ha).

Rota	E_out (GJ/ha) – 45 t/ha	NEB (GJ/ha)	NER
Combustão (eletricidade)	191,25	178,65	15,18
Combustão (calor)	612,00	599,40	48,56
Combustão (CHP)	573,75	561,15	45,53
Gaseificação → eletricidade	160,65	148,05	12,75
Gaseificação → combustíveis	321,30	308,70	25,49

Pirólise (bio-óleo)	459,00	446,40	36,42
Fermentação (EtOH)	315,00	302,40	24,99
Hidrólise/ Fermentação (EtOH LC)	238,50	225,90	18,92

Discussão comparativa

Os resultados demonstraram que, em condições de baixa produtividade (4 t/ha), apenas algumas rotas asseguram ganhos energéticos significativos, em particular a combustão para calor, a cogeração e a pirólise. Em contrapartida, a gaseificação para eletricidade e a hidrólise/fermentação lignocelulósica apresentam balanços energéticos marginais ou mesmo negativos neste cenário. À medida que a produtividade aumenta para 45 t/ha, todas as rotas se tornam energeticamente viáveis, embora com desempenhos distintos em termos de razão de energia líquida (NER).

Autoconsumo energético das rotas de conversão

Para além da energia investida no cultivo, é essencial contabilizar o autoconsumo energético interno de cada processo, designado como utilidades, que inclui calor e eletricidade. Estes consumos reduzem a energia exportável, ajustando o balanço energético a valores mais realistas.

Rota	Calor/Vapor (GJ/t MS)	Eletricidade (GJ/t MS)	Fonte
Combustão (eletricidade)	-	~0,34 (≈8% da eletricidade bruta)	IEA Bioenergy (2019)
Combustão (calor)	-	~0,05	IEA Bioenergy (2019)
Combustão (CHP)	-	~0,25 (≈6% da eletricidade bruta)	IEA Bioenergy (2019)
Gaseificação → eletricidade	~0,5	~0,6	Basu (2010); Tumuluru et al. (2011)
Gaseificação → combustíveis	~2,0	~0,5	Basu (2010); Gnansounou et al. (2005)
Pirólise (bio-óleo)	~1,0	~0,2	Basu (2010); IEA Bioenergy (2019)
Fermentação (EtOH)	~3,3	~0,25	Sun & Cheng (2002); Li et al. (2019)
Hidrólise/ Fermentação (EtOH LC)	~6,0	~1,0	Chandel et al. (2018); Rooney et al. (2007)

A inclusão destas parcelas mostra que as rotas termoquímicas (combustão e pirólise) apresentam autoconsumos reduzidos, enquanto as rotas bioquímicas consomem parcelas substanciais da energia gerada, sobretudo devido à elevada exigência térmica da destilação e do pré-tratamento da biomassa. Assim, a quantidade de biomassa efetivamente destinada à produção de energia líquida exportável é inferior à biomassa total processada, devendo esta diferença ser considerada para uma avaliação rigorosa da sustentabilidade das diferentes rotas.



(2025) EVANDRA MAGALHÃES

INFLUÊNCIA DE SOLOS MARGINAIS NA PRODUTIVIDADE E NO BALANÇO ENERGÉTICO DA
UTILIZAÇÃO DE SORGO PARA ENERGIA