

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

Avaliação energética em diferentes sistemas de produção de soja e milho

**Rodolfo Michelassi Silber**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de  
Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2021

Rodolfo Michelassi Silber  
Engenheiro Agrônomo

**Avaliação energética em diferentes sistemas de produção de soja e milho**  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **THIAGO LIBÓRIO ROMANELLI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de  
Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2021

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

Silber, Rodolfo Michelassi

Avaliação energética em diferentes sistemas de produção de soja e milho / Rodolfo Michelassi Silber - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

64 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Fluxo de energia 2. Eficiência 3. Sustentabilidade 4. Balanço energético I. Título

*A todos que tornaram a jornada possível,  
Dedico.*

## DEDICATÓRIA

À **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”** por todo suporte.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas** pela oportunidade.

Ao **Prof. Dr. Thiago Libório Romanelli** pela orientação, conhecimentos e paciência.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico** pela bolsa concedida.

Ao **Laboratório de Gestão Sistêmica e Sustentabilidade** pelos conselhos e colegas.

Aos professores **Dr. Marcos Milan, Dr. Leandro Maria Gimenez, Dr. José Paulo Molin, Dr. Lucílio Rogerio Aparecido Alves e Dr. Murilo Mesquita Baesso** com quem tive a oportunidade de adquirir conhecimento.

Aos funcionários(as) da **ESALQ/USP, PPG, PPGESA** e a **biblioteca central** por tornar a ciência possível.

À minha família **Gustavo, Marilena e Juliana**, à namorada **Camila** e a **todos** que contribuíram direta ou indiretamente.

**Muito obrigado.**

*“The universe seems neither benign nor hostile,  
merely indifferent to the concerns  
of such puny creatures as we.”*

*- Carl Sagan, Cosmos*

## SUMÁRIO

RESUMO .....	8
ABSTRACT .....	9
LISTA DE FIGURAS .....	10
LISTA DE TABELAS .....	11
1. INTRODUÇÃO .....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	15
2.1. Produção agrícola no Brasil.....	15
2.1.1. Soja.....	17
2.1.2. Milho .....	19
2.2. Sistemas de produção .....	22
2.2.1. Preparo e conservação do solo .....	23
2.2.2. Semeadura .....	23
2.2.3. Inoculação e tratamento de sementes .....	24
2.2.4. Adubação de plantio e cobertura .....	24
2.2.5. Tratos culturais .....	25
2.2.6. Colheita .....	26
2.3. Agricultura e sustentabilidade .....	26
2.3.1. Energia na Agricultura.....	27
2.3.2. Conceitos de energia.....	28
2.3.3. Fluxos de energia .....	29
2.3.4. Demanda energética pela agricultura.....	29
2.3.5. Demanda energética na cultura da soja .....	31
2.3.6. Demanda energética na cultura do milho .....	32
2.3.7. Índices de energia .....	33
2.3.7.1. Fertilizantes e corretivos.....	33
2.3.7.2. Sementes.....	33
2.3.7.3. Defensivos.....	34
2.3.7.4. Diesel.....	34
2.3.7.5. Mão de obra.....	34
2.3.7.6. Depreciação de máquinas e implementos .....	34

2.3.7.7. Irrigação.....	35
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1. Limites do sistema e fonte de dados.....	37
3.2. Energia de entrada direta e indireta .....	39
3.2.1. Estimativa da energia de entrada direta.....	39
3.2.2. Estimativa da entrada de energia indireta .....	40
3.2.2.1. Determinação da depreciação de máquinas e implementos agrícolas .....	41
3.2.2.2. Determinação do consumo de combustível.....	42
3.2.2.3. Determinação da mão de obra.....	43
3.2.2.4. Determinação da irrigação .....	43
3.3. Energia de entrada e saída .....	44
3.4. Indicadores de eficiência energética .....	44
3.4.1. Balanço energético (BE).....	44
3.4.2. Retorno sobre investimento (EROI) .....	45
3.4.3. Energia Incorporada (EI) .....	45
3.5. Planilhas de cálculos .....	46
3.6. Análise estatística .....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
4.1. Soja .....	49
4.2. Milho (safra) .....	51
4.3. Milho segunda safra .....	54
4.4. Sistemas de produção .....	56
5. CONCLUSÕES .....	57
REFERÊNCIAS .....	59



## RESUMO

### **Avaliação energética em diferentes sistemas de produção de soja e milho**

O Brasil destaca-se no mercado mundial como um dos maiores produtores agrícolas. A produção de grãos tem uma representação significativa no crescimento da agricultura brasileira, sendo a soja e o milho os mais importantes. A possibilidade de cultivar milho em segunda safra, fez com que o Brasil aumentasse a produção de grãos e se destacasse no mercado internacional. Essa técnica, além de possibilitar realizar duas safras no mesmo ano agrícola, também contribui para o manejo e conservação do solo, aproveitando os insumos e preparos realizados para a safra principal. A maior parte dos recursos consumidos pela agricultura são principalmente de fontes não renováveis, como o petróleo, fertilizantes e defensivos químicos, que são necessários na agricultura moderna, possibilitando explorar o potencial produtivo da cultura. Dessa forma, o fluxo de energia permite identificar o processo produtivo que demanda menos energia. Através do cálculo energético dos insumos e do produto obtido, é possível determinar o balanço energético. Outra forma de indicar a eficiência do sistema de produção, é a razão entre a energia de saída e a de entrada. Sendo assim, técnicas que permitem reduzir o uso de insumos no processo produtivo, faz com que a produção seja mais eficiente, demandando menos energia para a obtenção do produto. Identificar sistemas de produção mais eficientes energeticamente, torna o produto mais sustentável, reduzindo os efeitos ambientais negativos de origem antrópica. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar o histórico da eficiência energética de diferentes sistemas de produção de soja e milho, comparando a eficiência entre eles. Na cultura da soja não houve diferença entre o cultivo convencional e OGM. Apenas o Rio Grande do Sul diferenciou o balanço energético dos demais estados. Entre as safras, houve variação da eficiência energética. O milho safra OGM teve maior eficiência que o convencional. Em Minas Gerais irrigado e o Paraná obtiveram as melhores eficiências, em oposição ao Rio Grande do Sul com a menor. Houve tendência de aumento da energia de saída ao longo das safras. Assim como para o milho safra, o milho segunda safra OGM apresentou maior eficiência quando comparado com o convencional. No estado do Mato Grosso houve os melhores indicadores energéticos. Sendo que, a partir da safra 2012/13 houve um aumento da eficiência. A técnica de sucessão de cultura demonstrou maior eficiência quando comparado com o monocultivo. Os fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas e combustível são as maiores demandas energéticas no sistema de produção da soja e do milho safra e segunda safra. Tecnologias que reduzem a demanda por insumos agrícolas, podem aumentar a eficiência dos sistemas.

Palavras-chave: Fluxo de energia, Eficiência, Sustentabilidade, Balanço energético

## ABSTRACT

### **Energy assessment in different soybean and corn production systems**

Brazil stands out in the world market as one of the largest agricultural producers. Grain production has a significant role in the growth of Brazilian agriculture, with soybeans and corn being the most important. The possibility of cultivating corn in the second crop made Brazil increase its grain production and stand out in the international market. This technique, in addition to making it possible to carry out two harvests in the same agricultural year, also contributes to soil management and conservation, taking advantage of the inputs and preparations made for the main harvest. Most of the resources consumed by agriculture are mainly from non-renewable sources, such as oil, fertilizers, and chemical pesticides, which are necessary in modern agriculture, making it possible to explore the productive potential of the crop. In this way, the energy flow makes it possible to identify the production process that requires less energy. Through the energy calculation of the inputs and the product obtained, it is possible to determine the energy balance. Another way to indicate the efficiency of the production system is the ratio between the output and input energy. Thus, techniques that allow reducing the use of inputs in the production process make production more efficient, requiring less energy to obtain the product. Identifying more energy-efficient production systems makes the product more sustainable, reducing the negative environmental effects of human origin. Thus, this work aims to analyze the history of energy efficiency of different production systems of soybean and corn, comparing the efficiency between them. In soybean crop there was no difference between conventional and GMO cultivation. Only Rio Grande do Sul differentiated the energy balance from the other states. Between crops, there was variation in energy efficiency. The GM crop corn was more efficient than the conventional one. In irrigated Minas Gerais and Paraná, they had the best efficiencies, in opposition to Rio Grande do Sul with the lowest. There was a tendency for an increase in the output energy throughout the harvests. As with corn crop, GMO second crop corn showed greater efficiency when compared to conventional corn. In the state of Mato Grosso there were the best energy indicators. Since the 2012/13 harvest there was an increase in efficiency. The crop succession technique showed greater efficiency when compared to monoculture. Fertilizers, correctives, agricultural defensives, and fuel are the biggest energy demands in the production system of soybean and corn crop and second crop. Technologies that reduce the demand for agricultural inputs can increase the efficiency of systems.

Keywords: Energy flow, Efficiency, Sustainability, Energy balance

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área e produção de grãos de 2000 a 2020. ....	16
Figura 2. Série Histórica da Balança Comercial do Agronegócio. ....	17
Figura 3. Série Histórica da produção anual e área plantada de soja. ....	18
Figura 4. Série histórica dos principais estados produtores de soja em grão. ....	19
Figura 5. Série histórica da produção anual e área plantada de milho. ....	20
Figura 6. Composição da produção de milho cultivada em primeira e segunda safra.....	21
Figura 7. Série histórica dos principais estados produtores de milho safra. ....	21
Figura 8. Série histórica dos principais estados produtores de milho segunda safra. ....	22
Figura 9. Série histórica do consumo de energia pelo setor agropecuário no Brasil. ....	30
Figura 10. Composição do consumo de energia pelo setor agropecuário no Brasil. ....	30
Figura 11. Representação do sistema de produção de soja. ....	32
Figura 12. Representação do custo de produção do AGRIANUAL.....	38
Figura 13. Fluxograma utilizado para os sistemas de produção soja e milho. ....	39
Figura 14. Modelo da planilha para Insumos.....	46
Figura 15. Modelo de planilha para Operações.....	47
Figura 16. Modelo de planilha para os indicadores energéticos.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Índices de energia para insumos diretamente aplicados. ....	40
Tabela 2. Índices para energia indiretamente aplicada. ....	41
Tabela 3. Comparação de indicadores na soja convencional e OGM. ....	49
Tabela 4. Comparação dos indicadores na soja entre os estados. ....	50
Tabela 5. Comparação dos indicadores na soja entre as safras.....	51
Tabela 6. Comparação dos indicadores para o milho, convencional e OGM.....	52
Tabela 7. Comparação dos indicadores para o milho, entre os estados. ....	52
Tabela 8. Comparação dos indicadores para o milho, entre as safras.....	53
Tabela 9. Comparação dos indicadores para o milho segunda safra, convencional e OGM...	54
Tabela 10. Comparação dos indicadores para o milho segunda safra, entre os estados. ....	55
Tabela 11. Comparação dos indicadores para o milho segunda safra, entre as safras. ....	55
Tabela 12. Comparação dos indicadores para os sistemas de produção. ....	56



## 1. INTRODUÇÃO

O setor agrícola no Brasil, destaca-se por ser um dos principais pilares econômicos para o país e um dos grandes exportadores de alimentos no mundo. Este setor desenvolveu-se de forma gradativa, partindo do período extrativista até a agricultura moderna. O estado brasileiro exerceu um papel fundamental a partir da década de 1970 com investimentos sobretudo em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. O crescimento agrícola brasileiro destacou-se nos últimos anos, sendo que a área de cultivo de grãos no país passou de 38 milhões de hectares nos anos 2000 para 63 milhões na safra 2019/20, enquanto a produção passou de 100 milhões de toneladas para 248 milhões nesse mesmo período.

A produção de grãos, especialmente a soja e o milho, possuem uma participação significativa na agricultura brasileira. Neste contexto, o Brasil foi o maior produtor e exportador de soja no mundo, alcançando 126 milhões de toneladas na safra 2019/20. Nesta mesma safra, o país foi o terceiro maior produtor mundial de milho com 102,3 Milhões de toneladas e segundo maior exportador. O resultado na produção e exportação de grãos ao longo do tempo, proporcionou o crescimento positivo da balança comercial do agronegócio.

Para atingir os atuais níveis de produção e produtividade, foi necessário intensificar o cultivo. Com isso, o cultivo intensivo tende causar degradação física, química e biológica do solo, reduzindo a produtividade da cultura e favorecendo o desenvolvimento de pragas, doenças e plantas invasoras. Em contrapartida, técnicas conservacionistas como o plantio direto e a rotação de culturas, possibilitam a produção mais sustentável e a racionalização do uso de insumos e combustível.

A agricultura moderna exige a exploração de recursos naturais para atender à crescente demanda por alimentos e energia, especialmente impulsionados pelo aumento da renda de países em desenvolvimento e pelo aumento populacional. Diante disso, torna-se necessária a conservação e o manejo dos recursos naturais, por meio do aumento na eficiência dos insumos e da agricultura sustentável, visando assegurar as atuais necessidades humanas e das futuras gerações.

A eficiência de um processo de produção, está relacionada com a demanda dos recursos naturais ou antrópicos e o resultado produtivo. Por meio da análise de energia, é possível quantificar a demanda e a saída de um sistema de produção, gerando indicadores que permitem a avaliação sistêmica da eficiência produtiva.

Entretanto, a análise individual de sistemas permite apenas identificar os itens de maior e menor demanda energética, omitindo efeitos adversos como o clima. Apenas com a comparação entre diferentes sistemas de produção, permite avaliar a eficiência entre eles. Através do histórico, torna-se possível identificar variações ocasionadas pelo clima ou por novas tecnologias.

Diante da escassez e finitude dos recursos naturais, identificar sistemas de cultivo eficientes se faz necessário, possibilitando racionalizar o uso de insumos e recursos ambientais, tornando o produto mais sustentável, reduzindo os efeitos ambientais negativos de origem antrópica. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a eficiência produtiva de diferentes cenários de produção de soja e milho nos quatro maiores estados produtores ao longo das safras 2009/10 a 2019/20, identificando as produções mais sustentáveis.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

O Brasil se tornou um dos grandes exportadores de produtos agrícolas no mundo, sendo os grãos o principal deles. Para atingir esse posto, foram necessários vários anos de desenvolvimento científico e tecnológico, gerando novas técnicas e sistemas de cultivo. Estes avanços intensificaram a produção, tornando-as insustentáveis ao longo dos anos. Através do fluxo de materiais e de energia, é possível quantificar a eficiência produtiva e identificar as produções mais sustentáveis.

### 2.1. Produção agrícola no Brasil

A agricultura foi uma das primeiras atividades desenvolvidas pelos humanos. Os primeiros materiais e técnicas utilizadas para o cultivo de plantas e domesticação de animais datam do Período Neolítico, permitindo a moradia fixa e o declínio da caça e coleta. Com isso, foi possível o surgimento das primeiras civilizações e desenvolvimento do comércio (MAZOYER; ROUDART, 2010).

A partir da Revolução Industrial no século XVIII, as atividades humanas passaram por uma grande transformação. A agricultura e agroindústria alteraram as relações entre produção e mão de obra com a inserção de tecnologias como fertilizantes e maquinários, reduzindo a necessidade de trabalho humano. O uso do petróleo, em larga escala, se iniciou principalmente em países do hemisfério norte após a Segunda Guerra Mundial. Nesse mesmo período, houve o início do que ficou conhecido como Revolução Verde, consistindo em técnicas como o melhoramento vegetal e intensificação da produção como uso de agroquímicos e fertilizantes com o intuito de aumentar a produção de alimentos e reduzir a fome no mundo (FELDENS, 2018).

Em meados do século XX, a agricultura brasileira iniciou uma transformação por meio de investimentos em tecnologia, deixando de ser uma produção arcaica para tornar-se um pilar do desenvolvimento econômico. A partir da década de 1970 com a denominada Revolução Verde, o Estado proporcionou a expansão da fronteira agrícola, com investimentos em infraestrutura e transporte, incentivos fiscais e modernização da agricultura, possibilitando a substituição das importações pela produção interna (BUAINAIN; SOUSA; NAVARRO, 2018; FURTADO, 1975; GASQUES et al., 2012).

A partir da década de 1990, o setor agrícola observou os resultados principalmente em produtividade, proporcionados pelas pesquisas em ciência e tecnologia de instituições públicas e privadas (FREDERICO, 2013). Dos anos 2000 em diante, o Brasil se tornou um importante participante no setor agrícola mundial, sendo atualmente reconhecido como o maior produtor e exportador de soja no mundo (USDA, 2021a).

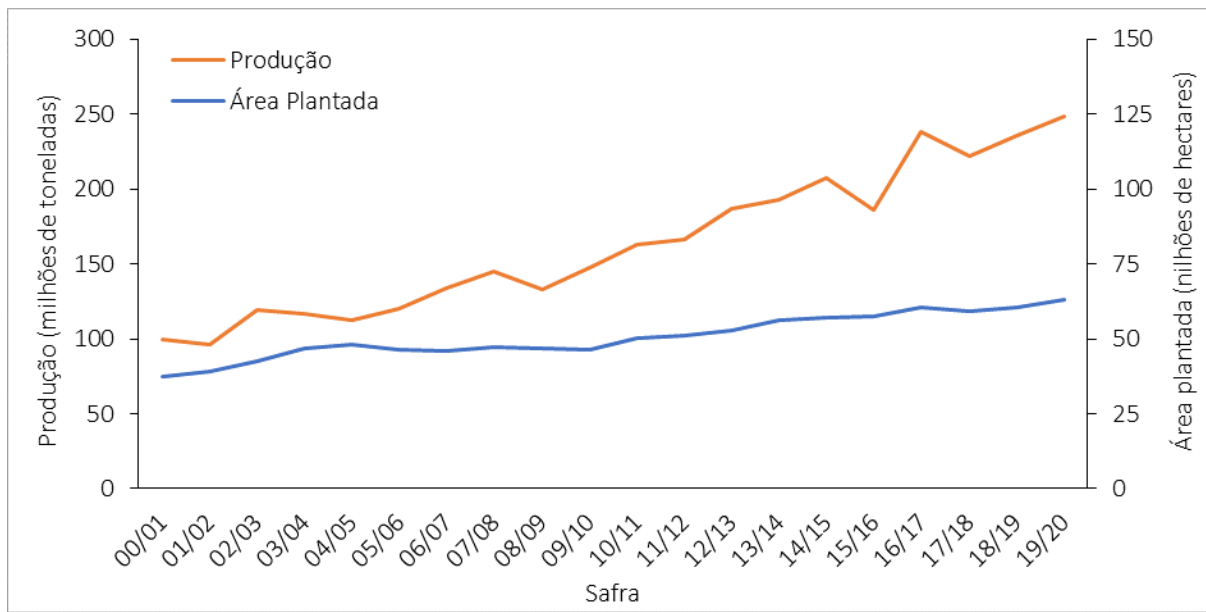
A importância do agronegócio brasileiro não se restringe apenas ao mercado interno, grande parte da produção é exportada para outros países, garantindo a alimentação de milhares de pessoas ao redor do mundo, essa importância tende ser cada vez maior para atender à crescente demanda. A agricultura evoluiu ao longo dos anos com o desenvolvimento tecnológico, permitindo atingir maiores produtividades (FIGUEIREDO; SANTOS; LIMA, 2012; SEIXAS; CONTINI, 2018).

O Brasil se destaca atualmente sendo um grande exportador de commodities, na qual os cinco principais produtos são a soja, minério de ferro, petróleo, açúcares e carne bovina. Dentre os principais produtos



exportados, os grãos de soja e milho foram responsáveis pela participação de 17% do total de exportações brasileiras e 42% entre os produtos do agronegócio no ano de 2020, representando o valor de 34,5 bilhões de dólares (COMEXSTAT, 2021).

De acordo com a Figura 1, a área de cultivo de grãos no país passou de 38 milhões de hectares nos anos 2000 para 63 milhões na safra 2019/20, enquanto a produção passou de 100 milhões de toneladas para 248 milhões nesse mesmo período (CONAB, 2021a).



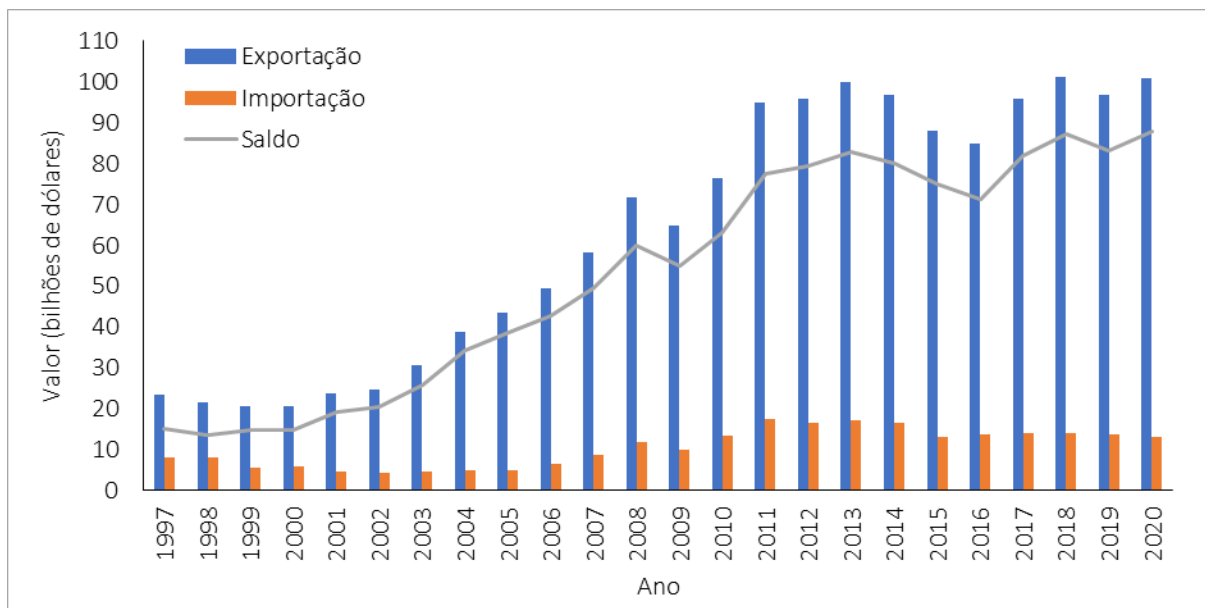
**Figura 1.** Área e produção de grãos no Brasil de 2000 a 2020.

Fonte: CONAB (2021a).

A disparidade entre o crescimento da produção e da área plantada tem dentre suas causas, o melhoramento genético, triplicando a produtividade do arroz e duplicando de culturas como o trigo, milho, soja e feijão. Outro fator foi o avanço das tecnologias de sementes, técnicas de cultivo, mão de obra qualificada e máquinas modernas, permitindo que seja feito mais de uma safra na mesma área em um ano (EMBRAPA, 2018).

Dessa forma, no Brasil, as projeções para a safra de grãos 2029/30 são de 318,3 milhões de toneladas. Esse aumento representa um acréscimo de 24% ou 60,5 milhões de toneladas referente a produção de 2020/21, já para a área cultivada de grãos o aumento é de 10,5 milhões de hectares, que representam 16% de acréscimo. Para atingir esses níveis de crescimento, será necessária ampliação da infraestrutura, investimento em pesquisas e financiamentos. A soja e o milho de segunda safra, são os grãos que se destacam nessa projeção (GASQUES et al., 2020).

O valor das exportações aumentou cinco vezes, partindo de 21 bilhões de dólares no ano 2000 e alcançando o valor de 101 bilhões em 2020, sendo os grãos os responsáveis por 48% do total de exportações. Para as importações o valor máximo registrado nesse período foi em 2011, atingindo 18 bilhões de dólares, recuando em 2020 para 13 bilhões. Dessa forma, o Brasil manteve um superavit na balança comercial da agricultura, correspondendo ao valor de 88 bilhões de dólares, em 2020 (Figura 2).



**Figura 2.** Série Histórica da Balança Comercial do Agronegócio no Brasil.

Fonte: AGROSTAT (2020).

A partir de 2000, houve um crescimento na demanda por alimentos e por produtos agrícolas, impulsionados em grande parte pelo aumento populacional, taxa de urbanização, renda, incentivos ao consumo e produção de biocombustíveis. O cenário de crescimento se mantém quando observada as projeções para as próximas décadas (EMBRAPA, 2018).

### 2.1.1. Soja

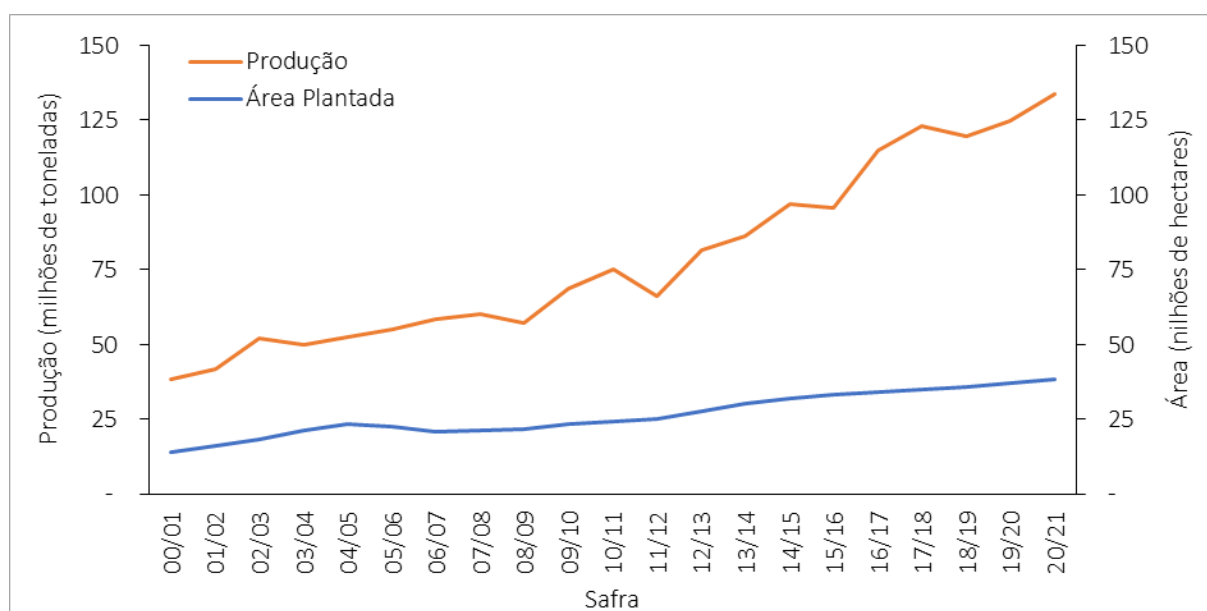
A soja (*Glycine max* L. Merrill) foi uma das primeiras culturas a ser cultivadas pelo homem, tendo início por volta de cinco mil anos atrás. Possui seu centro origem no continente Asiático, na região da antiga Manchúria, onde hoje se localiza a China. Posteriormente foi disseminada para a Europa, América do Norte e América do Sul. No Brasil, foi inicialmente introduzida na Bahia em 1882 e sendo disseminada posteriormente para a região Sul, apresentando melhor adaptação, posteriormente passou por programas de melhoramento genético, possibilitando sua expansão para outras regiões do país (HYMOWITZ, 1970; VERNETTI, 1983).

A década de 1970 foi conhecida pela Revolução Verde, sendo que a soja teve um aumento impactante de sua área cultivada. Inicialmente nos anos de 1950 a 1970, o cultivo da soja era predominantemente nas regiões Sul e Sudeste, sendo que, em 1975, a região Centro-Oeste e, em 1980, as regiões Norte e Nordeste iniciaram a produção. A década de 1980 foi marcada por uma crise agrícola pela mudança nas linhas de crédito, alta produção e baixa nos preços. Algumas mudanças iniciaram na década de 1990 com a introdução de tecnologias e mudanças no sistema de cultivo com a introdução do SPD (Sistema de Plantio Direto). O início dos anos 2000 houve o aparecimento da agricultura de precisão nos campos e uso de sementes geneticamente modificadas e avanços tecnológicos, que permitiram um grande aumento na produtividade (GAZZONI; DALL'AGNOL, 2018; SIEBEN; MACHADO, 2006).

No ano de 2020, o Brasil foi destaque internacional ultrapassando a produção de soja dos Estados Unidos e tornando-se o maior produtor mundial do grão, seguidos pela Argentina e China. Dentre os países exportadores em 2020, o Brasil se posiciona em primeiro lugar com 56% do total de exportações, em segundo lugar está o EUA com 28% e, em terceiro, a Argentina com 6%.

A Figura 3 mostra o crescimento da área e produção a partir do ano 2000. A safra de 2019/20 o Brasil produziu 126 milhões de toneladas métricas de soja em uma área de 36,9 milhões de hectares. Para a próxima safra, as projeções apontam a produção de 133,7 milhões de toneladas em uma área de 38,2 milhões de hectares (USDA, 2021a).

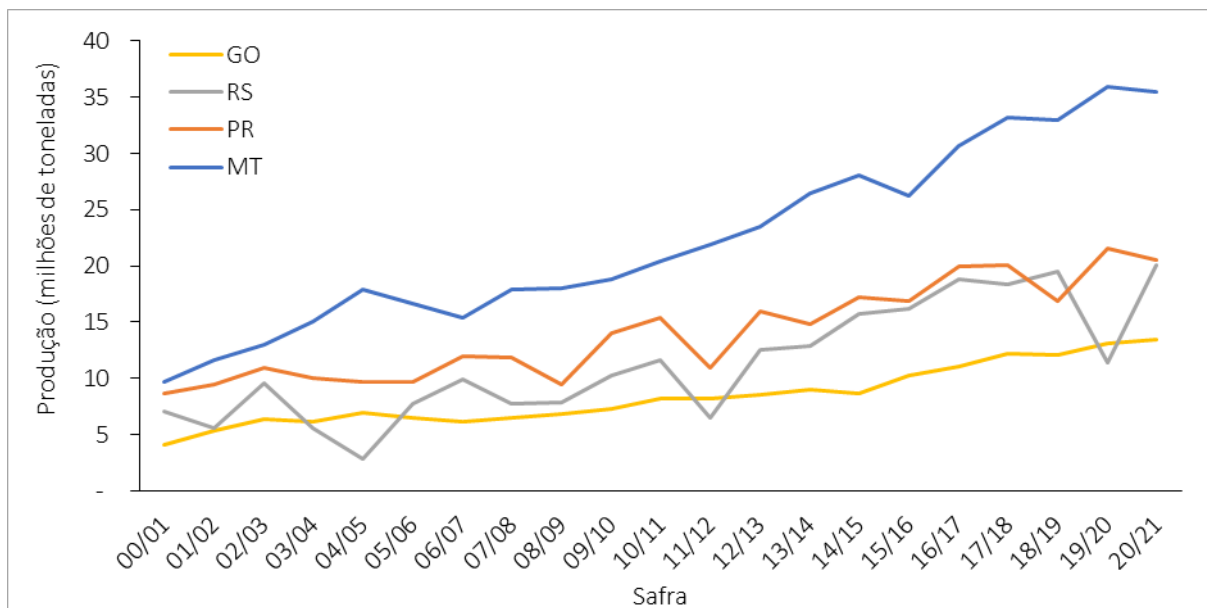
O histórico da produção de soja mostra que em 20 anos houve um crescimento 95 milhões de toneladas, enquanto a área de plantio teve um crescimento de 24 milhões de hectares. Nesse período a cultura apresentou um aumento de 79% na produtividade (CONAB, 2021b).



**Figura 3.** Série Histórica da produção anual e área plantada de soja no Brasil.

Fonte: CONAB (2021b).

A Figura 4 apresenta os quatro estados com as maiores produções de soja a partir do ano 2000, representando em média 71% da produção nacional nesse período. O estado com a maior participação é o Mato Grosso (MT), com a média de 27,8 milhões de toneladas, representando 28% da neste período. Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS) e Goiás (GO) somados foram responsáveis por 43% da produção nacional.



**Figura 4.** Série histórica dos principais estados produtores de soja em grão no Brasil.

Fonte: CONAB (2021b).

Projeções do crescimento populacional aliado com o desempenho econômico e melhoria nos índices nutricionais permitem identificar uma tendência do comércio de soja para as próximas décadas, apontando uma crescente demanda pelo grão e por seus subprodutos. O aumento demográfico não se dá apenas com a taxa de natalidade, com os avanços na área da saúde, a faixa etária da população se modifica permitindo maior longevidade. A maior renda *per capita* proporcionará de forma mais intensa a produção de produtos processados, insumos industriais e bioenergia, permitindo que países de menor renda tenham maior acesso, reduzindo a desigualdade alimentar. Com isso, há uma melhora nos índices nutricionais da população mundial, tendo a soja como matéria prima principalmente para produção de proteína animal (GAZZONI; DALL'AGNOL, 2018).

### 2.1.2. Milho

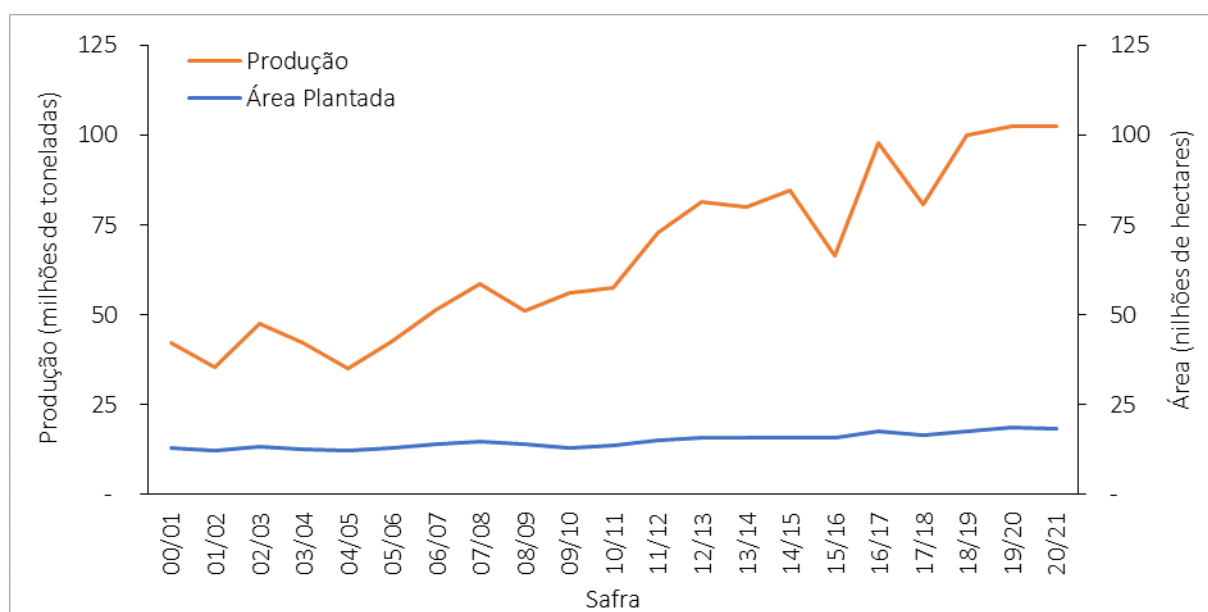
O milho (*Zea mays*) tem a América central, mais precisamente o México, como centro de origem mais provável, indicando que seu cultivo pode ter ocorrido a cerca de 4500 anos atrás, sendo uma das espécies mais cultivadas para alimentação, devido ao alto teor de amido, sendo uma ótima fonte de energia para humanos e animais através da ração. Atingiu o maior estágio de domesticação ao perder a característica de sobrevivência na natureza sem a intervenção do homem. A origem do milho é controversa, havendo diferentes teorias para explicar. Atualmente a hipótese mais aceita é a “descendência do teosinte”, indicando que o surgimento do milho se deu pelo homem por meio de sua seleção (FORNASIERI, 2007; PATERNIANI, 1987).

Pouco depois de sua domesticação, foi trazido a América do Sul, onde continuou este processo no oeste da Amazônia. Uma segunda genética inteiramente adaptada ao consumo humano, veio do México há cerca de mil anos, para o norte da Amazônia, culminando no encontro das duas genéticas no norte de Minas Gerais (KISTLER et al., 2018).

Sendo considerada uma cultura estratégica para a produção agrícola no Brasil, o milho é cultivado em todos os biomas e em diferentes épocas e sistemas de produção. O cultivo de verão, conhecido também como primeira safra tem a maior parte do semeio durante a primavera/verão e durante o verão/outono, após a colheita da soja na região Centro-Sul do Brasil, é realizado o semeio do milho de segunda safra, popularmente conhecido como safrinha (CONTINI et al., 2019).

Em 2020, o Brasil foi o terceiro maior produtor de milho do mundo atrás dos Estados Unidos e da China. Os EUA possuem uma participação de 31% na produção mundial de milho, seguido da China com 23% e do Brasil com 9%. Dentre os maiores exportadores, o Brasil ficou em terceiro lugar com 20% do total de exportações, atrás dos Estados Unidos 27% e da Argentina 23%. As projeções para o ano de 2021 colocam o Brasil em segundo colocado entre os exportadores, devido ao aumento na produção (USDA, 2021b).

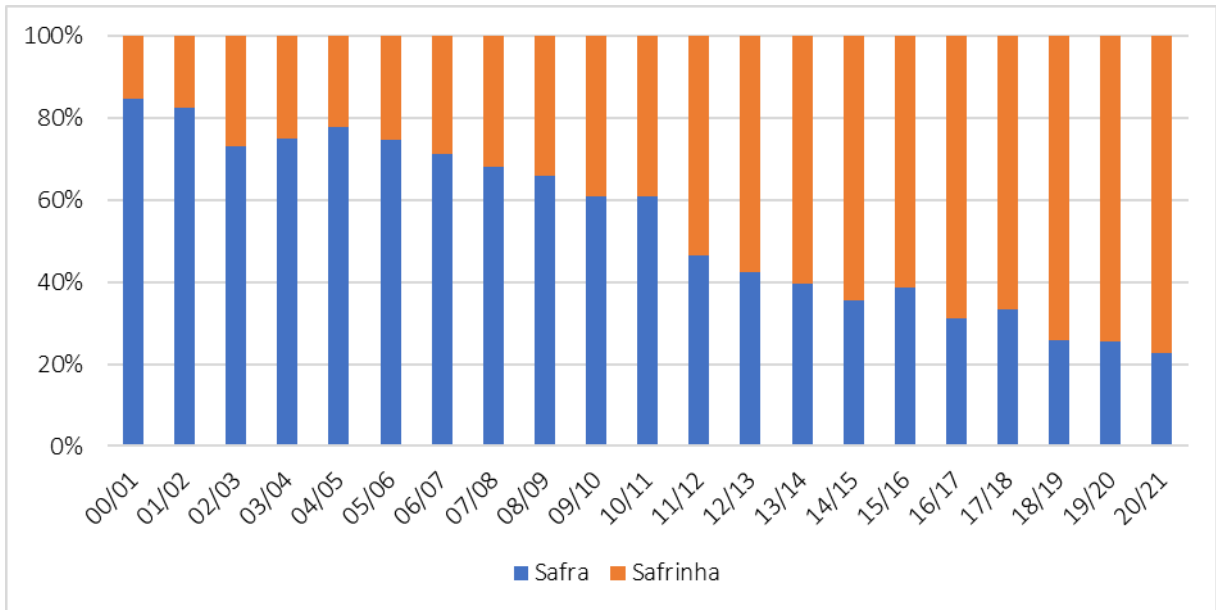
A safra total de milho de 2019/20 resultou em 102,3 milhões de toneladas no Brasil em uma área de 18,5 milhões de hectares. A produção total de milho no Brasil teve um crescimento de 60 milhões de toneladas, sendo que a área de plantio apresentou um crescimento de 5 milhões de hectares no período de 20 anos. A produtividade do grão teve um aumento de 59% no mesmo período, devido as novas tecnologias e métodos de cultivo (Figura 5).



**Figura 5.** Série histórica da produção anual e área plantada de milho no Brasil.

Fonte: CONAB (2021b).

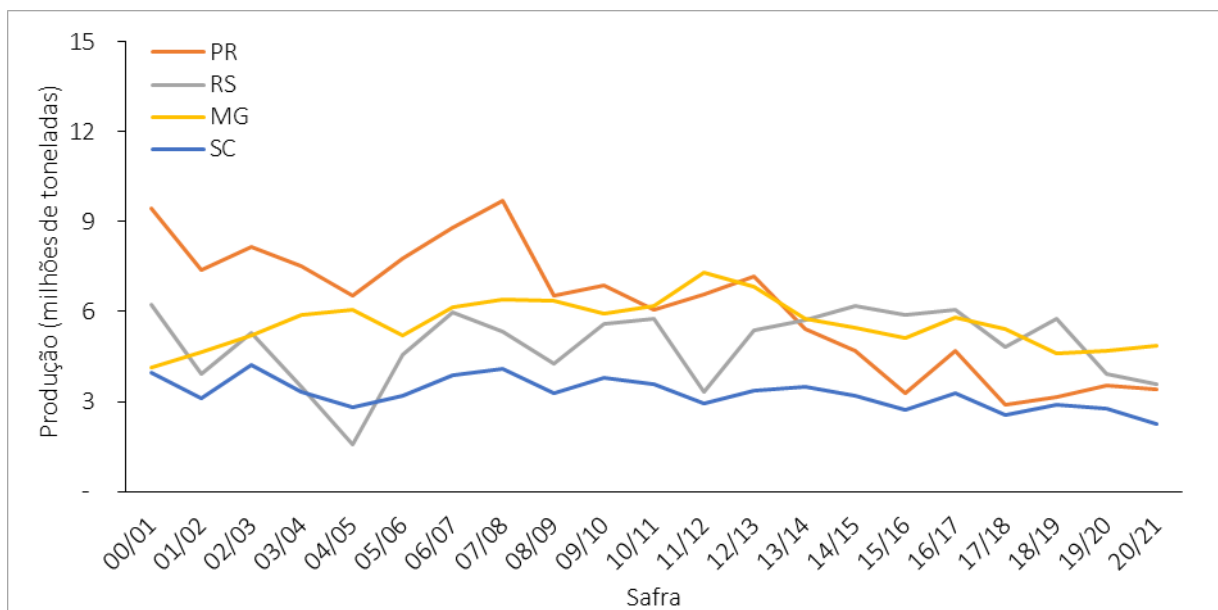
O milho de segunda safra ganhou espaço gradualmente ao longo do tempo. A Figura 6 mostra o percentual da produção de milho de primeira e segunda safra nos últimos 20 anos. O milho de primeira safra na produção de 2000/01 representava 85% da produção de milho no Brasil, em 2011/12 o milho segunda safra já representava mais da metade dos grãos produzidos e atualmente em 2019/20 foram mais de 70%.



**Figura 6.** Composição da produção de milho cultivada em primeira e segunda safra no Brasil.

Fonte: Adaptado de CONAB (2021).

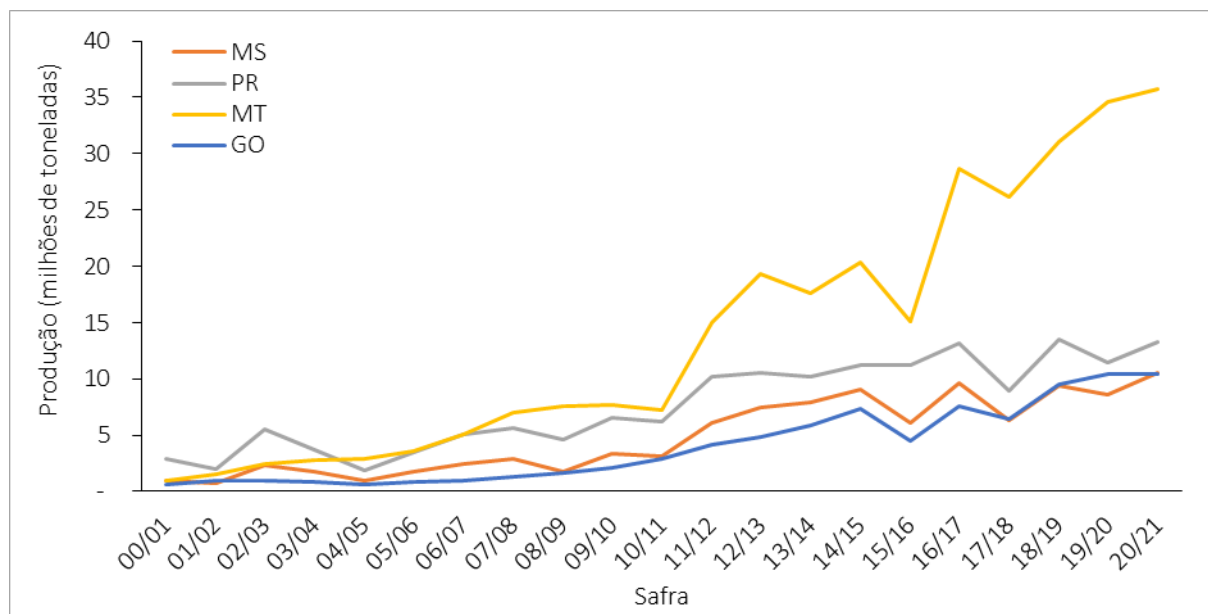
Quando comparado a produção de milho primeira safra entre os principais estados produtores, esse valor diminuiu nos últimos 20 anos. A Figura 7 apresenta que na safra de 2019/2020, o estado de Minas Gerais (MG) correspondeu por 18% da produção brasileira, Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR) e Santa Catarina (SC) representaram 15%, 14% e 11% respectivamente. Esse declínio na produção de primeira safra, pode ser explicado pelo avanço da produção de milho em segunda safra.



**Figura 7.** Série histórica dos principais estados produtores de milho safra no Brasil.

Fonte: CONAB (2021b).

A Conab padroniza a segunda safra para cultivos após janeiro. Dessa forma, a Figura 8 mostra os principais estados produtores de milho de segunda safra. As maiores produções na safra 2019/20 foram: Mato Grosso (MT) com 46% da produção, Paraná (PR) com 15%, Mato Grosso do Sul (MS) com 12% e Goiás (GO) com 14%. Pode-se observar o crescimento da produção de milho segunda safra em todos os estados, principalmente o MT, que na safra de 2000/01 produzia um milhão de toneladas e em 2020 produziu 34,6 milhões.



**Figura 8.** Série histórica dos principais estados produtores de milho de segunda safra no Brasil.

Fonte: CONAB (2021b).

As projeções para o milho indicam que nos próximos 10 anos a área plantada pode aumentar de 1,7 a 7,4 milhões de hectares, principalmente em sistemas de plantio de soja, sendo que a produção pode atingir de 123,9 a 150,8 milhões de toneladas, em que o milho segunda safra será o principal responsável por esse aumento. O consumo interno tende a aumentar para a produção de etanol e ração para animais, porém as exportações continuarão apresentando grande demanda (GASQUES et al., 2020).

## 2.2. Sistemas de produção

Sistema de cultivo são práticas que envolvem a produção de uma cultura vegetal a partir de uma sequência de atividades e operações, com o objetivo de obter uma produção. Dessa forma, pode-se ordenar a etapas de produção como o planejamento, conservação e preparo de solo, plantio e adubação, tratos culturais, colheita e pós-colheita (CONNOR; LOOMIS; CASSMAN, 2011).

O sistema de produção envolve diferentes sistemas de cultivo, podendo ser um sistema em monocultura, sucessão, rotação ou consorciação de culturas e sistema em integração. O sistema em monocultura ou produção isolada, refere-se na produção da mesma cultura ao longo dos anos em uma mesma área. O sistema em sucessão de culturas envolve a produção sequencial de duas culturas em um mesmo espaço durante vários

anos. A rotação de culturas é a ordenação alternada, cíclica e sazonal de diferentes culturas em uma mesma área. O sistema de consorciação de culturas ou policultivo é designado quando há simultaneamente no mesmo espaço duas ou mais culturas. O sistema de integração envolve agricultura, pecuária e floresta integrados entre si (HIRAKURI et al., 2012).

### **2.2.1. Preparo e conservação do solo**

Após o planejamento, a primeira operação e atividade na área de cultivo é o preparo do solo, bem como sua conservação. Pode ser definido como a associação de operações agrícolas com o objetivo de proporcionar para a cultura condições favoráveis, principalmente para a semeadura, bem como para seu estabelecimento e desenvolvimento (DENARDIN et al., 2012).

Em solos cultivados, o principal fator que reduz o potencial produtivo do solo é a erosão. Por esse motivo, produtores adotam práticas conservacionistas como a construção de terraços. Chuvas de alta intensidade podem causar enxurrada e por consequência erosões. O terraceamento constitui a criação de barreiras transversais ao sentido do declive do terreno com o objetivo de reter a água da chuva e impedir a degradação do solo (WADT, 2004).

Outro fator de redução do potencial produtivo em solos brasileiros é a elevada acidez e alumínio trocável, comuns no território brasileiro. Com isso, o controle do pH é realizado através de calagem, tendo como objetivo melhorar essas condições através da adição de carbonatos, óxidos ou hidróxidos de Ca e Mg. Com isso, a redução da acidez promove o aumento da capacidade produtiva do solo através do aumento das trocas catiônicas, disponibilidade de nutrientes e insolubilização de elementos tóxicos às plantas (WIETHÖLTER, 2000).

A recomendação de calagem é realizada por meio da análise de solo, devendo ser realizada no mínimo 90 dias antes do plantio. A quantidade e o calcário a ser aplicado irá variar de acordo com a cultura e do poder relativo de neutralização total (PRNT) do calcário, verificando se há necessidade de elevar os níveis de Ca e Mg no solo. Em sistemas de plantio direto, a correção do solo é realizada antes da implantação na área, sendo necessária a incorporação após a correção. Em sistemas já estabelecidos, é necessário o acompanhamento através de análises de solo e correções de manutenção (CAIRES, 2013; MALAVOLTA, 1981).

### **2.2.2. Semeadura**

O sistema de plantio influi diretamente nas condições físicas, químicas e biológicas do solo. Ao longo do tempo houve diferentes técnicas para o plantio como o cultivo convencional, cultivo mínimo e plantio direto. Na qual, permite elevar ou reduzir o potencial de produção por provocar alterações no solo através das operações mecanizadas (PASSOS; ALVARENGA; SANTOS, 2018).

No Brasil por algum tempo utilizou-se sistemas de preparo de solo de regiões de clima temperado para a produção de soja, principalmente na Região Sul do país. Esses sistemas revolviam de forma intensiva e profunda o solo com arados e grades. Este preparo intensivo do solo, caracterizado como cultivo convencional (SPC), em



regiões de clima subtropical e tropical provoca a intensa degradação química, biológica e física, que aliada com a falta de cobertura, resulta no aumento de processos erosivos e perda de produtividade (DEBIASI et al., 2013).

Com isso, o potencial produtivo do solo começou a reduzir e a necessidade de adotar sistemas de manejo adequados ao clima brasileiro tornou-se necessário. O plantio direto (SPD) foi a solução para esse problema, a implantação de culturas sobre os restos culturais da lavoura anterior, sem a necessidade de revolvimento do solo, começou a melhorar as qualidades físicas, químicas e biológicas do solo. A década de 1990 foi marcada pela implementação do SPD pelos produtores. Dessa forma, a presença da palha reduz a erosão, mantendo maiores níveis de umidade e teores de matéria orgânica no solo (DENARDIN et al., 2001). Com o surgimento de cultivares resistentes a herbicidas, o SPD tornou-se uma prática comum entre os produtores.

### **2.2.3. Inoculação e tratamento de sementes**

Como forma de melhorar o desempenho das culturas, os produtores adotam técnicas que favorecem as culturas. O tratamento das sementes e a inoculação, realizadas antes da semeadura, são exemplos que atualmente tornaram-se fundamentais para reduzir a mortalidade de plantas por patógenos, principalmente na emergência e reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados, como no caso da soja.

O tratamento de sementes é realizado como forma preventiva tanto para a entrada de patógenos na área de cultivo como para o estabelecimento e desenvolvimento da cultura. Comumente são utilizados fungicidas para soja e milho, que mesmo em contato com o fungo no solo antes ou depois da emergência, garante que terá menor infecção e por consequência menor deterioração ou morte das plântulas. Cada cultura possui patógenos específicos que prejudicam o desenvolvimento da cultura, variando o princípio ativo para cada tratamento (EMBRAPA, 2013; PINTO, 2003).

Com o expressivo aumento na produtividade da soja, a demanda de nitrogênio acompanhou sendo o principal nutriente para a planta. Sendo assim, a necessidade de fertilizantes poderia elevar os custos e tornar a produção inviável, porém a soja possui grande capacidade de obter N através da fixação biológica de N<sub>2</sub> (FBN), realizado através da simbiose com bactérias *Bradyrhizobium*, que são inoculadas nas sementes antes do plantio para infectar os pelos radiculares, formar nódulos e fornecer o N necessário para a planta (CAMPO; HUNGRIA, 2000). Para garantir a eficiência da FBN na soja, utiliza-se molibdênio (Mo) e cobalto (Co) antes da inoculação (SFREDO, 2008).

### **2.2.4. Adubação de plantio e cobertura**

Assim como para a calagem, a adubação deve ser realizada através dos cálculos a partir das análises laboratoriais. Grande parte dos solos brasileiros apresentam deficiência em algum nutriente, podendo limitar a produtividade. O fornecimento de macro e micronutrientes é essencial para o desenvolvimento da cultura, resultando em produtividades esperadas, não limitando o potencial dos materiais genéticos (MALAVOLTA, 1981).

Com a FBN, a adubação nitrogenada na soja tornou-se dispensável, visto que esta supre toda necessidade da planta. A maioria dos solos brasileiros possuem deficiência de fósforo (P). A baixa disponibilidade de P provoca deficiência, limitando o crescimento e reduzindo a produtividade, principalmente em solos com menos de três anos de exploração e baixos níveis de P residual de culturas anteriores. O potássio (K) necessita de atenção em solos do cerrado, arenosos ou com baixa capacidade de trocas de cátions. A deficiência de K pode limitar a produtividade. A adubação com micronutrientes deve ser realizada de acordo com análise de solo ou foliar, pois depende muito do solo e da área cultivada. Pode ser aplicado via solo, foliar ou via semente, de acordo com a deficiência encontrada (SFREDO, 2008).

Assim como na soja, o milho necessita de grandes quantidades de nitrogênio para seu desenvolvimento. A quantidade e o parcelamento da aplicação variam de fatores como o tipo de solo, época de semeadura (safra ou segunda safra), material genético, entre outros. A exigência de fósforo no milho é menor que N e K, porém deve-se levar em consideração a quantidade de P disponível no solo, principalmente em cultivares de ciclo curto, que demandam maiores níveis de P em solução. O potássio é o segundo elemento mais importante para o milho, a deficiência provoca limitação na produtividade. Os micronutrientes, com destaque para o zinco, devem ser analisados para não provocar deficiência na planta, gerando redução de produtividade. As aplicações podem ser realizadas via solo, foliar e semente (COELHO, 2006).

### 2.2.5. Tratos culturais

Os tratos culturais são técnicas com o intuito de proporcionar as melhores condições para o crescimento e desenvolvimento da cultura entre o plantio e a colheita. Sendo assim, a adubação de cobertura se enquadra nos tratos culturais. Além do fornecimento de nutrientes, o controle de plantas daninhas, pragas e doenças é essencial para o desenvolvimento da cultura.

Plantas daninhas ou invasoras causam prejuízos na maioria das culturas de exploração agrícola, pois competem com a cultura de interesse por luz, água e nutrientes. Essas plantas entre da lavoura provocam diretamente a redução da produtividade, podendo também reduzir a qualidade dos grãos durante a colheita. Normalmente são utilizados métodos preventivos, químico, mecânico e cultural, sendo o químico o mais usual. A soja geneticamente modificada (soja RR), permite que seja utilizado o herbicida glifosato no lugar de diversas combinações, proporcionando maior facilidade ao produtor (SEIXAS et al., 2020).

Assim como as plantas invasoras, as pragas provocam danos econômicos nas lavouras. As pragas são insetos-praga que se alimentam de estruturas das plantas, desde a emergência até a maturação fisiológica. Seu controle é feito através de inseticidas quando a população de insetos-praga atinge o nível de dano econômico. No caso do milho geneticamente modificado Bt (*Bacillus thuringiensis*), a planta possui uma característica que exprime uma proteína inseticida, controlando insetos da espécie lepidóptera, coleóptera e díptera, sendo os que mais causam danos econômicos para a cultura (VALICENTE, 2015).

Um dos principais fatores limitantes dos de altos rendimentos nas culturas são as doenças, podendo ser fungos, nematoides, bactérias ou vírus. Essas doenças podem afetar qualquer estrutura da planta, principalmente folhas e raízes, sendo que seu aparecimento pode variar de um ano para o outro, em diferentes

regiões e condições climáticas. Os danos causados por esses patógenos variam de 15% a 20%, porém podem chegar a 100%. No caso da soja, a maioria dos estados brasileiros adotam o vazio sanitário de 60 a 90 dias, proibindo a manutenção de plantas de soja vivas nesse período, com o intuito de reduzir o inoculo da ferrugem para a safra de verão (CASELA; FERREIRA; PINTO, 2006; EMBRAPA, 2013).

### **2.2.6. Colheita**

A colheita é uma operação mecanizada de grande importância no processo produtivo, essa etapa separa o produto (grãos) a serem comercializados do restante da planta. Para o melhor aproveitamento, a fim de evitarem perdas qualitativas e quantitativas, o momento de colher e a regulagem da máquina devem ser levados em consideração.

De forma indireta, alguns fatores que afetam a eficiência da colheita podem ser ocasionados pelo mau preparo do solo, época de semeadura, espaçamento, densidade e pela escolha da cultivar. Para soja, o momento ideal de colheita é quando atingir o estágio R8 e umidade entre 13% e 14%. O milho deve ser colhido quando atingir a maturação fisiológica e com a umidade entre 18-20%. O retardamento da colheita pode ocasionar maior incidência de patógenos caso haja chuva ou a umidade no grão estiver abaixo do ideal, proporcionando susceptibilidade a danos mecânicos (EMBRAPA, 2013; MANTOVANI, 2010).

Durante a operação ocorrem perdas principalmente pela má regulagem da colhedora. Na plataforma de corte sucedem as maiores perdas causadas pela debulha, altura da inserção ou acamamento das plantas. Os mecanismos internos também são responsáveis, pois os grãos podem passar através da colhedora (SILVEIRA; CONTE, 2013).

## **2.3. Agricultura e sustentabilidade**

O termo segurança alimentar é definido de acordo com a World Food Summit (1996) *“existe quando todas as pessoas, em todos os momentos, têm acesso físico e econômico a alimentos suficientes, seguros e nutritivos para atender às suas necessidades dietéticas e preferências alimentares para uma vida ativa e saudável”*, ressalta também que é papel de cada nação disponibilizar, possibilitar o acesso e utilização para própria população e também cooperar com os demais países, reduzindo a insegurança alimentar global.

Atualmente, o crescimento populacional é inevitável e o aumento de áreas agricultáveis é limitado por fatores regionais como a escassez de água, falta de infraestrutura e áreas nativas onde o desmatamento é restrito (VOS; BELLÙ, 2019). Dessa forma, o setor agrícola necessita encontrar formas para mitigar a crise alimentar que atinge a qualidade de vida principalmente de pessoas mais pobres e necessitadas.

As perspectivas para 2050 indicam o aparecimento crescente na escassez de recursos naturais para produções agrícolas, o que torna necessário a exploração mais eficiente e sustentável dos recursos que temos disponíveis. A escassez pode levar à uma superexploração dos recursos naturais, não promovendo o uso racional de insumos, tornando-os insustentáveis (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012; GARNETT et al., 2013).

Malthus (1798) propôs que, devido ao crescimento geométrico da população, os alimentos seriam escassos por crescer em progressão aritmética. Porém, não se previu a descoberta de novos territórios distantes da Europa, além do desenvolvimento tecnológico e de pesquisas em ciências agrárias.

Nesse contexto, novas técnicas podem proporcionar os mesmos benefícios à população humana e para as gerações futuras, com as mesmas condições bióticas e de recursos naturais através de sua preservação, manutenção e recuperação. O desafio da agricultura é integrar a conservação mantendo e melhorando a produtividade garantindo a segurança alimentar e a lucratividade do sistema produtivo. Uma solução seria reduzir a mecanização com adoção de sistemas como plantio direto e garantir a máxima eficiência para insumos como fertilizantes e defensivos químicos (DENARDIN et al., 2012; FAO, 2017).

A eficiência está inteiramente ligada com o a quantidade de recursos, naturais ou antrópicos, que determinado sistema produtivo demanda e a quantidade produzida. Por meio da grandeza física de energia, é possível obter por meio de indicadores, a eficiência na conversão das entradas em produto de um sistema. Tendo em vista as transformações físicas que ocorrem durante a produção, o fluxo de energia estabelece a base para a comparação e classificação dentre os que converteram de maneira mais ou menos eficiente as entradas em saídas (ALLUVIONE et al., 2011).

### **2.3.1. Energia na Agricultura**

As necessidades básicas dos seres humanos são atingidas através de recursos encontrados nos ecossistemas, seja para alimentação, abrigo ou comida. As modificações nos ecossistemas naturais ocorreram ao longo da história para atender as necessidades cada vez mais indispensáveis, alterando gradativamente o ambiente e a utilização de seus recursos (ODUM; BARRETT, 1972).

Dentro de um ecossistema, ocorre uma rede de fluxos de energia, em que a planta converte a energia solar em energia química através da fotossíntese, que por sua vez servirá de alimento para animais e microrganismos, até a decomposição de plantas e animais, promovendo a reciclagem dos elementos químicos como o carbono e o hidrogênio (PIMENTEL; PIMENTEL, 2007a).

Os humanos manipularam o ambiente para produção agrícola, acrescentando uma demanda de energia e trabalho inexistente no sistema natural. De certa forma, quanto maior for a produção, maior será a quantidade de energia e trabalho requerida. Tendo em vista que o agricultor busca disponibilizar condições ambientais favoráveis para o cultivo através do uso de fertilizantes e defensivos, por exemplo (PIMENTEL, 1992).

Dessa forma, a energia tornou-se um insumo vital para a produção agrícola, gerando algumas preocupações devido a sua dependência, principalmente de formas não renováveis que podem gerar escassez. Uma forma de entender a quantidade de energia demandada pelo sistema, é o balanço energético, que compreende a relação entre a quantidade de energia incorporada no produto agrícola pela quantidade de energia necessária para sua produção (FLUCK, 1979).

Com isso, o balanço energético pode ser um instrumento de análise de sistemas que possibilitam o menor uso de energia para uma mesma produção, proporcionando a redução no uso de energia e consequentemente menor uso de insumos e maiores níveis de sustentabilidade (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

### 2.3.2. Conceitos de energia

No século XVII, os cientistas por meio de observações acreditavam que o calor de um corpo era determinado por um fluido elástico presente dentro deste corpo, onde as partículas eram repelidas entre si e atraídas por corpos de materiais comuns. Esse fluido foi determinado como calórico, na qual foi cunhada a teoria do calórico, proferia que dependendo da quantidade retirada ou inserida nos corpos, este poderia mudar de estado (sólido, líquido e gasoso) (ORNELLAS, 2006).

Nas fundamentações teóricas do calórico, a quantidade física de calor conservava-se. Nas observações realizadas com as experiências, a quantidade de calor como era definido, permanecia constante dentro do sistema. A teoria do calórico perdurou até o fim do século XIX, onde foram necessárias diversas suposições, que por fim levaram a diferentes contradições, possibilitando a introdução do conceito de energia (MOREIRA, 1998).

A partir disso no século XIX, foi estabelecida a conservação de energia através da formulação do conceito de “energia interna”, possibilitando o surgimento da Termodinâmica, abrangendo as áreas da mecânica e do estudo de calor. Dessa forma, surgiu a primeira lei da Termodinâmica, onde a energia presente em um sistema pode ser armazenada ou transferida da forma de trabalho ou calor (BUCUSSI, 2006).

Pouco tempo depois, através da formulação do paradoxo da reversibilidade, foi elaborada a segunda lei, conhecida como entropia. Essa lei diz que em um sistema natural, através do tempo, buscará o equilíbrio térmico, onde a entropia só pode aumentar ou se manter constante. Poucos anos depois foi elaborada a terceira lei da Termodinâmica, onde foi proposto que não existe a possibilidade de um corpo atingir a temperatura do zero absoluto (BURHEIM, 2017).

O conceito físico de energia é debatido entre os cientistas até os dias atuais. As definições disponíveis ainda não são completamente satisfatórias, podendo variar de “capacidade de trabalho” a “um número”. Aristóteles, cerca de 300 anos antes de Cristo, relacionava a palavra energia como “capacidade de fazer trabalho”, porém com o avanço da ciência, entrou em contradição com a lei da conservação de energia. Usualmente se define energia sendo um conceito da física como medida quantitativa (MEHLING, 2019).

Energia é um conceito abstrato adotado pelos físicos a partir do século XIX, sendo dificilmente definível e não sendo algo único. Utilizado para definir fenômenos naturais e antropogênicos, podem ser encontradas em diferentes formas como: o calor (energia térmica), movimento (energia cinética ou mecânica), luz (energia eletromagnética) e energia química presente em alimentos e combustíveis (SMIL, 2017).

A conversão de energia é uma característica física fundamental que está presente na natureza e em nossas vidas, tais como na fotossíntese (energia eletromagnética em energia química), que pode se transformar em um fóssil e posteriormente se converter em energia cinética de uma turbina (energia química em energia elétrica). A energia eletromagnética que o planeta terra recebe diariamente, impulsiona os ventos, participa do ciclo da água e da fotossíntese. Parte dessa energia é refletida de volta para o espaço e parte é absorvida, sendo necessário um equilíbrio para que o planeta não aqueça ou esfrie demais. Outra característica da energia é sua capacidade de conservação, sendo que na natureza ela não pode ser criada e nem destruída, apenas transformada de uma forma em outra (KOSKY et al., 2021).

### **2.3.3. Fluxos de energia**

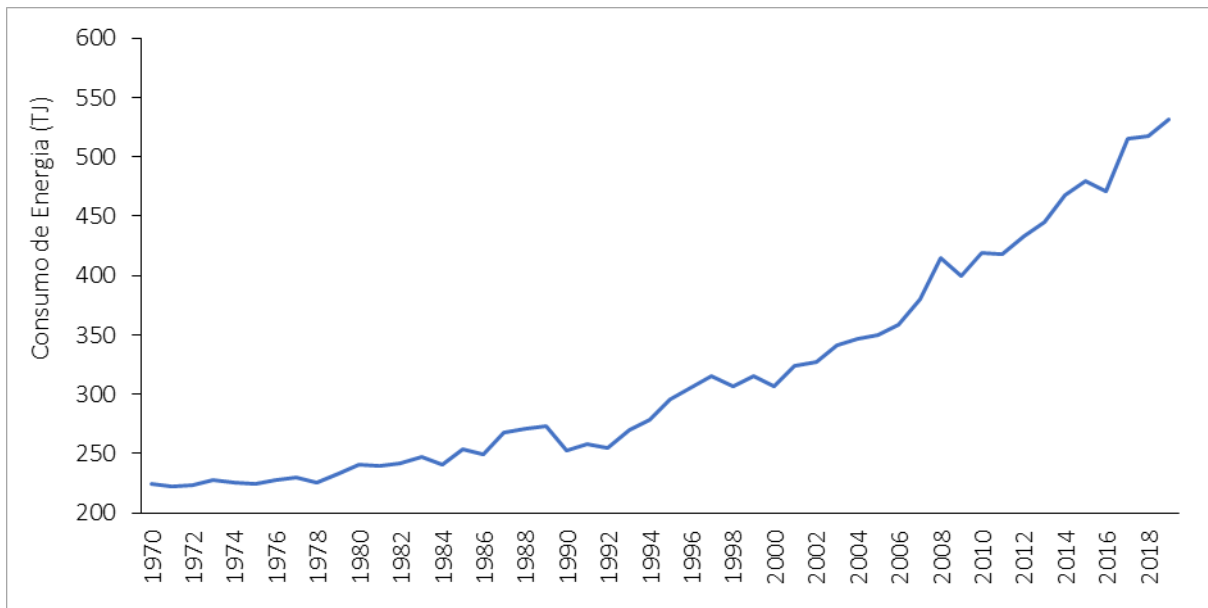
Tendo como princípio a primeira lei da termodinâmica, em que a matéria não é criada nem destruída, um processo de transformação física, como um processo produtivo, fornece a base lógica para a contabilidade quantitativa de entradas e saídas de matéria ou energia de um sistema. Uma ferramenta que permite identificar a transformação de matéria de suas origens ao produto, é o fluxo de materiais (EUROSTAT, 2001).

O fluxo de materiais representa um fator direto de influência no uso de energia e matérias primas, pois apresenta o caminho da transformação dos recursos durante o processo produtivo. Dessa forma, por ser uma ferramenta descritiva e analítica, possibilita o entendimento das relações bióticas e abióticas durante os processos presentes em uma cadeia de produção. Esta análise tem o enfoque voltado para as relações entre as atividades humanas e o ambiente (MARTÍNEZ; EBENHACK; WAGNER, 2019).

Sendo assim, as entradas representam os recursos destinados as demandas sistema, fornecendo os meios para produzir as saídas, que são o produto resultante do processo produtivo. Com isso, é possível quantificar as entradas e saídas através da grandeza física de energia (Joules), permitindo fazer o uso de indicadores que possibilitam, por meio de comparação, identificar sistemas eficientes onde a redução das demandas não afete a quantidade do produto do sistema (BERTILSSON; KIRCHMANN; BERGSTRÖM, 2008).

### **2.3.4. Demanda energética pela agricultura**

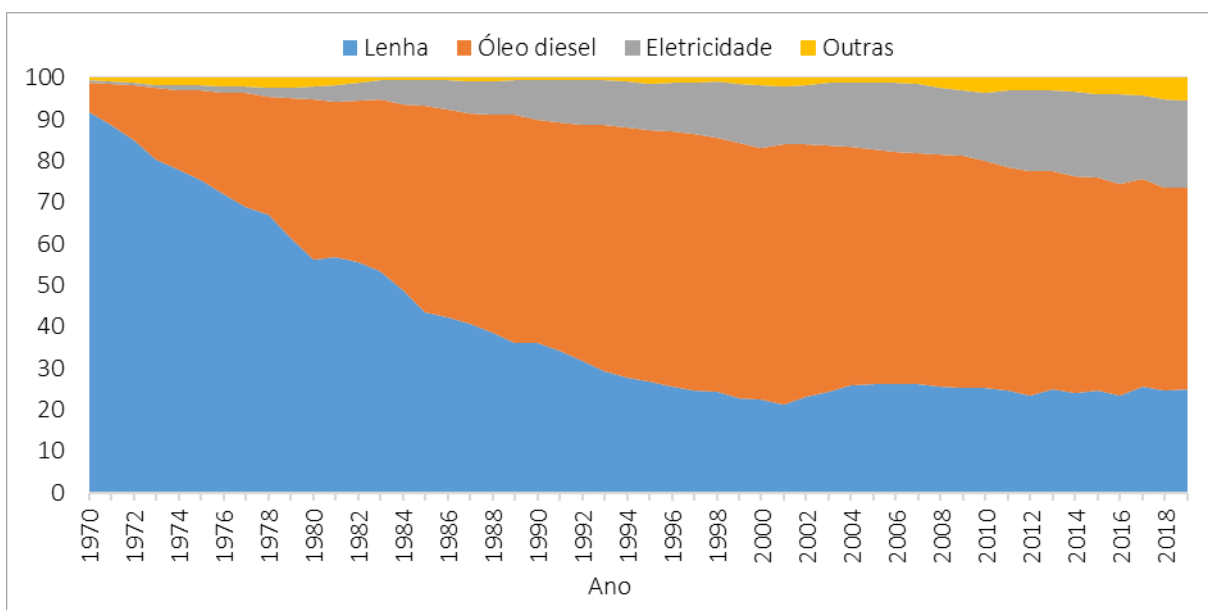
O consumo de energia pelo setor agropecuário não é muito expressivo quando comparado com os demais setores. No Brasil, em 2019, a agricultura foi a sétima colocada entre os setores que mais consumiram energia no país, sendo responsável por apenas 4% do total. O setor de transportes ficou em primeiro lugar (28,9%), seguido do setor industrial (27%) e energético (10%) (EPE, 2020). Porém, ao longo do tempo, o consumo de energia pelo setor agropecuário apresentou um grande crescimento (Figura 9). De 1970 até 2019 aumentou 2,3 vezes, partindo de 224 para 532 Terajoules (TJ), sendo o crescimento mais notável a partir da década de 1990 (EPE, 2021).



**Figura 9.** Série histórica do consumo de energia pelo setor agropecuário no Brasil.

Fonte: EPE (2021).

A Figura 10 mostra o percentual por fonte de energia ao longo do tempo para o setor agropecuário no Brasil. Na década de 1970 o uso de lenha correspondeu por mais de 90% da demanda total, sendo substituída pelo óleo diesel utilizado nas máquinas agrícolas. Em 2019 as principais fontes de energia consumidas foram o óleo diesel (48%), a lenha (25%) e a eletricidade (21%), as outras fontes de energia contabilizadas são pouco expressivas (6%), correspondendo pelo biodiesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo, querosene, carvão vegetal e álcool hidratado para aviões.



**Figura 10.** Composição do consumo de energia pelo setor agropecuário no Brasil.

Fonte: EPE (2021).

Entretanto, estes levantamentos avaliam apenas algumas fontes de energia, desconsiderando a energia incorporada em insumos como fertilizantes, defensivos e depreciação de máquinas e implementos proporcionados pelos avanços tecnológicos, tornando o setor altamente dependente de energia (CONFORTI; GIAMPIETRO, 1997; PHILLIPS et al., 1980). Em diferentes culturas no Brasil, o óleo diesel foi a segunda maior demanda de energia, correspondendo por aproximadamente um terço do consumo total, atrás apenas dos fertilizantes (VEIGA et al., 2015).

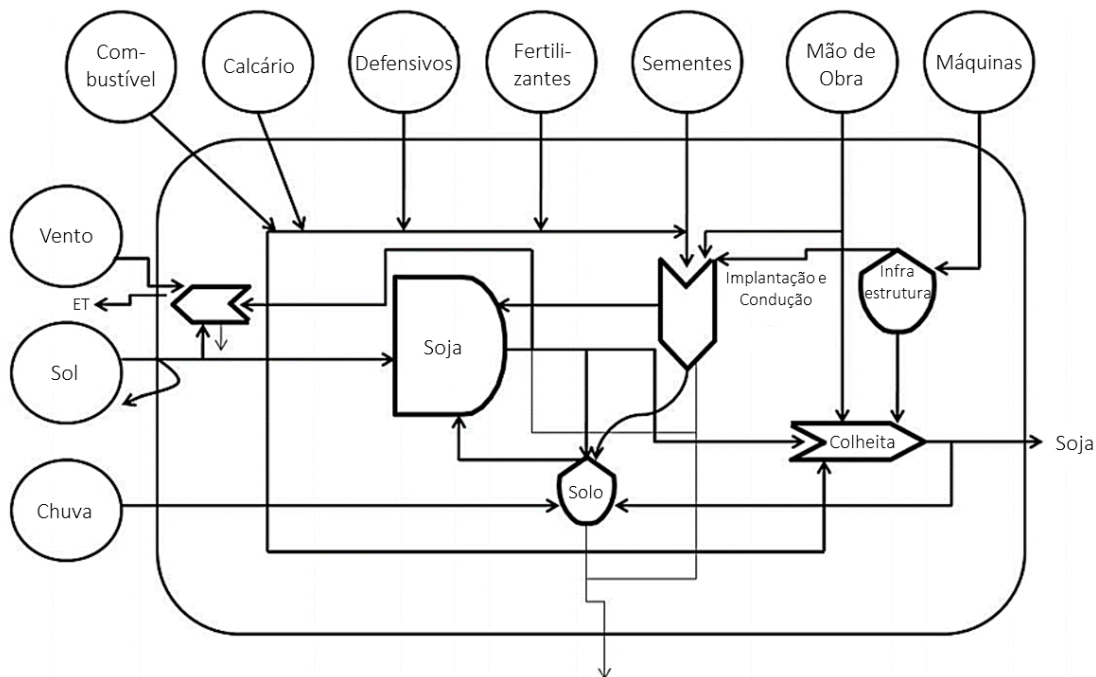
Dessa forma, determinar sistemas de produção mais eficientes, onde a demanda de energia é menor, se faz necessário para reduzir, por exemplo, o consumo de combustíveis fósseis. Sørensen e Nielsen (2005) identificaram que em preparos de solo reduzido houve menor demanda de energia, entre 18-53%, quando comparado com o preparo de solo convencional.

### **2.3.5. Demanda energética na cultura da soja**

O cultivo da soja envolve diferentes recursos para a obtenção do produto comercializável. As transformações ocorrem durante o ciclo da cultura, na qual são realizadas operações, em sua maioria mecânicas, que visam proporcionar as melhores condições ambientais, com o intuito da cultura desempenhar seu maior potencial produtivo, garantindo maior retorno.

A Figura 11 apresenta as diferentes interações energéticas necessárias durante o cultivo. São necessários recursos naturais e antrópicos para o plantio, manutenção e colheita da cultura. As máquinas, mão de obra e combustíveis permitem a distribuição do calcário, fertilizantes, sementes e agroquímicos, enquanto o sol, vento e chuva garantem para a planta realizar os processos fisiológicos. Entretanto, parte da energia introduzida no sistema não é utilizada pela cultura. O calor gerado pelo motor das máquinas, fertilizantes que não são absorvidos, deriva de agroquímicos, por exemplo.





**Figura 11.** Representação do sistema de produção de soja.

Fonte: Adaptado de ROMANELLI et al. (2012).

Desconsiderando os recursos naturais por serem renováveis, ANDREA et al. (2016) realizaram um levantamento do fluxo de energia na produção de soja em diferentes estados do Brasil. Os sistemas de produção apresentaram viabilidade energética, fornecendo mais energia no produto do que fora incorporado. Os principais insumos que demandaram mais energia para os sistemas foram o diesel, fertilizantes, sementes e herbicidas. Dessa forma, a produção é altamente dependente de fontes de energia fósseis e industrializadas. Porém, não se levou em consideração a variabilidade temporal.

Entretanto, a variação do sistema de produção, bem como algumas variáveis ocasionais, pode alterar a demanda por insumos. ROMANELLI et al. (2012) identificaram que a produção de soja OGM (Organismo Geneticamente Modificado) quando comparado com a convencional, obteve menor demanda energética por necessitar de menos insumos.

### 2.3.6. Demanda energética na cultura do milho

Assim como para a cultura da soja, o sistema de produção do milho tem como base o uso de diferentes recursos, que podem ser naturais ou não. O sistema de produção de milho, onde recursos naturais e renováveis como a chuva, sol e vento e os estoques de solo e máquinas, fornecem a base para a introdução de produtos comerciais como combustíveis, calcário, sementes, fertilizantes, agroquímicos e mão de obra dentro do sistema, permitindo que a cultura se estabeleça e desempenhe seu maior potencial. As perdas no processo são inevitáveis, como a mineralização de nutrientes ou calor gerado pelos motores a combustão.

VEIGA et al., (2015) constataram em seu estudo que o cultivo de milho demandou do total 56% de energia com fertilizantes, 26% com defensivos químicos e 13% de diesel. CAMPOS et al., (2004) verificou que os fertilizantes foram responsáveis por 50%, os defensivos 18% e as sementes 18% do total de energia dispendida no sistema.

A intensificação no processo produtivo promove menor eficiência energética em sistemas de produção de milho. O elevado uso de fertilizantes nitrogenados apresenta grande parte da energia de entrada na produção de híbridos OGM e convencional. O sistema de produção de milho orgânico apresentou maior eficiência no uso de energia de fontes não renováveis, indicando maior sustentabilidade durante o processo produtivo (CAPELLESSO; CAZELLA, 2013).

No sistema de produção de milho para silagem em plantio direto, ZANINI et al., (2003) identificou que o responsável pela maior demanda de energia para o sistema foi o óleo diesel (47%), seguido dos defensivos (25%) e fertilizantes químicos (11%). Para SANTOS et al., (2011), o sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, propiciaram maior eficiência energética quando comparado com a monocultura.

### **2.3.7. Índices de energia**

#### **2.3.7.1. Fertilizantes e corretivos**

A energia necessária para a produção de fertilizantes nitrogenados varia de acordo com a planta industrial e a matéria prima para produção (amônia, ácido nítrico ou dióxido de carbono). Por exemplo, a maior parte da amônia é produzida através do processo de Haber-Bosch, em que nos últimos 80 anos passou por melhorias, requerendo menores quantidades de energia. Sendo assim, dependendo da indústria, a demanda por energia será variável. Além do consumo para a produção da matéria prima, os fertilizantes passam por processos de partículação, granulação, compressão, purificação, embalagem, transporte, entre outros (PATZEK, 2004).

O consumo de energia para produção de fertilizantes fosfatados apresenta maiores complicações, pois grande parte do consumo total é para a extração da matéria prima em rochas de fosfato ou enxofre, utilizado para produção de ácido sulfúrico, necessário para a conversão da rocha em ácido fosfórico e superfosfato. O potássio não necessita de processamento químico, a energia necessária para a produção é toda para a extração, podendo haver variações relacionadas com a profundidade. Sendo assim, o transporte também apresenta variações, porém compõem a menor parte da demanda energética (LOCKERETS, 1980).

A energia envolvida na produção de calcário se assemelha a de potássio, a maioria das operações são realizadas na pedreira, posteriormente é realizado a trituração, peneiramento e esmagamento (TERHUNE, 1980).

#### **2.3.7.2. Sementes**

Diferentes formas de estimar a energia em sementes e propágulos foram analisadas com o intuito de se aproximar do valor real. A estimativa através da entalpia ou da energia digestível da semente foi descartada

por não considerar os fatores produtivos. Em casos que a semente utilizada é a mesma da colheita, como o caso do milho variedade, pode-se subtrair a quantidade necessária para o plantio da produção. Devido à falta de dados a respeito do fluxo de materiais do processo de produção de sementes, a melhor estimativa deu-se através da transformação do custo monetário das sementes para produção, processamento, embalagem e distribuição em custo energético (HEICHEL, 1980).

### **2.3.7.3. Defensivos**

Os ingredientes ativos dos defensivos agrícolas, utilizam para sua fabricação calor, eletricidade e combustíveis que compõem os hidrocarbonetos, na qual variam as quantidades de energia necessárias dependendo ingrediente ativo e do processo de fabricação. Sendo assim, além da energia para a produção, contabiliza-se o gasto com a embalagem e o transporte (PIMENTEL, 1980).

### **2.3.7.4. Diesel**

Após a expansão no uso de máquinas e implementos na agricultura, o óleo diesel como forma de combustível se tornou um insumo essencial para a produção agrícola moderna, representando uma das maiores demandas de energia nos sistemas de produção. O diesel é um derivado do petróleo, sendo necessário a extração do óleo cru e posteriormente o refino ou destilação fracionada. Sua composição consiste em hidrocarbonetos e compostos orgânicos como nitrogênio, oxigênio e enxofre. Além do poder calorífico, utilizado para movimentar os motores a combustão, o processo de produção e transporte é contabilizado no índice (CERVINKA, 1980).

### **2.3.7.5. Mão de obra**

A força humana pode realizar todas as operações exigidas na agricultura, porém o resultado da produção seria suficiente apenas para sustentar a família do trabalhador, não havendo excedentes para negociação em troca de bens e serviços. Através da mecanização, o trabalho humano foi substituído pelo mecânico, possibilitando produção excedente, melhorando a condição de vida do trabalhador. Dessa forma, o cálculo do dispêndio de energia com mão de obra é realizado através consumo energético necessário para o trabalho (PIMENTEL; PIMENTEL, 2007b).

### **2.3.7.6. Depreciação de máquinas e implementos**

Máquinas e implementos necessitam de diferentes matérias primas para sua fabricação, sendo necessário diferentes tipos de metais, borrachas, fibras, entre outros materiais para sua construção, além de infraestrutura, energia elétrica e mão de obra. Para estimar a quantidade de energia necessária para a obtenção

da matéria prima, manufatura e manutenção de máquinas e implementos, são utilizados valores médios de indústrias e de fabricantes. Com isso, estima-se a quantidade de energia através da massa que compõe as máquinas e os implementos (MANTOAM et al., 2020; MANTOAM; ROMANELLI; GIMENEZ, 2016).

#### **2.3.7.7. Irrigação**

O sistema de irrigação, é composto por diferentes materiais como tubos, mangueiras, aspersores, bomba, entre outros, na qual necessita de energia para pressurizar o sistema e colocá-lo em funcionamento. Dessa forma, a demanda de energia necessária para o sistema de irrigação, refere-se à depreciação dos materiais e a energia necessária para a pressurização do sistema. O fator que indica a quantidade de energia necessária é a lamina de água, quanto maior for a necessidade de irrigação, maior será a depreciação dos materiais e de energia necessária para funcionar o sistema (DIOTTO; IRMAK, 2016).



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o levantamento do histórico e determinação do fluxo de energia e dos indicadores energéticos, foi necessária a obtenção dos dados do sistema de cultivo para a elaboração do fluxo de materiais e energético. A partir disso, foram determinados os insumos direta e indiretamente aplicados, bem como a capacidade de campo operacional, consumo de combustível, depreciação de máquinas e mão de obra necessária. Com isso, os indicadores de balanço energético (BE), retorno sobre investimento energético (EROI) e o índice de energia incorporada (EI) foram calculados.

#### 3.1. Limites do sistema e fonte de dados

Para realizar o fluxo de materiais, de forma que possa haver comparação entre diferentes sistemas estudados, é necessário delimitá-lo (ROMANELLI; MILAN, 2010). As atividades agrícolas podem ser compreendidas em três diferentes segmentos, sendo elas: 1) “antes da porteira”: compreende os insumos e serviços utilizados na produção rural (exemplo: sementes, defensivos, máquinas, fertilizantes); 2) “dentro da porteira”: são as atividades realizadas destinadas a produção agropecuária (exemplo: tratos culturais, preparo e manejo de solo, colheita); 3) “Depois da porteira”: abrange as atividades realizadas após a produção (exemplo: transporte, armazenagem, industrialização) (BATALHA, 2001). Dessa forma, o escopo do estudo foi delimitado priorizando o segmento “dentro da porteira”, onde ocorre de fato a produção agrícola, possibilitando a identificação das técnicas produtivas mais sustentáveis.

Esse estudo se concentrou na produção de soja e milho devido a importância comercial nacional. De acordo com o levantamento histórico da CONAB (2021), os estados brasileiros que apresentaram as maiores produções entre os anos de 2010 e 2020 para soja foram: Mato Grosso (MT), Paraná (PR) Rio Grande do Sul (RS) e Goiás (GO); para o milho: Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC); e para o milho de segunda safra: Mato Grosso (MT), Paraná (PR), Goiás (GO) e Mato Grosso do Sul (MS). Dessa forma, a partir Anuário da Agricultura Brasileira, extraiu-se os dados referentes ao processo de produção de cada cultura referente as safras de 2009/10 a 2019/20 (IEG FNP, 2020).

O Anuário da Agricultura Brasileira fornece informações referentes ao custo de produção das principais culturas cultivadas no Brasil, seu intuito é auxiliar o produtor na tomada de decisão. Os dados do anuário são coletados diariamente por meio da própria equipe, por meio de levantamentos do mercado agrícola e de fontes secundárias nacionais como IEA e CONAB. São apresentadas tabelas que informam o custo de produção (Figura 12), com dados quantitativos detalhados referentes as operações e insumos necessários para a produção em um hectare para diferentes culturas nas principais regiões produtoras. Com isso, o extenso banco de dados fornece as informações do fluxo de materiais necessário para realização do balanço energético ao longo do tempo (IEG FNP, 2020).

Soja - Custo de Produção (R\$/ha) - 2019/20							
DESCRIÇÃO	ESPECIFICAÇÃO	3.300			3.300		
		V.U.	Qtde.	Valor	V.U.	Qtde.	Valor
<b>A - OPERAÇÕES</b>							
A.1. Conservação do solo							
Manutenção de terraços	HMTP 4x4 125cv + Terraceador de Arrasto 18 discos	172,29	0,10	17,23	172,29	0,10	17,23
A.2. Preparo do solo							
Calagem	HMTP 4x4 125cv + Distribuidor Calcário 2,3m <sup>3</sup>	154,01	0,12	18,48	154,01	0,12	18,48
Serviço braçal	HH trabalhador braçal	7,65	0,10	0,76	7,65	0,10	0,76
Transportes internos	HM Caminhão Toco	146,97	0,10	14,70	146,97	0,10	14,70
A.3. Plantio							
Plantio	HMTP 4x4 185cv + Plantadeira 15 linhas x 17cm	343,28	0,18	61,79	343,28	0,18	61,79
Tratamento de sementes	Tratamento de Sementes	15,14	0,10	1,51	15,14	0,10	1,51
Serviço braçal	HH trabalhador braçal	7,65	0,15	1,15	7,65	0,15	1,15
Transportes internos	HM Caminhão Toco	146,97	0,15	22,05	146,97	0,15	22,05
A.4. Tratos culturais							
Aplicação de defensivos	Pulverizador Automotriz 3000l	245,06	0,45	110,28	245,06	0,40	98,03
Combate à formigas/cupins	HH trabalhador braçal	7,65	0,15	1,15	7,65	0,15	1,15
Serviço braçal	HH trabalhador braçal	7,65	0,30	2,29	7,65	0,20	1,53
Transportes internos	HM Caminhão Toco	146,97	0,15	22,05	146,97	0,15	22,05
A.5. Colheita							
Colheita mecânica	Colhedora de grãos 350cv	521,13	0,40	208,45	521,13	0,40	208,45
Serviço braçal	HH trabalhador braçal	7,65	0,20	1,53	7,65	0,20	1,53
Transportes internos	HM Caminhão Toco	146,97	0,18	26,45	146,97	0,18	26,45
<b>Subtotal A</b>				<b>509,87</b>			<b>496,85</b>
<b>B - INSUMOS</b>							
B.1. Fertilizantes/Corretivos				762,00			762,00
Calcário dolomítico	R\$/tonelada	150,00	0,60	90,00	150,00	0,60	90,00
00-20-20 + Micronutriente	R\$/tonelada	1.680,00	0,40	672,00	1.680,00	0,40	672,00
B.2. Sementes/Mat. plantio				271,20			265,20
Semente	R\$/kg	3,97	50,00	198,50	3,85	50,00	192,50
Inoculante + micronutrientes	R\$/dose	2,70	1,00	2,70	2,70	1,00	2,70
Tratamento de sementes industrial	R\$/kg de semente	1,40	50,00	70,00	1,40	50,00	70,00
B.3. Defensivos agrícolas				528,96			429,05
Formicidas	R\$/kg	15,20	0,20	3,04	15,20	0,20	3,04
Fungicidas	R\$/litro	215,85	0,70	151,10	215,85	0,70	151,10
Herbicidas	R\$/litro/kg	18,53	8,12	150,47	18,81	3,56	66,97
Inseticidas	R\$/litro/kg	202,22	0,84	169,87	197,59	0,71	139,30
Outros produtos químicos	R\$/litro	13,62	4,00	54,48	13,73	5,00	68,65
<b>Subtotal B</b>				<b>1.562,16</b>			<b>1.456,25</b>
<b>Tecnologia</b>				<b>Convencional</b>			<b>Transgênico</b>
<b>Região de referência</b>				<b>MT (módulo 1.500 ha)</b>			

Figura 12. Representação do custo de produção do AGRUANUAL.

Fonte: Adaptado de IEG FNP (2020).

A partir disso, a Figura 13 apresenta por meio de um fluxograma os limites nos sistemas utilizados nesse estudo, bem como a sequência de cálculos. As operações mecanizadas e os insumos utilizados, foram diferenciados em duas categorias, sendo a primeira: A. operações (A.1. conservação do solo, A.2. preparo do solo, A.3. semeadura, A.4. tratos culturais e A.5. colheita) e a segunda: B. insumos (B.1 fertilizantes e corretivos, B.2. sementes e material de plantio e B.3. defensivos agrícolas). Dentre as operações, o dispêndio de energia se dá por meio da depreciação de máquinas e implementos (DM), consumo de combustível (Cc) e mão de obra (MO), sendo que seu somatório resultou nas entradas de energia indiretas (EEi), logo, a soma da energia incorporada nos insumos, resultou nas entradas de energia direta (EEd).

A soma das energias diretas e indiretas, resultam na energia de entrada (EE), proporcionando o estabelecimento e desenvolvimento da cultura. Baseado na produtividade (Prod) é determinada a energia de saída (ES), sendo a energia incorporada no produto comercializável. Por meio da produtividade, e das entradas e saídas de energia, é possível obter indicadores como a incorporação de energia (EI), retorno sobre o investimento (EROI) e o balanço energético (BE).

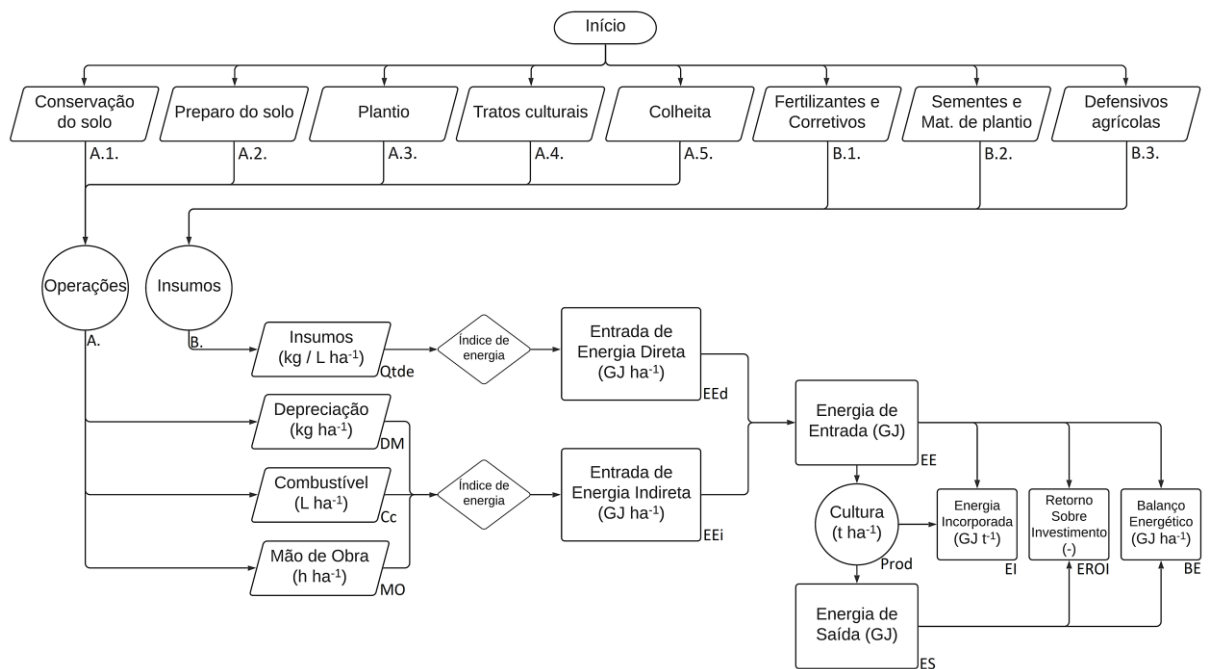


Figura 13. Fluxograma utilizado para os sistemas de produção soja e milho.

### 3.2. Energia de entrada direta e indireta

No sistema agrícola moderno, onde as ações antrópicas estão presentes, as energias de entrada podem ser subdivididas em diretas e indiretas. A energia diretamente aplicada, diz respeito aos insumos que incorporados ao sistema produtivo tal como fertilizante, corretivo, sementes, defensivos entre outros produtos químicos. Enquanto a energia indiretamente aplicada refere-se aos bens e serviços que permitem a utilização dos insumos como a depreciação das máquinas, o combustível e a mão de obra requerida para o processo de produção (ROMANELLI; NARDI; SAAD, 2012).

Alguns autores classificam o consumo de combustíveis e a mão de obra como energia direta e os insumos como energia indireta, abordando a ideia de consumo, uma vez que operações e serviços são realizados e os insumos são consumidos. Porém a abordagem desse estudo visa a ideia de que os insumos são incorporados de forma direta ao sistema e os produtos e serviços são as ferramentas efetivas, onde não há incorporação (DELEAGE et al., 1979; ROMANELLI; MILAN, 2010).

#### 3.2.1. Estimativa da energia de entrada direta

Os insumos diretamente aplicados como fertilizantes, defensivos agrícolas, corretivos e sementes são determinadas através de fatores agrônômicos, como por exemplo análise de solo, presença de pragas e doenças, entre outros. Para a determinação da quantidade de energia, utiliza-se os índices energéticos para cada insumo utilizado durante o processo de produção. Esses índices são utilizados de acordo com as referências presentes na literatura, na qual se calculou a energia contida no produto, bem como para produção e transporte (Tabela 1).



**Tabela 1.** Índices de energia para insumos diretamente aplicados.

Entrada	Índice de energia (MJ kg <sup>-1</sup> )	Referências
N	66,98	PATZEK (2004)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17,39	LOCKERETS (1980)
K <sub>2</sub> O	13,64	LOCKERETS (1980)
Calcário	1,17	TERHUNE (1980)
Semente soja	31,75	HEICHEL (1980)
Sementes milho	103,96	HEICHEL (1980)
Formicida	311,08	PIMENTEL (1980)
Herbicidas	418,68	PIMENTEL & PATZEK (2005)
Inseticidas	310,35	SHEEHAN et al. (2000)
Fungicidas	271,77	PIMENTEL (1980)
Outros	205,24	PIMENTEL (1980)
Grão de soja	16,83	PIMENTEL (1980)
Grão de milho	14,58	PIMENTEL (1980)

De acordo com as quantidades necessária para o processo de produção em um hectare, foi calculado o somatório dos insumos, multiplicado pelo respectivo índice em Mega Joules (Equação 1), resultando na entrada de energia direta.

$$EEd = \sum_{i=1}^I (Qtde * índice)_i \quad (1)$$

Em que:

EEd = Energia de Entrada Direta (MJ ha<sup>-1</sup>);

Qtde = Quantidade do i-ésimo insumo aplicado (kg ha<sup>-1</sup> ou L ha<sup>-1</sup>);

Índice = Energia incorporada no i-ésimo insumo aplicado (MJ unidade<sup>-1</sup>).

### 3.2.2. Estimativa da entrada de energia indireta

A estimativa para a energia indiretamente aplicada é realizada através de uma sequência de equações que determinam a depreciação física das máquinas e implementos, o tempo de mão de obra, a quantidade de combustíveis necessários para um hectare e da irrigação. Os índices de energia (Tabela 2) representam a quantidade de energia despendida em cada unidade.

**Tabela 2.** Índices para energia indiretamente aplicada.

Entrada	Unidade	Índice de energia (MJ unidade <sup>-1</sup> )	Referências
Diesel	L	47,73	PIMENTEL & PATZEK (2005)
Mão de obra	h	2,46	PIMENTEL & PIMENTEL (2007b)
Depreciação de máquinas e implementos	kg	76,10	MANTOAM; ROMANELLI; GIMENEZ (2016)
Irrigação	mm	54,50	DIOTTO & IRMAK (2016)

Por meio da soma da energia dispendida durante as operações, obtém-se as entradas de energia indireta (Equação 2).

$$EEi = DM + Cc + MO + Ir \quad (2)$$

Em que:

EEi = Energia de Entrada Indireta (MJ ha<sup>-1</sup>);

DM = Depreciação de máquinas e implementos (MJ ha<sup>-1</sup>);

Cc = Consumo de combustível (MJ ha<sup>-1</sup>);

MO = mão de obra (MJ ha<sup>-1</sup>);

Ir = Irrigação (MJ ha<sup>-1</sup>).

A determinação de gasto energético em operações, necessita de da relação entre a área e o tempo necessário para a operação. Dessa forma, é utilizada a Capacidade de campo Operacional (CcO) (Equação 3).

$$CcO = \frac{At}{TO} \quad (3)$$

Em que:

CcO = Capacidade de campo Operacional (ha h<sup>-1</sup>);

At = área de trabalho (ha);

TO = Tempo da operação (h).

### 3.2.2.1. Determinação da depreciação de máquinas e implementos agrícolas

Para determinar a depreciação energética das máquinas e implementos, utiliza-se a vida útil e a massa. Com isso, as máquinas e implementos são depreciados conforme seu uso nas operações realizadas. O período de vida útil segue o mesmo critério econômico, em que os tratores possuem aproximadamente 12000 h, podendo variar de acordo com a manutenção realizada. Os implementos por sofrerem maior desgaste com a operação, possuem vida útil menor, sendo de 2000 h (ROMANELLI; MILAN, 2012).

A depreciação através da massa, não representa perda de massa durante a operação, sendo um indicador físico. No final da vida útil o mesmo deverá ser substituído, sendo necessário obter os recursos (minério de ferro, carvão, petróleo) no ambiente para a produção de uma nova máquina ou implemento.

Dessa forma, através da massa e vida útil, é possível calcular a depreciação física das máquinas e implementos representados por  $\text{kg ha}^{-1}$  e a estimativa energética da depreciação através da multiplicação pelo índice. Para a obtenção da energia durante a produção em um hectare, realiza-se a divisão pela Capacidade de Campo Operacional. O somatório de todas as operações, resulta na depreciação de máquinas e implementos (Equação 4). A massa das máquinas e implementos e a potência dos motores foram obtidos por meio dos principais fabricantes no Brasil.

$$DM = \sum_{i=1}^I \frac{[(\frac{Mtr}{VUtr} + \frac{Mimp}{VUimp}) \text{índice}_{MAQ}]_i}{CcO_i} \quad (4)$$

Em que:

DM = Depreciação de máquinas e implementos ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

Mtr = Massa da máquina (kg);

Mimp = Massa do implemento (kg);

VUtr = Vida útil trator (h);

VUimp = Vida útil do implemento (h);

Índice<sub>MAQ</sub> = Energia incorporada nas máquinas agrícolas ( $\text{MJ kg}^{-1}$ );

CcO = Capacidade de Campo Operacional ( $\text{ha h}^{-1}$ ).

### 3.2.2.2. Determinação do consumo de combustível

O desempenho energético em uma operação mecanizada varia de acordo com as condições de trabalho. Um dos fatores que possui maior impacto no consumo de combustível, é a potência do motor, que varia de acordo com a necessidade operacional. A velocidade de deslocamento, carga tracionada e condições do solo também são fatores que alteram o consumo de combustível em uma máquina agrícola (GABRIEL FILHO et al., 2010).

A determinação de consumo de combustível em um hectare, é possível através da estimativa da demanda de diesel relacionando a potência do motor em cv e o consumo específico (ROMANELLI; MILAN, 2010). Dessa forma, por meio da multiplicação pelo índice e divisão pela Capacidade de Campo Operacional, obtém-se o consumo de combustível necessário para a operação (Equação 5).

$$Cc = \sum_{i=1}^I \frac{[(Pot * Ce) \text{índice}_{CB}]_i}{CcO_i} \quad (5)$$

Em que:

$C_c$  = Consumo de Combustível ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

Pot = Potência do motor (kW);

$C_e$  = Consumo específico ( $0,167 \text{ L kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ );

$C_{cO}$  = Capacidade de Campo Operacional ( $\text{ha h}^{-1}$ );

$\text{Índice}_{CB}$  = Energia incorporada nos combustíveis ( $\text{MJ L}^{-1}$ ).

### 3.2.2.3. Determinação da mão de obra

Para realização das operações mecanizadas é necessário o trabalho humano, seja para operar a máquina agrícola ou para fornecer apoio ao operador. A estimativa do gasto energético com a mão de obra é determinada por meio da divisão do índice de energia pela Capacidade de Campo Operacional (Equação 6). Dessa forma, o somatório refere-se a mão de obra necessária durante as operações.

$$MO = \sum_{i=1}^I \frac{\text{índice}_{MO_i}}{C_{cO_i}} \quad (6)$$

Em que:

MO = Mão de obra ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

$C_{cO}$  = Capacidade de Campo Operacional ( $\text{ha h}^{-1}$ );

$\text{Índice}_{MO}$  = Energia incorporada na mão-de-obra ( $\text{MJ h}^{-1}$ ).

### 3.2.2.4. Determinação da irrigação

A irrigação é determinada por meio da quantidade de água aplicada na cultura por meio do sistema de irrigação, multiplicado pelo índice de energia (Equação 7).

$$Ir = mm + \text{índice}_{IR} \quad (7)$$

Em que:

Ir = Energia de utilizada na irrigação ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

mm = Quantidade de água aplicada ( $\text{mm ha}^{-1}$ );

$\text{Índice}_{IR}$  = Energia incorporada na irrigação ( $\text{MJ mm}^{-1}$ ).

### 3.3. Energia de entrada e saída

A energia de entrada (EE) é o resultado de toda demanda do sistema, isto é, o somatório da energia empregada nas operações e nos insumos necessários durante o processo de produção. Essa energia é o resultado da soma da energia direta e indireta (Equação 8).

$$EE = EEd + EEi \quad (8)$$

Em que:

EE = Energia de Entrada ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

EEd = Energia de Entrada Direta ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

EEi = Energia de Entrada Indireta ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ).

A energia de saída (ES) refere-se ao produto comercializável gerado pelo processo produtivo, sendo o resultado das transformações ocasionadas pelas entradas. A energia de saída é determinada pelo índice energético do grão, multiplicado pela produtividade do sistema (Equação 9).

$$ES = Prod * \text{índice}_{GR\tilde{A}OI} \quad (9)$$

Em que:

ES = Energia de Saída ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

Prod = Produtividade da cultura ( $\text{kg ha}^{-1}$ );

Índice<sub>GRÃO</sub> = Energia disponível nos grãos ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ).

### 3.4. Indicadores de eficiência energética

Os indicadores são uma ferramenta de gestão que auxiliam a tomada de decisão, permitindo quantificar e indicar uma tendência. Dessa forma, permitem condensar as informações em um índice numérico (PATTERSON; JOLLANDS, 2004). Os indicadores de eficiência energética levam em consideração as entradas e saída de energia, bem como a produtividade do sistema. Com a necessidade de identificar a sustentabilidade na agricultura, os índices fornecem os parâmetros necessários para a comparação entre os diferentes processos produtivos na agricultura.

#### 3.4.1. Balanço energético (BE)

De acordo com as leis da termodinâmica, a energia de saída não pode ser maior ou igual a de entrada, pois se toda entrada for contabilizada, o aumento de entropia reduz sua disponibilidade. Entretanto, a energia solar para a fotossíntese, os nutrientes presentes no solo e os processos bióticos não são levados em consideração na energia de entrada, contabilizando apenas os processos antrópicos externos ao natural e

necessitam de sua inclusão ao sistema para gerar o resultado obtido (STOUT, 1990). O balanço energético expressa a diferença entre o fluxo de energia de saída e de entrada dentro do sistema (Equação 10).

$$BE = ES - EE \quad (10)$$

Em que:

BE = Balanço energético (MJ ha<sup>-1</sup>);

ES = Energia de saída (MJ ha<sup>-1</sup>);

EE = Energia de entrada (MJ ha<sup>-1</sup>).

### 3.4.2. Retorno sobre investimento (EROI)

A análise de retorno sobre o investimento (EROI) permite determinar a quantidade de energia excedente gerada através da energia de entrada do sistema. É calculado através da divisão entre a saída e a entrada de energia (Equação 11).

$$EROI = \frac{ES}{EE} \quad (11)$$

Sendo:

EROI = Retorno sobre investimento (adimensional);

ES = Energia de saída (MJ ha<sup>-1</sup>);

EE = Energia de entrada (MJ ha<sup>-1</sup>).

O resultado do EROI é adimensional, pois o numerador e o denominador são avaliados na mesma unidade. Por exemplo, o resultado pode ser 5:1 “cinco para um”, indicando que um determinado sistema gera 5 joules com o investimento de um (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009).

### 3.4.3. Energia Incorporada (EI)

A estimativa de energia total necessária para produzir uma unidade de massa é definida como energia incorporada (EI) ou intensidade energética (GUTOWSKI et al., 2013; HERENDEEN, 2004). Essa estimativa leva em consideração a energia despendida em toda cadeia de produtos e serviços necessários para o sistema produtivo analisado. Sendo assim, EI é a energia despendida pelo sistema para cada quilograma produzida (Equação 12).

$$EI = \frac{EE}{\frac{Prod}{1000}} \quad (12)$$

Sendo:

EI = Energia incorporada (MJ t<sup>-1</sup>);

EE = Energia de entrada (MJ ha<sup>-1</sup>);

Prod = Produtividade referente a cultura ( $\text{kg ha}^{-1}$ );

1000 = ajuste de unidade ( $\text{kg t}^{-1}$ ).

### 3.5. Planilhas de cálculos

Para o cálculo da entrada de energia direta, foi usado uma planilha (Figura 14), em que, a partir da equação 1, obteve-se a quantidade de energia (MJ) para os insumos (EEd.) e posteriormente para facilitar o entendimento, transformado GJ.

Soja MT - Fluxo de Energia - 2019/20						
	Convencional			Transgênico		
	Prod. 3300 $\text{kg ha}^{-1}$			Prod. 3300 $\text{kg ha}^{-1}$		
<b>B - INSUMOS</b>	Qtde		Entrada (MJ)	Qtde		Entrada (MJ)
<b>B.1. Fertilizantes/Corretivos</b>						
Calcário dolomítico	600,00	kg	705,90	600,00	kg	705,90
00-20-20 + Micronutriente	400,00	kg	2.482,40	400,00	kg	2.482,40
<b>Subtotal B.1</b>			<b>3.188,30</b>			<b>3.188,30</b>
<b>B.2. Sementes/Mat. plantio</b>						
Sementes	50,00	kg	1.587,60	50,00	kg	1.587,60
Inoculante + micronutrientes	0,001	kg	0,21	0,001	kg	0,21
Cobalto + Molibdênio	0,03	kg	1,96	0,03	kg	1,96
<b>Subtotal B.2</b>			<b>1.589,77</b>			<b>1.589,77</b>
<b>B.3. Defensivos agrícolas</b>						
Formicidas	0,20	kg	62,22	0,20	kg	62,22
Fungicidas	0,70	kg	190,24	0,70	kg	190,24
Herbicidas	8,12	kg	3.399,68	3,56	kg	1.490,50
Inseticidas	0,84	kg	260,69	0,71	kg	220,35
Outros produtos químicos	4,00	kg	820,96	5,00	kg	1.026,20
<b>Subtotal B.3</b>			<b>4.733,79</b>			<b>2.989,50</b>
<b>Entrada de Energia Direta (EEd)</b>	<b>GJ</b>		<b>9,51</b>	<b>GJ</b>		<b>7,77</b>

Figura 14. Modelo da planilha para Insumos.

A Figura 15 mostra a planilha de cálculos das Entradas de Energia Indireta para duas variedades de soja no estado do Mato Grosso para a safra 2019/20. Foi calculado a depreciação, o consumo de combustível e a mão de obra (Equação 3, 4 e 5 respectivamente), para cada operação realizada durante o processo de produção. Com isso, foi possível realizar o cálculo da entrada de energia indireta para cada variedade da cultura analisada.

Soja MT - Fluxo de Energia - 2019/20								
ESPECIFICAÇÃO	Convencional				Transgênico			
	Prod. 3300 kg ha <sup>-1</sup>				Prod. 3300 kg ha <sup>-1</sup>			
	Cco	Dep	MO	Comb	Cco	Dep	MO	Comb
<b>A - OPERAÇÕES</b>								
<b>A.1. Conservação do solo</b>								
HM TP 4x4 125cv + Terracedor de Arrasto 18 discos	10,00	0,16	0,10	1,50	10,00	0,16	0,10	1,50
<i>Subtotal A.1</i>		0,16	0,10	1,50		0,16	0,10	1,50
<b>A.2. Preparo do solo</b>								
HM TP 4x4 125cv + Distribuidor Calcário 2,3m <sup>3</sup>	8,33	0,15	0,12	1,80	8,33	0,15	0,12	1,80
HH trabalhador braçal	10,00		0,10		10,00		0,10	
HM Caminhão Toco	10,00	0,08	0,10	2,27	10,00	0,08	0,10	2,27
<i>Subtotal A.2</i>		0,23	0,32	4,07		0,23	0,32	4,07
<b>A.3. Plantio</b>								
HM TP 4x4 185cv + Plantadeira 15 linhas x 17 cm	5,56	0,61	0,18	4,00	5,56	0,61	0,18	4,00
Tratamento de Sementes	10,00		0,10		10,00		0,10	
HH trabalhador braçal	6,67		0,15		6,67		0,15	
HM Caminhão Toco	6,67	0,13	0,15	3,40	6,67	0,13	0,15	3,40
<i>Subtotal A.3</i>		0,73	0,58	7,40		0,73	0,58	7,40
<b>A.4. Tratos culturais</b>								
Pulverizador Automotriz 3000l	2,22	0,38	0,45	13,12	2,50	0,34	0,40	11,66
HH trabalhador braçal	6,67		0,15		6,67		0,15	
HH trabalhador braçal	3,33		0,30		5,00		0,20	
HM Caminhão Toco	6,67	0,13	0,15	3,40	6,67	0,13	0,15	3,40
<i>Subtotal A.4</i>		0,51	1,05	16,52		0,46	0,90	15,07
<b>A.5. Colheita</b>								
Colhedora de grãos 350cv	2,50	0,64	0,40	16,80	2,50	0,64	0,40	16,80
HH trabalhador braçal	5,00		0,20		5,00		0,20	
HM Caminhão Toco	5,56	0,15	0,18	4,08	5,56	0,15	0,18	4,08
<i>Subtotal A.5</i>		0,79	0,78	20,88		0,79	0,78	20,88
<b>Entrada de Energia Indireta (EEI)</b>	<b>GJ</b>	<b>0,18</b>	<b>0,01</b>	<b>2,40</b>	<b>GJ</b>	<b>0,18</b>	<b>0,01</b>	<b>2,33</b>

Figura 15. Modelo de planilha para Operações.

Após a determinação da energia nas operações e insumos, foram calculados para cada variedade as entradas de energia indireta e direta, as entradas e saídas de energia, bem como os indicadores do balanço energético, do retorno sobre o investimento e da incorporação de energia (Figura 16).

	Variedade	Safr	Estado	Produtividade	EEI	EED	EE	ES	Indicadores		
					kg ha <sup>-1</sup>	GJ ha <sup>-1</sup>			BE	EROI	EI
Soja	Convencional	2019/20	MT	3.300	2,59	9,51	12,11	55,54	43,43	4,59	3,67
Soja	Transgênico	2019/20	MT	3.300	2,52	7,77	10,29	55,44	45,15	5,39	3,12

Figura 16. Modelo de planilha para os indicadores energéticos.

### 3.6. Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Ryan-Joiner. Após verificar a normalidade, foi realizada a análise de variância (ANOVA) e o Modelo Linear Generalizado (MGL). Quando os dados apresentaram confiabilidade estatística ( $p < 0,05$ ), realizou-se a comparação de médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Os dados foram analisados através do Minitab® 20 Statistical Software (MINITAB, 2021).





## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram apresentados de forma independente para cada cultura. Foram realizadas comparações entre as variedades, os estados e as safras, avaliando as entradas, saída e os indicadores, com o intuito de identificar a eficiência e a sustentabilidade entre elas.

A Energia de Entrada Indireta (EEi) representada pela mão de obra, depreciação e consumo de combustível de máquinas e implementos, somada com a Energia de Entrada Direta (EEd), que é constituída pelos insumos, resultam nas Entradas de Energia (EE). A produtividade é o resultado das transformações bióticas e abióticas, sendo a energia de saída (ES), o conteúdo energético do produto. Com isso, os indicadores energéticos permitem agrupar as informações das entradas e saída, possibilitando quantificar e identificar os sistemas de produção mais eficientes.

### 4.1. Soja

A análise para a cultura da soja foi realizada para os tipos convencional e OGM, entre os estados de Goiás, Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul ao longo das safras de 2009/10 a 2019/20.

A Tabela 3 apresenta o teste de Tukey para a soja convencional e OGM, desconsiderando os estados e safras. Apenas a EEi apresentou diferença entre as médias ( $p < 0,05$ ), sendo que o sistema de cultivo com a soja convencional, resultou na maior demanda energética, quando comparada com a OGM. Entretanto, as médias para a EEd, EE, ES e para os indicadores não apresentaram diferença ( $p > 0,05$ ), entre os dois tipos de material genético.

**Tabela 3.** Comparação de indicadores na soja convencional e OGM.

Tipo	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )				(-)	(GJ t <sup>-1</sup> )	
Convencional	44	2,85 a	9,84 a	12,57 a	55,06 a	42,51 a	4,54 a	3,84 a
OGM	44	2,61 b	9,72 a	12,45 a	54,96 a	42,49 a	4,44 a	3,80 a
p-Valor		0,000	0,707	0,728	0,837	0,967	0,398	0,652

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

A EEi foi responsável por 23% para convencional e 21% para OGM, sendo que a maior parte das entradas de energia se devem aos insumos (EEd), que representaram 77 e 79% para convencional e OGM respectivamente. Com isso, o único indicador com diferença, foi a EEi por meio do consumo de combustíveis para os tratos culturais, sendo que a média da participação da mão de obra e depreciação, foi <1%, podendo ser desprezadas (ANDREA et al., 2014). O uso de tratores mais eficientes ou de menor potência, poderiam reduzir a demanda energética por combustíveis (ROMANELLI; MILAN, 2010).

ROMANELLI; NARDI; SAAD (2012) realizaram um estudo comparando os indicadores de energia da soja convencional e OGM (Organismo Geneticamente Modificado), em diferentes regiões do Brasil. Os insumos

utilizados na soja OGM foram menores quando comparados com a soja convencional. Para a maioria dos cenários, o EROI apresentou melhor desempenho em sistemas que utilizaram sementes OGM do que convencional.

A análise entre os estados (Tabela 4), não obteve diferença ( $p > 0,05$ ) apenas para os indicadores EROI e EI. As médias para o BE, mostraram que apenas o RS apresentou diferença entre os estados. O fator que contribuiu para esta diferença foi a ES, visto que a EE também apresentou as menores médias quando comparado com os demais estados. Por mais que o sistema de produção em GO tenha apresentado a ES inferior a MT e PR, a EE não diferiu dos demais estados, fazendo com que o BE tornasse semelhante aos demais.

**Tabela 4.** Comparação dos indicadores na soja entre os estados.

Estado	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )					(-)	(GJ t <sup>-1</sup> )
GO	22	2,37 b	10,00 a	12,37 ab	54,99 b	42,61 a	4,50 a	3,78 a
MT	22	2,48 b	10,63 a	13,11 a	56,77 a	43,67 a	4,49 a	3,86 a
PR	22	3,04 a	9,87 a	12,91 a	57,14 a	44,23 a	4,52 a	3,78 a
RS	22	3,03 a	8,63 b	11,66 b	51,13 c	39,48 b	4,46 a	3,85 a
p-Valor		0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,984	0,896

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

De modo geral, os maiores dispêndios de energia foram com os insumos, sendo os defensivos agrícolas, fertilizantes e corretivos os que apresentaram maior participação, fazendo com que a EEd demandasse mais energia. A diferença entre a demanda energética por insumos, altera o desempenho do processo produtivo em diferentes sistemas de cultivo de soja (PASHAEI KAMALI et al., 2017). Entre as operações, a maior demanda foi por combustível, devido aos tratos culturais e a colheita.

As maiores demandas energéticas, provem do uso de insumos como fertilizantes, defensivos e sementes, bem como os combustíveis (MOURAD; WALTER, 2011). A. PRADHAN et al. (2008) compararam diferentes estudos que apresentaram as entradas de energia para a produção de soja. Observou-se diferenças na necessidade de energia para a cultura, devido aos diferentes limites do sistema, aos valores de entrada e índices de energia assumidos nos estudos. Com isso, a comparação direta entre as entradas, saída e indicadores pode se tornar equivocada, tornando-se difícil a comparação.

A produtividade média entre 2000 e 2020 para o RS foi de 2,4 t ha<sup>-1</sup>, para as safras 2011/12 e 2019/20, foi de 1,5 e 1,9 t ha<sup>-1</sup>, abaixo da média deste período. Esta diferença deu-se, devido as condições meteorológicas, a deficiência hídrica e as altas temperaturas, somadas com a precipitação irregular durante os períodos críticos, fizeram com que a cultura não expressasse seu potencial produtivo (CARDOSO et al., 2020; COSTAMILAN, 2012).

A Tabela 5 apresenta a análise temporal para a cultura da soja, desconsiderando os dois tipos e os quatro estados. Com isso, todas as médias foram diferentes ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey. As maiores EE foram a partir de 12/13 (versão encurtada de 2012/2013, adotada para abordar as safras), principalmente devido a maior demanda pela EEd e após 13/14, houve um aumento na ES, comparado com as safras anteriores.

Através do BE, verificou-se que as safras 09/10 e 10/11, resultaram em médias inferiores que as demais, influenciadas pela menor ES. O EROI indicou que, as safras 09/10, 11/12, 17/18 e 18/19, resultaram nos maiores retornos. A maior eficiência para a EI, foi identificada na safra 11/12.

**Tabela 5.** Comparação dos indicadores na soja entre as safras.

Safra	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )					(-)	(GJ t <sup>-1</sup> )
09/10	8	2,55 bc	7,68 cd	10,23 bc	47,92 d	37,70 de	4,69 ab	3,61 abc
10/11	8	2,60 bc	7,68 cd	10,27 bc	46,16 d	35,88 e	4,50 b	3,76 abc
11/12	8	2,39 c	7,31 d	9,70 c	52,72 c	43,02 abc	5,46 a	3,10 c
12/13	8	2,39 c	11,28 ab	13,66 a	54,23 bc	40,56 cd	3,99 b	4,23 ab
13/14	8	2,38 c	11,99 a	14,37 a	56,62 ab	42,26 bc	3,95 b	4,28 a
14/15	8	2,80 ab	11,81 ab	14,61 a	57,26 ab	42,64 abc	3,95 b	4,31 a
15/16	8	3,08 a	10,65 ab	13,74 a	58,52 a	44,78 ab	4,41 b	3,93 ab
16/17	8	3,05 a	9,96 abc	13,01 a	57,76 ab	44,75 ab	4,54 b	3,78 abc
17/18	8	2,91 ab	9,42 bcd	12,33 ab	58,77 a	46,44 a	4,80 ab	3,52 bc
18/19	8	2,91 ab	9,42 bcd	12,33 ab	57,63 ab	45,31 ab	4,72 ab	3,59 abc
19/20	8	2,98 a	10,40 ab	13,38 a	57,51 ab	44,13 abc	4,40 b	3,90 ab
p-Valor		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

A eficiência energética, é influenciada por meio de fatores como a adoção de técnicas e tecnologias que visam aumentar a eficiência no sistema produtivo, através da redução do uso de insumos, mantendo elevados níveis de produtividade (GREER et al., 2020). A variação climática (ROTH et al., 2020), maior eficiência no uso de fertilizantes (ZANÃO JR et al., 2020), uso de técnicas como o manejo integrado de pragas e doenças (BUENO et al., 2021; RAHMAN; RUBAYET; BHUIYAN, 2020), podem reduzir a demanda energética, sem afetar a produtividade.

## 4.2. Milho (safra)

Os resultados para o milho convencional e OGM e para as safras, foram obtidas entre os estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina durante as safras de 2009/10 a 2019/20. A comparação entre os estados, incluiu o sistema de produção irrigado em Minas Gerais, durante as safras de 2011/12 a 2019/20.

Com isso, a Tabela 6 apresenta o comparativo entre o milho convencional e OGM. O sistema de produção convencional, não obteve diferença entre as médias para a EEi, EEd e EE ( $p>0,05$ ). Entretanto, a ES para o sistema OGM, apresentou 17,52 GJ ha<sup>-1</sup> a mais, quando comparado com o convencional, resultando na maior média para o BE e EROI e menor EI. Este resultado, demonstra que houve a mesma demanda energética entre os dois sistemas, porém, o milho OGM foi mais eficiente que o convencional devido a produtividade e a ES.

**Tabela 6.** Comparação dos indicadores para o milho, convencional e OGM.

Tipo	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )			(-)		(GJ t <sup>-1</sup> )	
Convencional	33	2,83 a	23,25 a	26,08 a	108,60 b	82,52 b	4,23 b	3,69 a
OGM	33	2,74 a	23,60 a	26,35 a	126,12 a	99,77 a	4,89 a	3,23 b
p-Valor		0,080	0,601	0,692	0,000	0,000	0,010	0,022

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

Os insumos foram os responsáveis pela EEd, representando 89 e 90% do dispêndio energético no sistema convencional e OGM, respectivamente. Em ambos os casos, os fertilizantes e corretivos corresponderam, em média, 65% da EE, seguidos dos defensivos agrícolas com 16% e do combustível com 10%. Assim como para a soja, a depreciação e a mão de obra podem ser desprezadas, por representarem <1% do total energético do sistema.

O uso demasiado de fertilizantes, com destaque para os nitrogenados, foram os maiores responsáveis pela demanda energética no sistema de produção de milho convencional e OGM. CAPELLESSO; CAZELLA (2013) compararam o cultivo de milho convencional, OGM e orgânico. O sistema de produção orgânico se mostrou mais eficiente energeticamente que os demais, sendo que o convencional houve maior demanda por fertilizantes nitrogenados e o OGM por defensivos agrícolas.

Na Tabela 7, é apresentada a análise entre os principais estados produtores de milho. O sistema de cultivo no Paraná, obteve elevada eficiência energética, em que, os indicadores resultaram na menor EI e maior EROI. Esses resultados, devem-se a menor média para EE e elevada ES. Com o sistema de irrigação, MG apresentou a maior EE devido a EEi, proporcionando a maior ES. Com isso, resultou no maior BE e EROI, porém a EI não diferiu de SC e do PR. O sistema do RS foi o menos eficiente, os indicadores apresentam os menores resultados para o BE e EROI e a maior EI.

**Tabela 7.** Comparação dos indicadores para o milho, entre os estados.

Estado	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )			(-)		(GJ t <sup>-1</sup> )	
MG - Irrigado	18	7,52 a	26,83 a	34,35 a	170,89 a	136,54 a	5,08 ab	3,00 bc
PR	22	2,73 c	21,33 b	24,06 c	130,52 b	106,46 b	5,53 a	2,78 c
RS	22	2,63 c	25,68 a	28,31 b	105,89 c	77,58 c	3,73 c	4,16 a
SC	22	3,00 b	23,27 b	26,27 bc	115,66 bc	89,40 c	4,41 bc	3,44 b
p-Valor		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

Considerando a água e temperatura como os fatores biofísicos limitantes da produtividade do milho, o sistema de cultivo em MG irrigado, demandou 16% da EE. Por meio da maior disponibilidade de água no solo, o déficit hídrico não limitou a produtividade da cultura, resultando na maior ES (ANDREA et al., 2018).

A produtividade do milho no RS ao longo dos últimos anos, tem sido afetada devido a variabilidade climática na região, reduzindo a ES e aumentando EI. Em contrapartida, o PR tem aumentado sua produtividade anualmente, proporcionando bons indicadores energéticos (RUGERI; ELIAS; GERVASIO, 2020).

Ao longo do tempo, pode haver no sistema de produção, variações na quantidade de operações e insumos, e na produtividade da cultura. Sendo assim, a Tabela 8 indica que houve redução na demanda energética pela EEi a partir da safra 15/16, e aumento na EEd posterior a safra 11/12. Entretanto, a EE não apresentou diferença entre as médias ( $p>0,05$ ). As maiores ES se deram depois da safra 13/14. Com isso, os indicadores mostram que a safra 10/11 obteve a menor eficiência com os menores valores para o BE e EROI e o maior para a EI, sendo a 15/16 mais eficiente por apresentar maior BE e EROI e menor EI.

**Tabela 8.** Comparação dos indicadores para o milho, entre as safras.

Safra	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )			(-)		(GJ t <sup>-1</sup> )	
09/10	6	3,07 a	21,95 b	25,02 a	88,11 cd	63,09 bc	3,57 bc	4,40 ab
10/11	6	3,07 a	21,95 b	25,02 a	81,83 d	56,81 c	3,32 c	4,75 a
11/12	6	2,93 a	22,75 ab	25,68 a	113,87 bc	88,19 ab	4,54 abc	3,44 abc
12/13	6	2,93 a	22,95 ab	25,88 a	110,66 bc	84,78 abc	4,37 abc	3,53 abc
13/14	6	2,94 a	22,89 ab	25,83 a	124,99 ab	99,16 a	4,95 abc	3,13 bc
14/15	6	2,94 a	22,52 ab	25,46 a	134,54 ab	109,08 a	5,34 ab	2,83 c
15/16	6	2,79 ab	22,52 ab	25,31 a	140,34 a	115,03 a	5,59 a	2,69 c
16/17	6	2,44 b	22,83 ab	25,27 a	122,98 ab	97,72 a	5,08 abc	3,13 bc
17/18	6	2,53 b	23,82 ab	26,35 a	127,71 ab	101,36 a	4,94 abc	3,08 bc
18/19	6	2,52 b	27,68 a	30,20 a	124,53 ab	94,33 a	4,15 abc	3,59 abc
19/20	6	2,50 b	25,83 ab	28,33 a	121,38 ab	93,06 ab	4,29 abc	3,45 abc
p-Valor		0,000	0,016	0,041	0,000	0,000	0,004	0,001

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

Diferentes fatores contribuem para a variabilidade entre as entradas e saídas de energia ao longo do tempo, tais como custo dos insumos, maior ou menor incidência de pragas e doenças, variação climática, entre outros. As causas da grande demanda energética, estão ligadas a elevada dependência de fertilizantes, sobretudo nitrogenados e de defensivos agrícolas. Com o passar dos anos, novas tecnologias como o desenvolvimento de novas moléculas para controle de pragas e doenças, novas cultivares adaptadas e modificadas para maior resistência e produtividade, bem como técnicas de manejo que visam reduzir aplicações de defensivos e fertilizantes, fornecem meios para aumentar a eficiência energética para a produção de milho (CONTINI et al., 2019).

### 4.3. Milho segunda safra

A análise para o milho segunda safra, popularmente conhecido como milho safrinha, foi realizado entre os estados do Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Paraná, durante as safras 2009/10 a 2019/20. As avaliações foram realizadas entre o milho segunda safra convencional e OGM, estados e safras.

O milho convencional de segunda safra, quando comparado com o OGM (Tabela 9), apresentou médias superiores para a EEi e EE e inferiores para ES. O BE obteve uma diferença de 13,66 GJ ha<sup>-1</sup> e o EROI foi maior para a OGM. Devido a produtividade e maior EE, o milho convencional demandou mais energia por tonelada, quando comparado com a OGM.

**Tabela 9.** Comparação dos indicadores para o milho segunda safra, convencional e OGM.

Tipo	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )			(-)		(GJ t <sup>-1</sup> )	
Convencional	44	2,07 a	14,06 a	16,13 a	89,28 b	73,15 b	5,55 b	2,73 a
OGM	44	1,98 b	13,83 a	15,81 b	102,62 a	86,81 a	6,51 a	2,38 b
p-Valor		0,006	0,100	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

Por meio da análise dos indicadores, o milho de segunda safra convencional resultou em menor eficiência no sistema de produção quando comparado com a OGM. A composição energética das entradas, foi semelhante para os dois tipos. A EEi foi responsável por 13%, enquanto a EEd 87%. As maiores demandas por energia foram os fertilizantes (55%), defensivos agrícolas (18%), sementes e material de plantio (14%) e o combustível (12%).

Do ponto de vista econômico, a adoção do sistema de produção do milho de segunda safra OGM, superou os lucros do convencional, com elevada probabilidade de ganhos positivos. De acordo com os produtores, o milho OGM reduz a necessidade de defensivos agrícolas, especialmente inseticidas e promove maior produtividade (MIGUEL; ESPERANCINI; GRIZOTTO, 2014).

Entre os estados produtores (Tabela 10), o destaque foi o MT, que apresentou a menor EEd e por consequência menor EE. A ES para este estado foi a maior, resultando no melhor BE e EROI. Através da produtividade e da EE, obteve a menor EI. Em contrapartida, o PR obteve a maior EE e o MS a menor ES. Este resultado, fez com que o MS apresentasse o menor BE, e junto com o PR, menor EROI. Estes dois estados também necessitaram de maior energia para a produção de uma tonelada do produto.

**Tabela 10.** Comparação dos indicadores para o milho segunda safra, entre os estados.

Estado	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )				(-)	(GJ t <sup>-1</sup> )	
GO	22	1,85 c	13,88 b	15,73 b	96,30 b	80,56 b	6,12 b	2,44 b
MS	22	1,96 bc	14,06 b	16,01 b	84,51 c	68,50 c	5,26 c	2,86 a
MT	22	1,98 b	12,64 c	14,62 c	106,36 a	91,73 a	7,26 a	2,17 c
PR	22	2,30 a	15,21 a	17,50 a	96,64 b	79,13 b	5,48 c	2,76 a
p-Valor		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

A diferença entre a composição energética das EE, se deram principalmente entre as EEd. Com isso, a participação dos fertilizantes e corretivos, houve maior demanda no PR (57%) e menor no MS (53%). Entretanto, os defensivos foram maiores para o MS (21%), e menores no MT e PR (17%).

Sendo os fertilizantes e corretivos a principal demanda energética nos sistemas de produção de milho segunda safra, sua otimização é necessária para tornar o sistema de produção mais eficiente. A gestão da fertilidade do solo tende a evoluir com novos conhecimentos e adoção de tecnologias. Um exemplo é o uso de taxa variável na aplicação de fertilizantes (RESENDE et al., 2019).

A análise energética para o milho de segunda safra (Tabela 11), apresentou de modo geral, um aumento na EE, influenciada principalmente pela EEd. Houve um aumento para a ES e EROI, a partir da safra 12/13. A EI apresentou as maiores médias para as três primeiras safras analisadas.

**Tabela 11.** Comparação dos indicadores para o milho segunda safra, entre as safras.

Safra	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )				(-)	(GJ t <sup>-1</sup> )	
09/10	8	2,25 a	12,67 d	14,93 d	72,34 e	57,41 e	4,87 de	3,06 a
10/11	8	2,25 ab	12,42 d	14,67 d	70,14 e	55,47 e	4,79 e	3,11 a
11/12	8	1,91 c	12,86 cd	14,77 d	74,20 e	59,43 e	5,05 cde	2,95 a
12/13	8	1,91 c	13,26 cd	15,17 cd	92,93 d	77,76 d	6,17 ab	2,44 bc
13/14	8	1,91 c	13,42 bcd	15,33 bcd	99,72 cd	84,39 cd	6,61 ab	2,32 bc
14/15	8	1,90 c	14,41 ab	16,31 abc	102,11 bcd	85,80 bcd	6,28 ab	2,40 bc
15/16	8	2,03 abc	14,41 ab	16,44 ab	111,59 abc	95,15 abc	6,81 ab	2,20 c
16/17	8	2,03 abc	13,78 bc	15,81 bcd	92,60 d	76,79 d	5,99 bc	2,57 b
17/18	8	2,01 bc	15,38 a	17,40 a	122,58 a	105,18 a	7,18 a	2,31 bc
18/19	8	1,97 c	15,41 a	17,38 a	115,15 ab	97,78 ab	6,68 ab	2,24 c
19/20	8	2,05 abc	15,38 a	17,44 a	102,10 bcd	84,66 bcd	5,89 bcd	2,54 b
p-Valor		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

A adoção da semeadura do milho de segunda safra, ocorreu de forma gradual a partir do início da década de 1990 pelos produtores. Com isso, a semeadura na safra 2009/10 representou 39% da área de milho segunda safra, superando a de verão em 2011/12, atingindo a maior participação em 2020/21 (78%) (CONAB,



2021b). Esse aumento, promove o desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas, que podem melhorar a eficiência produtiva, resultando no avanço dos indicadores energéticos.

#### 4.4. Sistemas de produção

Considerando o sistema de cultivo da soja, milho, milho de segunda safra e do sistema de sucessão de cultura soja e milho de segunda safra, foi realizado uma um comparativo entre as entradas, saída e indicadores. Para a soja, consideraram-se os estados de: GO, MT, PR e RS, para o milho: PR, RS e SC, para o milho de segunda safra: GO, MS, MT e PR, para o sistema soja e milho: GO, MT e PR, entre as safras de 2009/10 a 2019/20. Na qual, metade convencional e metade OGM. Desconsiderou-se o estado de MG para o milho safra, por ser irrigado e para o sistema soja e milho os estados do RS e MS, por não coincidirem.

Sendo assim, a Tabela 12 mostra que, o sistema soja e milho de segunda safra, apresentou a maior média para a EE e ES, resultando no maior BE. Devido a soma das duas produtividades, obteve a menor EI. Em contrapartida, a soja apresentou a menor EE e ES, resultando no menor BE. A fixação biológica de nitrogênio, faz com que o sistema de produção da soja não necessite de fertilizantes nitrogenado, podendo ser um dos motivos da menor EEd, e por consequência menor EE.

**Tabela 12.** Comparação dos indicadores para os sistemas de produção.

Sistema	N	EEi	EEd	EE	ES	BE	EROI	EI
		(GJ ha <sup>-1</sup> )				(-)	(GJ t <sup>-1</sup> )	
Soja	88	2,73 b	9,78 c	12,51 d	55,01 d	42,50 d	4,49 c	3,82 a
Milho	66	2,79 b	23,83 a	26,62 b	117,36 b	90,74 b	4,51 c	3,50 b
Milho segunda safra	88	2,02 c	13,95 b	15,97 c	95,95 c	79,98 c	6,03 a	2,56 d
Soja + Milho segunda safra	66	4,67 a	24,07 a	28,75 a	156,06 a	127,31 a	5,44 b	2,89 c
p-Valor		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey com 95% de confiança. P-valor indica probabilidade de erro ao afirmar que há diferença pelo teste F.

A maior demanda energética para todos os sistemas analisados, foram os insumos, representados pela EEd. Os fertilizantes e corretivos, representaram o maior dispêndio energético no cultivo do milho (65%), milho de segunda safra (55%) e no sistema soja e milho (41%). Para estes sistemas, os defensivos foram o segundo maior dispêndio, sendo 16% para o milho, 18% para o milho de segunda safra e 28% para o sistema soja e milho. Diferente dos demais, para a soja, os defensivos agrícolas representaram a maior demanda (38%), seguidos dos fertilizantes e corretivos (26%).

Entre as EEi, o combustível representou a maior demanda, sendo 20% para a soja, 9% para o milho, 12% para o milho de segunda safra e 16% para o sistema soja e milho. A depreciação e mão de obra para todos os cultivos, representaram <1% em média, podendo ser desprezados. As demandas energéticas entre as operações foram maiores para a colheita, tratos culturais e plantio.

## 5. CONCLUSÕES

Para a soja, o sistema de produção convencional e OGM, não apresentou diferença entre as médias, demonstrando eficiência semelhante. Entre os estados produtores, apenas o indicador balanço energético diferiu para o Rio Grande do Sul, indicando menor diferença entre as entradas e saída. Ao longo do tempo, as médias apresentaram variação, não indicando uma tendência definida, podendo ser explicada pela variação climática. De modo geral, os insumos foram os principais responsáveis pela demanda energética, sendo os fertilizantes e corretivos e os defensivos os principais, seguidos do combustível.

No milho, o sistema de produção convencional, por apresentar menor produtividade e energia de saída, resultou na menor eficiência quando comparado com o OGM. Entre os estados, os indicadores apresentaram os melhores resultados para o sistema de produção irrigado em Minas Gerais e para o Paraná, sendo as menores eficiências no Rio Grande do Sul. Durante as safras, houve uma tendência do aumento da energia de saída, influenciado pelo aumento da produtividade, resultando na melhoria da eficiência. Assim como para a soja, as maiores demandas foram para os fertilizantes e corretivos, defensivos e combustíveis.

O milho segunda safra OGM, apresentou menor entrada de energia e maior saída, quando comparado com a convencional. Com isso, os indicadores apresentaram maior eficiência para o sistema OGM. Entre os estados, o Mato Grosso resultou na maior eficiência do sistema de produção, de acordo com os indicadores, em oposição ao Mato Grosso do Sul, em que apresentou a menor eficiência. Entre as safras, os indicadores mostraram o aumento da eficiência após a safra 2012/13. As principais demandas de energia foram os fertilizantes e corretivos, defensivos agrícolas e as sementes e material de plantio.

Sendo assim, ao comparar o monocultivo com o sistema de produção em sucessão de culturas, o sistema de produção de soja e milho segunda safra apresentou eficiência superior aos outros cultivos, mesmo apresentando maior demanda de energia. Futuros trabalhos devem abordar o sistema de produção e não o cultivo isolado, permitindo uma abordagem sistêmica para a comparação da agricultura tropical e de clima temperado.

O sistema de produção utilizado pelos produtores no cultivo moderno de grão no Brasil, apresenta alta demanda energética de fertilizantes e defensivos agrícolas e por consequência das aplicações, os combustíveis. Futuras pesquisas podem avaliar a eficiência energética no uso da fixação biológica de nitrogênio e uso de fertilizantes em taxa variável e técnicas como o manejo integrado de pragas e doenças.



## REFERÊNCIAS

- A. PRADHAN et al. The Energy Balance of Soybean Oil Biodiesel Production: A Review of Past Studies. **Transactions of the ASABE**, v. 51, n. 1, p. 185–194, 2008.
- AGROSTAT. **Indicadores**. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/>>. Acesso em: 11 jan. 2021.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working Papers 12-03. jun. 2012.
- ALLUVIONE, F. et al. EUE (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. **Energy**, v. 36, n. 7, p. 4468–4481, 2011.
- ANDREA, M. C. et al. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264–273, set. 2018.
- ANDREA, M. C. DA S.; ROMANELLI, T. L.; MOLIN, J. P. Energy flows in lowland soybean production system in Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, n. 8, p. 1395–1400, 29 abr. 2016.
- ANDREA, M. C. S. et al. Energy demand in agricultural biomass production in Parana state, Brazil. **Agric Eng Int: CIGR Jornal**, n. Special issue 2014: Agri-food and biomass supply chains, p. 42–51, 2014.
- BERTILSSON, G.; KIRCHMANN, H.; BERGSTRÖM, L. Energy Analysis of Organic and Conventional Agricultural Systems. In: KIRCHMANN, H.; BERGSTRÖM, L. (Eds.). **Organic Crop Production – Ambitions and Limitations**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. p. 173–188.
- BUAINAIN, A. M.; SOUSA, M. R.; NAVARRO, Z. **Globalization and Agriculture: Redefining Unequal Development**. Lanham, Boulder, New York, London: Lexington Books, 2018.
- BUCUSSI, A. A. Introdução ao conceito de energia. **UFRGS, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física**, 2006.
- BUENO, A. F. et al. Challenges for Adoption of Integrated Pest Management (IPM): the Soybean Example. **Neotropical Entomology**, v. 50, n. 1, p. 5–20, fev. 2021.
- BURHEIM, O. S. General Thermodynamics. In: **Engineering Energy Storage**. [s.l.] Elsevier Inc., 2017. p. 15–28.
- CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **Informações agrônômicas**, n. 141, p. 1–13, 2013.
- CAMPO, R. J.; HUNGRIA, M. Compatibilidade de uso de inoculante e fungicidas no tratamento de sementes de soja. **Embrapa Soja**, p. 32, 2000.
- CAMPOS, A. T. et al. **Balanco de energia em sistemas orgânico e convencional de produção de milho**AraçatubaAGRENER, , 2004.
- CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. DE. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1977–1985, 2004.
- CAPELLESSO, A. J.; CAZELLA, A. A. Indicador de sustentabilidade dos agroecossistemas: estudo de caso em áreas de cultivo de milho. **Ciência Rural**, v. 43, n. 12, p. 2297–2303, 1 out. 2013.
- CARDOSO, L. S. et al. **Análise da estiagem na safra 2019/2020 e impactos na agropecuária do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: [s.n.].

- CASELA, C. R.; FERREIRA, A. DA S.; PINTO, N. F. J. DE A. Doenças na cultura do milho. **Embrapa**, v. 83, p. 1–14, 2006.
- CERVINKA, V. Fuel and energy efficiency. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Handbook of Energy Utilization In Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. p. 15–21.
- COELHO, A. M. Nutrição e Aducação do Milho Introdução. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 10, 2006.
- CONAB. **Portal de Informações Agropecuárias**. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/>>.
- CONAB. **Série histórica das safras**. Disponível em: <[www.conab.gov.br/info-agro/safra/serie-historica-das-safra](http://www.conab.gov.br/info-agro/safra/serie-historica-das-safra)>.
- CONFORTI, P.; GIAMPIETRO, M. Fossil energy use in agriculture: an international comparison. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 65, n. 3, p. 231–243, nov. 1997.
- CONNOR, D. J.; LOOMIS, R. S.; CASSMAN, K. G. **Farming systems and their biological components**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- CONTINI, E. et al. Milho - Caracterização e Desafios Tecnológicos. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 1–45, 2019.
- COSTAMILAN, L. M. **Soja: resultados de pesquisa 2011/2012 Embrapa Trigo**. Passo Fundo: [s.n.].
- DELEAGE, J. P. et al. Eco-energetics analysis of an agricultural system: The French case in 1970. **Agro-Ecosystems**, v. 5, n. 4, p. 345–365, dez. 1979.
- DENARDIN, J. E. et al. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p\\_do141.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do141.htm)>. Acesso em: 14 dez. 2020.
- DIOTTO, V.; IRMAK, S. Embodied Energy and Energy Return on Investment Analyses in Maize Production for Grain and Ethanol under Center Pivot, Subsurface Drip, and Surface (Furrow) Irrigation with Disk Tillage and No-Till Practices. **Transactions of the ASABE**, v. 59, n. 3, p. 873–884, 14 jun. 2016.
- EMBRAPA. Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014. **Sistemas de Produção/Embrapa Soja**, p. 265, 2013.
- EMBRAPA. **Visão 2030: O Futuro da Agricultura Brasileira** Embrapa Brasília, DF, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>>
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: Empresa Energética de Pesquisa, 2020.
- EPE. **Capítulo 3 (Consumo de Energia por Setor) 1970 - 2019**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- EUROSTAT. **Economy-wide material flow accounts and derived indicators. A methodological guide**. Luxembourg: European Communities, 2001.
- FAO. **Conservation Agriculture**. Disponível em: <<http://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- FIGUEIREDO, A. M.; SANTOS, M. L. DOS; LIMA, J. F. DE. Importância do Agronegócio para o Crescimento Econômico de Brasil e Estados Unidos. **Gestão & Regionalidade**, v. 28, n. 82, p. 5–18, 17 maio 2012.
- FLUCK, R. C. ENERGY PRODUCTIVITY: A MEASURE OF ENERGY UTILISATION IN AGRICULTURAL SYSTEMS. **Agricultural Systems**, v. 4, n. 1, p. 29–37, 1979.
- FORNASIERI, D. F. **Manual da cultura do milho**. [s.l.] Funep, 2007.

- FREDERICO, S. MODERNIZAÇÃO DA AGRICULTURA E USO DO TERRITÓRIO: A DIALÉTICA ENTRE O NOVO E O VELHO, O INTERNO E O EXTERNO, O MERCADO E O ESTADO EM ÁREAS DE CERRADO. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, n. 34, p. 46, 30 ago. 2013.
- FURTADO, C. **Análise do Modelo Brasileiro**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1975.
- GABRIEL FILHO, A. et al. Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 333–339, mar. 2010.
- GARNETT, T. et al. Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. **Science**, v. 341, n. 6141, 5 jul. 2013.
- GASQUES, J. G. et al. Política Agrícola. **Produtividade da agricultura brasileira e os efeitos de algumas políticas**, 2012.
- GASQUES, J. G. et al. **BRASIL PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO - 2019/2020 a 2029/2030** Brasília, DF: MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, , 2020.
- GAZZONI, D. L.; DALL’AGNOL, A. **A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C.** 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- GREER, K. et al. Assessment of high-input soybean management in the US Midwest: Balancing crop production with environmental performance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 292, p. 106811, abr. 2020.
- GUTOWSKI, T. G. et al. The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 1986, p. 20120003, 13 mar. 2013.
- HALL, C. A. S.; BALOGH, S.; MURPHY, D. J. R. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? **Energies**, v. 2, n. 1, p. 25–47, 2009.
- HEICHEL, G. H. Assessing the fossil energy costs of propagating agricultural crops. In: PIMENTEL, D. (Ed.). . **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. p. 27–33.
- HERENDEEN, R. A. Goods and Services: Energy Costs. In: **Encyclopedia of Energy**. [s.l.] Elsevier, 2004. p. 33–41.
- HIRAKURI, M. H. et al. Sistemas de Produção: conceitos e definições no contexto agrícola. **Embrapa Soja**, p. 24, 2012.
- HYMOWITZ, T. On the domestication of the soybean. **Economic Botany**, v. 24, n. 4, p. 408–421, out. 1970.
- IEG FNP. **Anuário da Agricultura Brasileira** São Paulo: IHS Markit, , 2020.
- KISTLER, L. et al. Multiproxy evidence highlights a complex evolutionary legacy of maize in South America. v. 1313, n. December, p. 1309–1313, 2018.
- KOSKY, P. et al. Energy. In: **Exploring Engineering**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 79–97.
- LOCKERETS, W. Energy inputs for nitrogen, phosphorus, and potash fertilizers. In: PIMENTEL, D. (Ed.). . **Handbook of Energy Utilization In Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. p. 23–24.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola – Adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1981.
- MANTOAM, E. J. et al. Energy, carbon and water footprints on agricultural machinery. **Biosystems Engineering**, v. 198, p. 304–322, out. 2020.
- MANTOAM, E. J.; ROMANELLI, T. L.; GIMENEZ, L. M. Energy demand and greenhouse gases emissions in the life cycle of tractors. **Biosystems Engineering**, v. 151, p. 158–170, nov. 2016.

- MANTOVANI, E. C. Colheita e pós-colheita. **Embrapa Milho e Sorgo**, v. 6, p. 1–22, 2010.
- MARTÍNEZ, D. M.; EBENHACK, B. W.; WAGNER, T. P. Energy–flow analyses and efficiency indicators. In: **Energy Efficiency**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 101–127.
- MEHLING, H. **Understanding the basics of energy An introduction from simple**. [s.l.: s.n.].
- MIGUEL, F. B.; ESPERANCINI, M. S. T.; GRIZOTTO, R. K. Rentabilidade e risco da produção de milho safrinha geneticamente modificado e convencional na região de Guaíra/SP. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 29, n. 1, p. 64, 2 mar. 2014.
- MINITAB. **Minitab Statistical Software** State College, PA Minitab, Inc., , 2021. Disponível em: <www.minitab.com>
- MOREIRA, M. A. Energia, entropia e irreversibilidade. **Instituto de Física - UFRGS**, v. 9, p. 27, 1998.
- MOURAD, A. L.; WALTER, A. The energy balance of soybean biodiesel in Brazil: a case study. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 2, p. 185–197, mar. 2011.
- ODUM, E. P.; BARRETT, G. W. The Scope of Ecology. In: **Fundamentals of Ecology**. 5. ed. Philadelphia: Saunders, 1972. p. 412.
- ORNELLAS, J. A. A Energia dos Tempos Antigos aos dias Atuais. **EDUFAL**, p. 71, 2006.
- PASHAEI KAMALI, F. et al. Evaluation of the environmental, economic, and social performance of soybean farming systems in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 385–394, jan. 2017.
- PASSOS, A. M. A. DOS; ALVARENGA, R. C.; SANTOS, F. C. DOS. Sistema de plantio direto. In: NOBRE, M. M.; OLIVEIRA, I. R. DE (Eds.). **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. p. 61–104.
- PATERNIANI, E. **Melhoramento e produção de milho**. 2. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1987.
- PATTERSON, M.; JOLLANDS, N. The power of one: Developing a headline indicator for tracking progress to sustainability in New Zealand. **International Journal of Environment and Sustainable Development**, v. 3, n. 3–4, p. 316–338, 2004.
- PATZEK, T. W. Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 23, n. 6, p. 519–567, nov. 2004.
- PHILLIPS, R. E. et al. No-Tillage Agriculture. **Science**, v. 208, n. 4448, p. 1108–1113, 6 jun. 1980.
- PIMENTEL, D. Energy inputs for the production, formulation, packing, and transport of various pesticides. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Handbook of Energy Utilization In Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. p. 45–48.
- PIMENTEL, D. Energy inputs in production agriculture. In: FLUCK, R. C. (Ed.). **Energy in Farm Production**. Florida: Elsevier Science, 1992. v. 3p. 13–29.
- PIMENTEL, D.; PATZEK, T. W. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. **Natural Resources Research**, v. 14, n. 1, p. 65–76, mar. 2005.
- PIMENTEL, D.; PIMENTEL, M. H. Ecological Systems, Natural Resources, and Food Supplies. In: **Food, Energy, and Society**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007a. p. 400.
- PIMENTEL, D.; PIMENTEL, M. H. **Food, Energy, and Society**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007b. v. 26
- PINTO, N. F. J. DE A. Tratamento de sementes de milho com fungicidas. **Revista Ceres**, v. 50, p. 681–686, 2003.
- RAHMAN, M. T.; RUBAYET, M. T.; BHUIYAN, M. K. A. Integrated management of rhizoctonia root rot disease of soybean caused by *Rhizoctonia solani*. **Nippon Journal of Environmental Science**, v. 1, n. 7, p. 1018, 1 jul. 2020.

- RESENDE, Á. V. et al. Milho safrinha: É possível reduzir a adubação sem perdas na produtividade? In: **Seminário Nacional Milho Safrinha**. Jataí-GO: Embrapa, 2019. p. 19.
- ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 4, p. 375–383, ago. 2010.
- ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Machinery management as an environmental tool - material embodiment in agriculture. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 14, n. 1, p. 63–73, 2012.
- ROMANELLI, T. L.; NARDI, H. DE S.; SAAD, F. A. Material embodiment and energy flows as efficiency indicators of soybean (*Glycine max*) production in Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 261–270, abr. 2012.
- ROTH, M. G. et al. Integrated Management of Important Soybean Pathogens of the United States in Changing Climate. **Journal of Integrated Pest Management**, v. 11, n. 1, 1 jan. 2020.
- RUGERI, A.; ELIAS, H. T.; GERVASIO, E. W. Importância das culturas de milho e sorgo. In: **Informações técnicas para o cultivo do milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2019/20 e 2020/21**. Sete Lagoas: Associação brasileira de milho e sorgo, 2020. p. 220.
- SANTOS, H. P. DOS et al. **Conversão e balanço de energia de sistemas de produção com integração lavoura-pecuária sob plantio direto**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. **Anais...2011** Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2011001000011&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2011001000011&lng=pt&tlng=pt)>
- SEIXAS, C. D. S. et al. Tecnologias de Produção de Soja. **Sistemas de Produção 17. EMBRAPA Soja**, v. 6, p. 347, 2020.
- SEIXAS, M. A.; CONTINI, E. Megatendências globais até 2050. n. 1, 2018.
- SFREDO, G. J. **Calagem e adubação da soja Circular Técnico EMBRAPA** Londrina Embrapa Soja, , 2008. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/470943>>
- SHEEHAN, J. et al. **Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus. Final report US Department of Energy**. Golden, CO (United States): [s.n.]. Disponível em: <[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=771560](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=771560)>.
- SIEBEN, A.; MACHADO, C. A. HISTÓRICO E CONTEXTUALIZAÇÃO SÓCIO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA SOJA (GLYCINE MAX) NO BRASIL. **Geoambiente On-line**, v. 0, n. 7, p. 71–88, 16 ago. 2006.
- SILVEIRA, J. M.; CONTE, O. Determinação de perdas na colheita de soja: copo medidor da Embrapa. **Embrapa Soja**, p. 28, 2013.
- SMIL, V. Energy in our minds: concepts and measures. In: **Energy a beginner's guide**. 2. ed. Oxford: Oneworld Publications, 2017. p. 192.
- SØRENSEN, C. G.; NIELSEN, V. Operational Analyses and Model Comparison of Machinery Systems for Reduced Tillage. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 2, p. 143–155, out. 2005.
- STOUT, B. A. **Handbook of Energy for World Agriculture**. New York: Elsevier, 1990. v. 73
- TERHUNE, E. C. Energy used in the United States for agricultural liming materials. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Handbook of Energy Utilization In Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. p. 25–26.
- USDA. **Oilseeds: World Markets and Trade**. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data/oilseeds-world-markets-and-trade>>. Acesso em: 12 jan. 2021a.



- USDA. **World Agricultural Production** FAS, , 2021b. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>
- VALICENTE, F. H. Manejo integrado de pragas na cultura do milho. **Embrapa Milho e Sorgo**, n. January 2015, p. 14, 2015.
- VEIGA, J. P. S. et al. Energy embodiment in Brazilian agriculture: an overview of 23 crops. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 6, p. 471–477, dez. 2015.
- VERNETTI, F. DE J. **Origem da especie, introducao e disseminacao no Brasil**. Fundacao Cargill Campinas, 1983.
- VOS, R.; BELLÙ, L. G. Global Trends and Challenges to Food and Agriculture into the 21st Century. In: **Sustainable Food and Agriculture**. [s.l.] Elsevier, 2019.
- WADT, P. G. S. Construção de Terraços para Controle da Erosão Pluvial no Estado do Acre. **EMBRAPA Acre**, p. 44, 2004.
- WIETHÖLTER, S. Calagem no Brasil. p. 106, 2000.
- WORLD FOOD SUMMIT (WFS). **Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action**. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/W3613E/W3613E00.htm>>.
- ZANÃO JR, L. A. et al. Phosphorus fertilization with enhanced efficiency in soybean and corn crops. **Australian Journal of Crop Science**, n. 14(01) 2020, p. 78–84, 20 jan. 2020.
- ZANINI, A. et al. Análise do consumo de energia na produção de silagem de milho em plantio direto. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 25, n. 2, p. 249–253, 17 abr. 2003.