

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
FITOTECNIA

DISSERTAÇÃO

**Contribuição da Fixação Biológica de
Nitrogênio e Estimativa da Eficiência
Energética e Emissões de CO₂eq em Áreas de
Alta Produtividade de Soja no Brasil**

ELDERSON PEREIRA DA SILVA

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

**Contribuição da Fixação Biológica de Nitrogênio, Estimativa da
Eficiência Energética e Emissões de CO₂eq em Áreas de Alta
Produtividade de Soja no Brasil**

ELDERSON PEREIRA DA SILVA

Sob orientação do Professor
Dr. Segundo Sacramento Urquiaga Caballero

Projeto de Dissertação
submetida como requisito
parcial para obtenção do grau de
Mestre em Fitotecnia, no
Programa Pós-Graduação em
Fitotecnia, Área de
Concentração em Agroecologia.

Seropédica, RJ
Maio 2022

S586c SILVA, ELDERSON PEREIRA DA , 1993-
Contribuição da Fixação Biológica de Nitrogênio e
Estimativa da Eficiência Energética e Emissões de
CO₂eq em Áreas de Alta Produtividade de Soja no
Brasil / ELDERSON PEREIRA DA SILVA. - Seropédica,
2022.
63 f.

Orientador: Segundo Urquiaga.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em
Fitotecnia, 2022.

1. Soja. 2. Fixação Biológica de Nitrogênio. 3.
Áreas de Alta Produtividade. 4. Nitrogênio . I.
Urquiaga, Segundo, 1950-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
Graduação em Fitotecnia III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial a minha mãe Elizete, que sempre me apoiou e lutou minhas causas.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, a CAPES, a EMBRAPA Agrobiologia que juntos me permitiram concluir esse trabalho.

Agradeço aos pesquisadores Dr. Segundo Urquiga e Dr. Bruno Alves que me ajudam a ser um agrônomo melhor e um Elderson melhor.

Agradeço em especial alguns amigos como Marcelo Vidal, Renato Nunes, Ana Cristina, Edevaldo Monteiro que sempre me aconselharam da melhor forma. Obrigado queridos!

Agradeço à cidade de Seropédica-RJ, que em 8 verões me recebeu tão bem.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001, (PORTARIA Nº 206, DE 4 DE SETEMBRO DE 2018 DA CAPES)



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA**



**HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 8 / 2025 - DeptFITO
(12.28.01.00.00.00.32)**

Nº do Protocolo: 23083.006268/2025-44

Seropédica-RJ, 10 de fevereiro de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

ELDERSON PEREIRA DA SILVA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Fitotecnia, no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de concentração em agroecologia.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 07/03/2022

Dr. Segundo Sacramento Urquiaga Caballero, Pesquisador Embrapa Agrobiologia
(Orientador)

Dra. Irene da Silva Coelho, Professora da UFRRJ

Dra. Cláudia Pozzi Jantalia, Pesquisadora Embrapa Agrobiologia

(Assinado digitalmente em 10/02/2025 17:15)

IRENE DA SILVA COELHO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DMIV (12.28.01.00.00.00.54)
Matrícula: 1815763

(Assinado digitalmente em 12/02/2025 07:48)

CLAUDIA POZZI JANTALIA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 139.630.858-00

(Assinado digitalmente em 12/02/2025 11:27)

SEGUNDO SACRAMENTO URQUIAGA CABALLERO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 058.898.198-28

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **8**, ano: **2025**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE**
MESTRADO, data de emissão: **10/02/2025** e o código de verificação: **c4b9d2ce86**

RESUMO GERAL

SILVA, Elderson Pereira da. **Contribuição da Fixação Biológica de Nitrogênio, Estimativa da Eficiência Energética e Emissões de CO₂eq em Áreas de Alta Produtividade de Soja no Brasil**. 2022. 60 p. Dissertação (Mestre em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

A cada ano que passa a soja vem atingindo novos recordes de produtividade de grãos, chegando em algumas áreas produzir 120% a mais do que a produtividade média da soja no Brasil. Essas altas produtividades ($> 4200 \text{ kg ha}^{-1}$) exigem um grande aporte de nitrogênio no sistema, o que no Brasil é garantido quase que exclusivamente pela fixação biológica de N_2 do ar. Logo, o objetivo foi avaliar a contribuição da FBN a nível de campo, usando a técnica da abundância natural de ^{15}N em áreas de alta produtividade de soja em Rio Verde, GO (Capítulo I), além de estimar a eficiência energética (EE) e emissões de CO₂eq de algumas dessas referidas áreas (Capítulo II). Para tal, foram avaliadas 2 áreas na safra 2019/2020 e 5 áreas na safra 2020/2021 com histórico de alta produtividade de soja e/ou que foram campeãs do Desafio Nacional de Máxima Produtividade promovido pelo Comitê Estratégico Soja Brasil. Para a avaliação da FBN, cada área representativa foi dividida em 4 quadrantes e dentro de cada quadrante foi tomada uma repetição para cada variável analisada. Foram avaliados as seguintes variáveis no capítulo I: índice de colheita para nitrogênio (ICN), contribuição da FBN pela técnica da abundância natural de ^{15}N , e o balanço e a lacuna de N. No que se refere a FBN, todas as áreas avaliadas com suas respectivas variedades foram capazes de suprir a demanda de N pela cultura, onde a FBN assumiu valores variando de 67,05% a 82,11%. Em relação ao balanço de N no sistema solo x planta, todas as variedades apresentaram balanço positivo, onde o maior valor observado foi de 205,29 kg ha^{-1} de N na safra 2020/21 com a variedade BMX Foco IPRO e o menor valor foi de 68,88 kg ha^{-1} de N para a variedade BMX Voraz IPRO, confirmando a eficiência dos inoculantes utilizados na cultura nos dias atuais. Já no Capítulo II, as entradas e saídas de energia das operações agrícolas e/ou insumos utilizados foram calculadas pela multiplicação da quantidade utilizada pelo seu poder calorífico ou coeficiente energético em cada etapa de produção. A eficiência energética foi obtida pela razão entre a quantidade de energia total de saída e o consumo total de energia durante o processo produtivo. Os resultados apontaram que para cada 1,0 MJ de energia consumida na produção de soja de alto rendimento, se produziram em média, 10,8 MJ de energia na forma de grãos desta cultura. Os principais gastos energéticos foram com sementes, fertilizantes, herbicidas e combustível. Para cada 1 kg de grãos produzidos de soja são emitidos respectivamente 0,17 kg de CO₂eq durante seus ciclos de produção e entrega no armazém. Sendo as principais fontes de emissão de CO₂eq à atmosfera o fertilizantes fosfatado, fertilizante potássico e sementes.

Palavras-chave: *Glycine max*, Eficiência do uso do nitrogênio, Abundancia natural de ^{15}N .

ABSTRACT

SILVA, Elderson Pereira da. **Contribution of Biological Nitrogen Fixation, Estimation of Energy Efficiency and CO₂eq Emissions in High Soybean Productivity Areas in Brazil.** 2022. 60 p. Dissertation (master in phytotechnics). Institute of Agronomy, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

With each passing year, soybeans have reached new records in grain productivity, reaching in some areas producing 120% more than the average soybean productivity in Brazil. These high yields ($> 4200 \text{ kg ha}^{-1}$) require a large amount of nitrogen in the system, which in Brazil is guaranteed almost exclusively by the biological fixation of N_2 from the air. Therefore, the objective of this project was to evaluate the contribution of FBN at the field level, using the technique of natural abundance of ^{15}N in areas of high soybean productivity in Rio Verde, GO (Chapter I), in addition to estimating the EE and GHG of some of these areas (Chapter II). To this end, 2 areas were evaluated in the 2019/2020 crop and 5 areas in the 2020/2021 crop with a history of high soybean productivity and/or that were champions of the National Maximum Productivity Challenge promoted by the Soja Brasil Strategic Committee. For the evaluation of BNF, each representative area was divided into 4 quadrants and within each quadrant a repetition was taken for each analyzed variable. The following variables were evaluated in Chapter I: crop index for nitrogen (ICN), contribution of FBN by the technique of natural abundance of ^{15}N , and the balance and gap of N. With regard to FBN, all areas evaluated with their respective varieties were able to supply the N demand by the crop, where FBN assumed values ranging from 67.05% to 82.11%. Regarding the N balance in the soil x plant system, all varieties showed a positive balance, where the highest value observed was $205.29 \text{ kg ha}^{-1}$ of N in the 2020/21 crop with the BMX Foco IPRO variety and the lowest value was 68.88 kg ha^{-1} of N for the BMX Voraz IPRO variety, confirming the efficiency of the inoculants used in the culture today. In Chapter II, the inputs and outputs of energy from agricultural operations and/or inputs used were calculated by multiplying the amount used by its calorific value or energy coefficient at each stage of production. Energy efficiency was obtained by the ratio between the amount of total energy output and the total energy consumption during the production process. The results showed that for every 1.0 MJ of energy consumed in the production of high-yield soybeans, an average of 10.8 MJ of energy was produced in the form of grains of this crop. The main energy expenditures were with seeds, fertilizers, herbicides and fuel. For every 1 kg of soy beans produced, respectively, 0.17 kg of CO₂eq are emitted during their production and warehouse delivery cycles. The main sources of CO₂eq emission to the atmosphere are phosphate fertilizers, potassium fertilizer and seeds.

Key words: *Glycine max*, Nitrogen use efficiency, ^{15}N natural abundance.

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema ilustrado da demarcação da área representativa dentro de cada fazenda (Foto adaptada de CESB 2018).....	21
Figura 2. separação em partes (hastes+folhas e vagens com grãos) e vagens sem grãos (casca) e grãos das 20 plantas de soja coletadas na fase R6 (Foto: Elderson Silva).....	22

Lista de Tabelas

Tabela 1. Localização, tamanho da área e produtividade média de grãos de soja das áreas avaliadas na safra 2019/2020 e 2020/2021.....	20
Tabela 2. Nitrogênio, fósforo e potássio via fertilizantes e gastos de sementes, calcário, adubo orgânico e inoculantes nas áreas de soja avaliadas na safra 2019/2020.....	20
Tabela 3. Produtividade de grãos, acumulação de N na parte aérea (R8) e N exportado nos grãos das plantas de soja, e índice de colheita de N para a parte aérea da planta (ICN), na safra 2019/2020 (duas áreas avaliadas) e 2020/2021 (cinco áreas).....	27
Tabela 4. Porcentagem e quantidade de N derivado da fixação biológica de nitrogênio (FBN) na cultura da soja, na safra 2019/2020 (duas áreas) e na safra 2020/21 (cinco áreas).....	28
Tabela 5. Quantificação do balanço de N (kg ha^{-1}) para o sistema, calculado pela diferença entre a entrada de N (fertilizante e FBN em kg ha^{-1}) e a saída (produtos colhidos e perdas de N em kg ha^{-1}) nas safras 2019/20 e 2020/21, Rio Verde - GO.....	28
Tabela 6. Localização, tamanho da área e produtividade média de grãos de soja das áreas avaliadas.....	45
Tabela 7. Principais coeficientes energéticos utilizados na estimativa do consumo de energia pelas lavouras analisadas.....	46
Tabela 8. Coeficientes energéticos utilizados para calcular os gastos de energia com herbicidas e defensivos agrícolas para o controle de pragas e doenças nas culturas avaliadas deste estudo.....	47
Tabela 9. Tratores, máquinas e implementos agrícolas utilizados nas propriedades de soja avaliadas, expondo sua potência (P), indicador operacional (IO) e consumo estimado de diesel (CD).....	48
Tabela 10. Descrição das operações agrícolas realizadas nas propriedades produtoras de soja avaliadas.....	49
Tabela 11. Nitrogênio, fósforo e potássio via fertilizantes e gastos de sementes, calcário, adubo orgânico e inoculantes nas áreas de soja avaliadas.....	50
Tabela 12. Herbicidas (HE), inseticidas, fungicidas, óleo mineral e adjuvantes e fertilizantes biológicos e foliares utilizados no cultivo das áreas avaliadas de soja.....	50
Tabela 13. Energia total consumida (MJ ha^{-1}) (TEC), energia total produzida (MJ ha^{-1}) (TEP) (b) e eficiência energética (EE) na fase agrícola das áreas de soja avaliadas.....	54
Tabela 14. Contribuição percentual dos principais gastos energéticos na etapa agrícola das áreas avaliadas de produção de soja.....	55
Tabela 15. Estimativa das emissões de GEE nas diferentes fontes de emissão das áreas de alto rendimento de soja avaliadas.....	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	07
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	09
2.1 A cultura da soja no Brasil.....	09
2.2 Fixação biológica de N na cultura da soja.....	09
2.3 Eficiência energética.....	13
3. CAPÍTULO I.....	14
3.1 Resumo.....	15
3.2 Abstract.....	16
4. Introdução.....	17
5. Material e Métodos.....	18
5.1 Quantificação da FBN.....	20
5.2 Produtividade de grãos.....	21
6. Resultados e Discussão.....	23
6.1 Produtividade e índice de colheita para o nitrogênio.....	23
6.2 Fixação biológica de nitrogênio.....	24
6.3 Balanço de nitrogênio.....	25
7. Conclusão.....	27
8. Referências Bibliográficas.....	28
9. CAPÍTULO II.....	37
9.1 Resumo.....	38
9.2 Abstract.....	39
10. Introdução.....	40
11. Material e Métodos.....	42
12. Resultados e Discussão.....	51
13. Conclusão.....	56
14. Considerações Finais.....	56
15. Referências Bibliográficas.....	57

1. INTRODUÇÃO GERAL

Na safra 2020/2021 o Brasil foi o maior produtor de soja do mundo (135,409 Mt), superando os Estados Unidos da América (112,549 Mt) (CONAB, 2021; USDA, 2021). Na mesma safra, a cultura da soja ocupou uma área de 38,502 milhões de hectares, alcançando uma produtividade média nacional de 3.517 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021).

Dados do CESB (Comitê Estratégico Soja Brasil, 2021), mostram que os produtores brasileiros de soja, tem potencial de superar em muitas vezes o valor da média nacional de produtividade que vem sendo alcançada em tempos recentes. O incremento na produtividade nos últimos treze anos (2008 a 2021), alcançado pelos participantes do desafio de máxima produtividade do CESB, aumentou de 4.980 kg ha⁻¹, do primeiro campeão em 2008, para 7.749,6 kg ha⁻¹, o mais recente vencedor (CESB, 2021). Isso demonstra o potencial produtivo da cultura da soja, aliado à força e à coragem dos produtores, à ciência e tecnologia, às boas práticas agrícolas, ao bom uso da biodiversidade e à competência da cadeia como um todo (CESB, 2021). Esta mais alta produtividade de soja registrada no desafio do CESB representa um acréscimo de 120% sobre a produtividade média da soja no Brasil ao longo de dez anos (CESB, 2021).

De acordo com Hungria et al. (2006) e Zuffo et al. (2019) os avanços dos programas de melhoramento da cultura da soja, associados com a seleção de estirpes de *Bradyrhizobium* adaptadas às condições brasileiras, usadas em inoculantes, permitiram substituir quase que totalmente o uso de fertilizantes nitrogenados através da FBN, estando entre os principais fatores que contribuíram para a expansão da cadeia produtiva e aumento da produtividade da soja no Brasil (ALVES et al., 2003).

As estirpes bacterianas recomendadas para inoculação da cultura da soja mais usadas no Brasil são SEMIA 5079, da espécie *Bradyrhizonium japonicum*, SEMIA 5080, da espécie *Bradyrhizonium diazoefficiens*, e SEMIA 587 e SEMIA 5019, da espécie *Bradyrhizobium elkanii* (MENDES et al., 2014; ZAMBON, 2020). Devido à elevada eficiência já demonstrada por todas essas estirpes, mesmo se passando quase 40 anos após a recomendação da primeira estirpe (SEMIA 5079), a pesquisa ainda disponibiliza tais bactérias para a indústria, que utiliza quaisquer combinações aos pares para a composição do produto comercial (inoculante).

Sendo assim, existe a necessidade de verificar qual o rendimento da FBN nessas áreas de alta produtividade de soja no Brasil, tendo em conta que o processo deve prover suficiente quantidade de N para compensar o exportado nos grãos colhidos, fechando um balanço de N no sistema solo-planta neutro ou positivo. Tais trabalhos nessa conjuntura ainda são escassos no Brasil e precisam ser realizados usando a técnica da abundância natural de ¹⁵N para determinar com exatidão o N na planta derivado da FBN (PAUFERRO et al., 2010).

Além do exposto, para atingir essas altas produtividades pelos produtores brasileiros ($> 4200 \text{ kg ha}^{-1}$) estão associadas técnicas dependentes do consumo de energia, principalmente da queima de combustíveis fósseis, resultando em quantidades significativas de emissão de CO_2 para a atmosfera.

A avaliação da eficiência energética (EE) tem como objetivo determinar os pontos de estrangulamento energético dos sistemas de cultivo adotados, visando à busca por tecnologias poupadoras de energia, que substituam aquelas de maior intensidade energética de origem fóssil (combustível, fertilizante, defensivos agrícolas, energia despendida na fabricação das máquinas e implementos, etc.) (CAMPOS; CAMPOS, 2004; CUNHA et al., 2015). Diante disso, tais estudos de EE tornam-se uma excelente ferramenta de indicação da sustentabilidade dos sistemas agropecuários (GUARESCHI et al., 2019).

Não somente a avaliação da EE mas também a contabilidade das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) podem trazer uma melhor dimensão de impacto do sistema de produção dentro das questões ambientais mais urgentes. Pode-se perceber ao longo do ciclo de vida da cultura da soja, os fatores que auxiliam na degradação ambiental e assim propor técnicas e/ou práticas que venham minimizar ou suprimir estes fatores negativos, contribuindo assim, para a formação de uma cadeia de produção destas culturas mais sustentável (GUARESCHI et al., 2019).

Pelo exposto, pretende-se com este trabalho responder algumas questões que envolvem a cultura da soja e a perspectiva de incremento de produtividade no futuro. Seria a contribuição da FBN em áreas de alta produtividade, suficiente para compensar as exportações de N nos grãos colhidos? Em adição a essa possibilidade, o balanço energético seria melhorado para a cultura, com mitigação dos custos em energia fóssil e em emissões de GEE?

Para tanto, essa dissertação foi dividida em dois capítulos, o primeiro sobre a contribuição da FBN em áreas de alta produtividade com a hipótese de que os inoculantes de *Bradyrhizonium* recomendados à cultura da soja brasileira garantem suficiente suprimento de N para a soja de altos rendimentos. Já o segundo capítulo é sobre a eficiência energética e emissões de CO_2eq na cultura da soja com a hipótese: balanço energético na cultura da soja pode indicar maior sustentabilidade quanto maior a contribuição da FBN, com reflexo nas emissões de CO_2eq .

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura da Soja no Brasil

A soja é uma das mais importantes culturas na economia mundial. No Brasil, o primeiro relato sobre o surgimento da soja através de seu cultivo é de 1882, no estado da Bahia (BLACK, 2000). Em seguida, foi levada por imigrantes japoneses para São Paulo, e somente em 1914, a mesma foi introduzida no estado do Rio Grande do Sul, sendo este por fim, o lugar onde as variedades trazidas dos Estados Unidos, melhor se adaptaram às condições edafoclimáticas, principalmente em relação ao fotoperíodo (BONETTI, 1981).

A soja é uma das maiores fontes de proteína e óleo (CIAMPITTI; SALVAGIOTTI, 2018). Além do uso *in natura* como alimento funcional, a soja é matéria prima para produção de temperos prontos, massas, chocolate, alimentos dietéticos, leitos e sucos de fruta a base de soja, entre outros. Alguns exemplos de produtos oriundos do óleo extraído da soja são: óleo de cozinha, margarinas, temperos para salada, maionese e gordura vegetal.

Apresentando cerca de 44 a 46% de proteína no grão, a soja é também utilizada na alimentação animal, tanto para bovinos, suínos e aves (HUNGRIA et al., 2006), e a transformação de sua proteína vegetal em proteína animal é de suma importância a nível mundial. Os grãos de soja também são interessantes para alimentação humana, já que possuem aminoácidos essenciais e tem menor custo comparado com outras fontes de proteína (CARRERA et al., 2011). Além de todas essas utilizações para a soja, o óleo de soja ainda é a principal matéria-prima para a produção de biodiesel.

Dados do CESB (2021), mostram que os produtores brasileiros de soja, tem potencial de superar em muitas vezes o valor da média nacional de produtividade. O incremento na produtividade nos últimos treze anos (2008 a 2021), alcançado pelos participantes do desafio de máxima produtividade do CESB (Comitê Estratégico Soja Brasil) saiu de 4.980 kg ha⁻¹, do primeiro campeão em 2008, para 7.749,68 kg ha⁻¹, o mais recente vencedor (CESB, 2021). Isso demonstra o potencial produtivo da cultura da soja, aliado à ciência e tecnologia, às boas práticas agrícolas, e à competência da cadeia como um todo (CESB, 2018). Esta mais alta produtividade de soja registrada no desafio do CESB representa um acréscimo de 120% sobre a produtividade média da soja no Brasil ao longo de dez anos (CESB, 2018).

2.2 Fixação Biológica de N na Cultura da Soja

O N é o elemento exigido em maior quantidade pela cultura da soja, já que seus grãos são ricos em proteínas apresentando um teor médio de 6,5% de N, o que torna o elemento peça chave na busca de altos rendimentos (HUNGRIA et al., 2001; ZAMBON, 2020). Nesse sentido, as exigências

nutricionais para altas produtividades de soja são elevadas, principalmente o nitrogênio, onde para se produzir 1 tonelada de grãos de soja são necessários 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio, sendo que o maior aporte será fornecido via FBN (SALVAGIOTTI et al., 2008; CESB, 2021). Para se ter uma base, para uma produtividade de 7.749,68 kg ha⁻¹ de soja, aponta pelo CESB (2021), são necessários 619 kg ha⁻¹ de N. Diante desse alto requerimento de N, a de se preocupar com o balanço de N que a soja acarreta no sistema solo-planta, o que de acordo com Urquiaga et al. (2006) esse balanço de N dependendo do manejo do solo pode ser negativo, ou seja, o cultivo de soja pode exportar mais nitrogênio em seus grãos do que recebe através da FBN.

A soja é uma planta nodulífera que pertence a família das Fabáceas. Suas raízes, além de exercerem as funções normais (ancoragem física, absorção de água e elementos minerais em solução), podem estabelecer relação simbiótica com espécies de bactérias capazes de fixar o nitrogênio molecular presente no ar (CÂMARA, 2014).

No trabalho de Alves et al. (2006) ao avaliar em condições de campo o cultivo da soja em um Latossolo Vermelho distroférrico, sob plantio direto, em Dourados, MS constataram que em dois anos de avaliação, a FBN foi superior a 80% do N nas plantas de soja, o que resultou em alta produtividade e em balanço positivo de N para o solo. Semelhantemente, experimentos realizados por três anos no estado do Paraná (PR) revelaram que até 80% do N extraído por dois cultivares de soja foram oriundos da FBN (HUNGRIA et al., 2006).

Estes trabalhos de Alves et al. (2006) e Hungria et al. (2006) eram os resultados mais recentes encontrados na literatura brasileira sobre a avaliação da FBN realizada a nível de campo na cultura da soja. No entanto, Zilli et al. (2021) trouxeram dados mais recentes, onde foi avaliada a FBN da soja na fronteira agrícola na savana amazônica e os resultados obtidos através da técnica da abundância natural de ¹⁵N confirmaram a alta contribuição da fixação de N₂ nos últimos 14 anos, na qual as plantas inoculadas apresentaram FBN variando de 84 a 90%. Nesse tempo já surgiram novos genótipos e tecnologias que aumentaram o potencial produtivo da soja. Por exemplo, as produtividades de soja alcançadas no trabalho de Alves et al. (2006) foram de no máximo 3553 kg ha⁻¹, o que está abaixo do que atualmente é considerado alta produtividade de soja (4200 kg ha⁻¹) (SAKO et al., 2016; CESB, 2021).

De acordo com Salvagiotti et al. (2008) em um estudo de revisão, resumindo 108 artigos científicos publicados de 1966 a 2006, documentaram que a “lacuna de N” tende a aumentar em áreas de alto rendimento, já que a demanda em N é maior e a tendência de se obter um balanço negativo também aumenta. A “lacuna de N” é um termo utilizado para abordar o N extraído pela cultura da soja não oriundo da FBN (ZAMBON, 2020). Para Ciampitti & Salvagiotti, (2018) a lacuna de N aumenta consideravelmente quando a extração total das plantas foi maior que 370 kg N ha⁻¹,

sugerindo a necessidade de fontes adicionais para o suprimento de N para a cultura da soja (CIAMPITTI & SALVAGIOTTI, 2018).

Neste estudo de revisão de Ciampitti & Salvagiotti (2018) voltado para rendimento de grãos, contribuição da FBN (%) e absorção de N pelas plantas, analisaram dados de 60 estudos conduzidos no período de 1955 a 2017 com a cultura da soja em diferentes países do mundo. Os autores encontraram média geral para o balanço parcial de N de -47 kg N ha^{-1} . Nas áreas com eficiência da FBN em torno de 0-44%, o balanço foi ainda mais negativo ($-100 \text{ kg N ha}^{-1}$), sendo que somente 3% dos locais estudados tiveram balanço positivo de N. Ainda neste estudo de Ciampitti & Salvagiotti (2018) o cenário muda em locais onde a eficiência da FBN é superior a 72%: A média do balanço parcial de N foi de $-3.4 \text{ kg N ha}^{-1}$, e 40% das observações tiveram balanço parcial positivo, incluindo o Brasil. Disto deduz-se que a media dos resultados deste estudo não aplicam ao Brasil, onde a contribuição da FBN em soja comercial supera os 80% (ALVES et al., 2006 e HUNGRIA et al., 2006).

Nestes trabalhos de Salvagiotti et al. (2008) e Ciampitti & Salvagiotti (2018) sugerem que a contribuição da FBN não é suficiente para suprir a soja de alto rendimento ($> 7 \text{ Mg ha}^{-1}$). No entanto, ainda não existem estudos a campo em diferentes regiões do mundo que permita dizer com propriedade se a FBN sozinha pode fornecer N para uma soja de alto rendimento, mantendo um balanço de N no sistema solo-planta parcialmente neutro.

Sendo assim, tem-se a necessidade de verificar qual o rendimento da FBN nessas áreas de alta produtividade de soja no Brasil, visando atualizar se a soja brasileira nestas condições, estaria fechando um balanço de N no sistema solo-planta, neutro, positivo ou negativo. Tais trabalhos nessa conjuntura ainda são escassos no Brasil e precisam ser realizados usando a técnica da abundância natural de ^{15}N para determinar com exatidão a abundância de ^{15}N do N derivado da FBN (PAUFERRO et al., 2010).

Para que se possa avaliar com precisão a contribuição da FBN na cultura da cana-de-açúcar é necessário o uso de técnicas específicas, tais como as técnicas isotópicas de ^{15}N , incluindo a diluição isotópica e a abundância natural de ^{15}N (UNKOVICH et al., 2008). A composição do ar atmosférico apresenta aproximadamente 78% de N na forma elementar (N_2), o que não é disponível diretamente para as plantas (UNKOVICH et al., 2008). Este N presente no ar atmosférico é composto por diferentes isótopos, sendo os principais e mais estáveis, com abundância constante, o isótopo ^{14}N com 99,6337% de átomos e o isótopo ^{15}N com 0,3663% (MARIOTTI, 1983). A diferença no peso atômico dos dois isótopos estáveis de N (^{14}N e ^{15}N) resulta na discriminação isotópica durante as transformações envolvidas na dinâmica do N no sistema solo-planta durante o processo de formação do solo. Essa discriminação isotópica torna o solo e os tecidos das plantas que absorvem N disponível

no solo, levemente enriquecidos com o isótopo ^{15}N , em comparação à abundância natural dos dois isótopos no ar atmosférico (SHEARER & KOHL, 1986). No entanto, este enriquecimento ocorre em valores extremamente pequenos, expressos em unidades de $\delta^{15}\text{N}$. Cada unidade $\delta^{15}\text{N}$ é convencionalmente o resultado da divisão da abundância natural do isótopo ^{15}N (0,3663% átomos ^{15}N) por 1.000, ou seja uma unidade de $\delta^{15}\text{N}$ apresenta 0,0003663% átomos de ^{15}N acima da abundância natural de ^{15}N (BODDEY et al., 2001; UNKOVICH et al., 2008).

As espécies vegetais sem sistema de fixação de N_2 do ar ou com baixa eficiência para a FBN, ou seja, que se suprem quase inteiramente do N disponível do solo, apresentarão valores de delta ^{15}N similares aos do N disponível no solo. De modo contrário, espécies vegetais capazes de obter o N derivado do N_2 atmosférico via FBN apresentarão valores de delta ^{15}N menores por ter o N derivado do solo diluído com o N derivado do ar, o qual apresenta convencionalmente valor de delta ^{15}N igual a zero. Dessa forma, quanto mais as plantas obtém N do ar via FBN menores serão os valores de delta ^{15}N em seus tecidos, ou seja, mais próximos de 0,3663%, que é a abundância natural de ^{15}N no ar atmosférico (URQUIAGA et al., 2012). Para aplicação da técnica de abundância natural de ^{15}N para a quantificação do N derivado do processo de FBN, há a necessidade que as plantas fixadoras e não fixadoras absorvam N do solo com a mesma marcação de ^{15}N . Para o qual é essencial que as plantas apresentem similar desenvolvimento radicular no perfil do solo e que apresentem similar marcha de acumulação de N (SHEARER & KOHL, 1986; BODDEY et al., 2001).

O N derivado da FBN é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$\% \text{Ndfa} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{PNF}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{PF}}}{\delta^{15}\text{N}_{\text{PNF}} - B}$$

$\delta^{15}\text{N}_{\text{PNF}}$ – Valor de delta ^{15}N do solo obtido das plantas controle não fixadoras, utilizadas como referência.

$\delta^{15}\text{N}_{\text{PF}}$ – Valor de delta ^{15}N da planta teste fixadora de N_2 (soja).

B – Valor da discriminação isotópica de ^{15}N realizado pelas plantas no processo de FBN, no caso da soja o valor é igual a -2,61 (BODDEY et al., 2001, PAUFERRO et al, 2010, ARAUJO et al., 2019)

Por fim, diante o exposto, percebe-se que atualmente torna-se prioridade na pesquisa buscar uma melhor compreensão da dinâmica do N nas interações solo $\times$ planta $\times$ rizóbio em sistemas de soja de alto rendimento, pois atualmente é difícil ter estudos de campo que determinem o N derivado do FBN na soja que produza mais de 4200 kg ha⁻¹.

2.3 Eficiência Energética

A eficiência energética trata do desempenho de conversão de um sistema. De outra forma: O quanto de energia gerada está sendo realmente consumida, considerando as perdas que ocorrem no processo. Quanto maior forem as perdas, menor será a eficiência.

O aumento da eficiência ocorre por meio de ações que modificam e melhoram as tecnologias de equipamentos e dispositivos que convertem energia devendo reduzir impactos ambientais, principalmente as taxas de emissões de dióxido de carbono.

Para viabilizar uma alternativa renovável de combustível é imperativo um estudo completo do balanço energético de toda cadeia de produção, a fim de verificar se toda a energia não renovável investida nos processos agrícolas, industriais e na logística de transporte é efetivamente menor que a energia final obtida, ou seja, se existe sustentabilidade energética do programa (BRASIL, 2006a).

Embora seja positivo, o balanço energético para a cultura da soja não oferece a possibilidade de obter grandes quantidades de energia renovável a partir dessa fonte. A pesquisa ainda precisa avançar, tanto na tecnologia agrônômica de produção quanto no desenvolvimento de novas variedades adaptadas para maior produção de grãos.

De acordo com Lisboa (2016) os rizóbios são um dos grupos mais estudados pela ciência e devido a isto já foram desenvolvidas tecnologias apropriadas para seu uso. A partir destas pesquisas se desenvolveram inoculantes específicos por culturas o que viabilizou seus cultivos. Exemplo é a cultura da soja, que tem alta demanda nutricional de nitrogênio e que tem sido totalmente suprida pela FBN.

De acordo com Hungria et al. (2013) não existem dados sobre a emissão de GEE relacionados aos inoculantes contendo rizóbios. No entanto, com base em demanda de insumos e gastos energéticos industriais estimou-se que 1 litro de inoculante corresponde a $8,76 \times 10^{-5}$ t de CO₂.

Pela análise dos dispêndios energéticos da produção de fertilizantes nitrogenados em comparação com a utilização da FBN, pode-se concluir que há ganhos em eficiência energética com adoção desta última tecnologia em vista da sua equivalência em termos de produtividade obtida.

CAPÍTULO I

Contribuição da Fixação biológica de nitrogênio em áreas de alta produtividade de soja na região do município de Rio Verde, GO

RESUMO

A cada ano que passa a soja vem atingindo novos recordes de produtividade de grãos, chegando em algumas áreas produzir 120% a mais do que a produtividade média da soja no Brasil. Essas altas produtividades (acima de 4200 kg ha⁻¹) exigem um grande aporte de nitrogênio (N) no sistema, o que no Brasil considera-se que seria garantido quase que exclusivamente pela fixação biológica de N (FBN). No Brasil, são poucos os trabalhos a nível de campo que tem avaliado a eficiência da FBN na cultura da soja, a pesar de ser a maior cultura agrícola nacional e também a de maior demanda de nitrogênio. O trabalho mais recente que avaliou a contribuição da FBN a nível de campo no Brasil em área de fronteira agrícola com a savana amazônica foi encontrado uma FBN entre 84 a 90%. Diante o exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a contribuição da FBN a nível de campo, usando a técnica da abundância natural de ¹⁵N em áreas de alta produtividade de soja em diferentes regiões produtoras no Brasil. Foram avaliados 2 áreas na safra 2019/2020 e 5 áreas na safra 2020/2021 com histórico de altas produtividades no município de Rio Verde – Go e/ou que foram campeãs do Desafio Nacional de Máxima Produtividade promovido pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB). Cada área representativa foi dividida em 4 quadrantes (~1 ha) e dentro de cada quadrante tomada uma repetição de amostragem para ser analisada, produtividade de grãos, estimativa do N oriundo da FBN e do total de N acumulado pela planta e balanço de N no sistema solo-planta. No que se refere a FBN, todas as áreas avaliadas com suas respectivas variedades foram capazes de suprir a demanda de N pela cultura, onde a FBN assumiu valores variando de 67,05% a 82,11%. Em relação ao balanço de N no sistema solo x planta, todas as variedades apresentaram balanço positivo, onde o maior valor observado foi de 205,29 kg ha⁻¹ de N na safra 2020/21 com a variedade BMX Foco IPRO e o menor valor foi de 68,88 kg ha⁻¹ de N para a variedade BMX Voraz IPRO, confirmando a eficiência dos inoculantes utilizados na cultura nos dias atuais.

Palavras-Chave: *Glycine max*, Eficiência do uso do nitrogênio, Abundancia natural de ¹⁵N, balanço de N na soja.

ABSTRACT

With each passing year, soybeans have reached new records in grain productivity, reaching in some areas producing 120% more than the average soybean productivity in Brazil. These high yields (above 4200 kg ha⁻¹) require a large input of nitrogen (N) in the system, which in Brazil is considered to be guaranteed almost exclusively by biological N fixation (BNF). In Brazil, there are few studies at the field level that have evaluated the efficiency of FBN in soybean, despite being the largest national agricultural crop and also the one with the greatest demand for nitrogen. The most recent work that evaluated the contribution of FBN at the field level in Brazil was published by Zilli et al (2021) in an agricultural frontier area with the Amazon savanna where a FBN between 84 to 90% was found. In view of the above, the objective of this work was to evaluate the contribution of BNF at field level, using the technique of natural abundance of ¹⁵N in areas of high soybean productivity in different producing regions in Brazil. Two areas were evaluated in the 2019/2020 harvest and 5 areas in the 2020/2021 harvest with a history of high yields in the municipality of Rio Verde - Go and/or that were champions of the National Maximum Productivity Challenge promoted by the Soja Brasil Strategic Committee (CESB) . Each representative area was divided into 4 quadrants (~1ha) and within each quadrant a repetition of sampling was taken to be analyzed, grain yield, estimation of N from FBN and total N accumulated by the plant and N balance in the system soil-plant. With regard to FBN, all areas evaluated with their respective varieties were able to supply the N demand by the crop, where FBN assumed values ranging from 67.05% to 82.11%. Regarding the N balance in the soil x plant system, all varieties showed a positive balance, where the highest value observed was 205.29 kg ha⁻¹ of N in the 2020/21 crop with the BMX Foco IPRO variety and the lowest value was 68.88 kg ha⁻¹ of N for the BMX Voraz IPRO variety, confirming the efficiency of the inoculants used in the culture today.

Key words: Glycine max, Nitrogen use efficiency, Natural abundance of ¹⁵N, N balance in soy.

4. INTRODUÇÃO

Dados do CESB (2021), mostram que os produtores brasileiros de soja, tem potencial de superar em muitas vezes o valor da média nacional de produtividade. O incremento na produtividade nos últimos dez anos (2008 a 2021), alcançado pelos participantes do desafio de máxima produtividade do CESB (Comitê Estratégico Soja Brasil) saiu de 4.980 kg ha⁻¹, do primeiro campeão em 2008, para 7.749,68 kg ha⁻¹, o mais recente vencedor (CESB, 2021). Isso demonstra o potencial produtivo da cultura da soja, aliado à ciência e tecnologia, às boas práticas agrícolas e à competência da cadeia como um todo (CESB, 2021). Esta mais alta produtividade de soja registrada no desafio do CESB representa um acréscimo de 120% sobre a produtividade média da soja no Brasil ao longo de 13 anos (CESB, 2021).

O N é o elemento exigido em maior quantidade pela cultura da soja, já que seus grãos são ricos em proteínas apresentando um teor médio de 6,5% de N, o que torna o elemento peça chave na busca de altos rendimentos (ZAMBON, 2020). Nesse sentido, as exigências nutricionais para altas produtividades de soja são elevadas, principalmente o nitrogênio, onde para se produzir 1 tonelada de grãos de soja são necessários 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio, sendo que o maior aporte será fornecido através da FBN (SALVAGIOTTI et al., 2008; CESB, 2018). Para se ter uma base, para uma produtividade de 7.749,68 kg ha⁻¹ de soja, aponta pelo CESB (2021), são necessários 619 kg ha⁻¹ de N. Diante esse alto requerimento de N, a de se preocupar com o balanço de N que a soja acarreta no sistema solo-planta, o que de acordo com Urquiaga et al. (2006) esse balanço de N dependendo do manejo do solo pode ser negativo, ou seja, o cultivo de soja pode exportar mais nitrogênio em seus grãos do que recebe da FBN.

Sendo assim, existe a necessidade de verificar qual o rendimento da FBN nessas áreas de alta produtividade de soja no Brasil, para saber se a soja brasileira nestas condições, estaria fechando um balanço de N no sistema solo-planta, neutro, positivo ou negativo, para orientar o adequado manejo. Tais trabalhos nessa conjuntura ainda são escassos no Brasil e precisam ser realizados usando a técnica da abundância natural de ¹⁵N para determinar com exatidão a abundância de ¹⁵N do N derivado da FBN (PAUFERRO et al., 2010). Desta forma, o objetivo deste capítulo foi avaliar a contribuição da FBN a nível de campo, usando a técnica da abundância natural de ¹⁵N em área de altos rendimentos de soja no município de Rio Verde – Goiás.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Escolha das Áreas

O estudo foi conduzido na safra 2019/20, quando foram avaliadas duas áreas de produtores incritos no CESB, além de cinco áreas na safra 2020/21, todas de alta produtividade de soja no município de Rio Verde - GO (Tabela 1).

Tabela 1. Localização, tamanho da área e produtividade média de grãos de soja das áreas avaliadas na safra 2019/2020 e 2020/2021.

*ID	Cidade / Estado	Tamanho da área (ha)	Produtividade média (kg ha ⁻¹)
Safra 2019/20			
1	Rio Verde – GO	2,5	5.040,00
2	Rio Verde – GO	2,5	4.200,00
Safra 2020/21			
3	Rio Verde – GO	2,5	4.984,96
4	Rio Verde – GO	2,5	4.461,41
5	Rio Verde – GO	2,5	4.918,79
6	Rio Verde – GO	2,5	4.783,48
7	Rio Verde – GO	2,5	4.540,54

*Números de Identificação das áreas utilizadas no decorrer do texto.

Na Tabela 2, destacam-se alguns dos insumos aplicados nas áreas avaliadas na safra 2019/2020.

Tabela 2. Nitrogênio, fósforo e potássio via fertilizantes e gastos de sementes, calcário, adubo orgânico e inoculantes nas áreas de soja avaliadas na safra 2019/2020

Cidade / Estado	N	*P ₂ O ₅	*K ₂ O	Calcário	Sementes ²	Inoculantes
	----- kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----					Doses (250g)
Rio Verde-GO a	8	56	76	2430	75	4
Rio Verde-GO b	8	56	76	2430	75	4

* Para converter as quantidades de P₂O₅ e K₂O aplicadas em P e K, multiplica-se respectivamente pelos índices 0,436 e 0,830. ² A variedade de soja utilizada nas áreas avaliadas foi a DM 73i75 IPRO e BMX Foco IPRO respectivamente em Rio Verde-GO.

Dentro de cada propriedade indicada pelo CESB nas diferentes regiões produtoras de soja, foi demarcada e georreferenciada a área de estudo (a qual tem o histórico de alta produtividade de soja). Sendo assim, dentro de cada propriedade, essa área representativa foi dividida em 4 quadrantes e cada um desses quadrantes foi considerado como uma repetição para cada variável

analisada. A massa de matéria seca acumulada pela parte aérea das plantas em R6 foi estimada pela amostragem de 20 plantas coletadas em zigue-zague, ao acaso, em cada quadrante (Figura 1). Após a coleta, as plantas foram separadas em partes (hastes+folhas, vagens e grãos) (Figura 2 a,b) e pesadas e depois encaminhadas para a determinação da matéria seca (estufa a 65°C por 72). As amostras dos materiais colhidos foram moídas e analisadas quanto ao conteúdo de N total e abundância natural de ^{15}N .



Figura 1. Esquema ilustrado da demarcação da área representativa dentro de cada fazenda, indicando também a divisão da área representativa em quadrantes que representaram as repetições. Também pode ser observado um exemplo da coleta em zig-zag das 20 plantas coletadas na fase R6 da soja em cada quadrante. Fonte: Adaptado de CESB (2018).

a)



b)



Figura 2. Ilustração da separação em partes (hastes+folhas e vagens com grãos) (a) e vagens sem grãos (casca) e grãos (b) das 20 plantas de soja coletadas na fase R6.

5.2 Quantificação da Fixação Biológica de Nitrogênio

A contribuição da FBN foi quantificada, pela técnica da abundância natural de ^{15}N (Shearer & Kohl, 1986). Para esta análise, também foram utilizadas as plantas coletadas no estágio fenológico R6 (enchimento de grãos). Além das amostras da parte aérea das plantas de soja, obtidas no estágio R6, espécies espontâneas, não-leguminosas, também foram coletadas das mesmas áreas para serem utilizadas como referência da abundância natural de ^{15}N do N disponível no solo. O material colhido foi seco a 65°C , moído e analisado para abundância natural de ^{15}N (OKITO et al., 2004). A porcentagem de N derivada da FBN na planta (%FBN) foi calculada pela fórmula:

$$\%FBN = [(\delta^{15}N_c - \delta^{15}N_s) / \delta^{15}N_c - B]100$$

Em que $\delta^{15}N_c$ e $\delta^{15}N_s$ correspondem aos valores de abundância natural de ^{15}N das plantas controle e da soja, respectivamente; e B é uma constante relacionada ao processo de discriminação isotópica de ^{15}N pelo processo da FBN, aqui considerada como sendo de -2,61 deltas (BODDEY et al., 2001, PAUFERRO et al, 2010, ARAUJO et al 2019). A quantidade total de N na planta derivada da FBN foi calculada pela multiplicação da %FBN/100 pelo total de N acumulado pela planta.

Quando não foi possível coletar espécies de plantas de crescimento espontâneo, não-leguminosas nas áreas, foi necessário coletar amostras de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Pois para ganhar precisão e exatidão na quantificação da contribuição da FBN na nutrição nitrogenada da soja, é necessário ser feito um estudo adicional em casa de vegetação para medir abundância natural de ^{15}N do N disponível do solo em estudo, seguindo a metodologia descrita por Ledgard et al. (1984) e Baptista et al. (2014). Para isso foram cultivadas 3 espécies de plantas controle não fixadoras (sorgo, milheto e braquiária), cuja marcação em ^{15}N representará a abundancia natural de ^{15}N do N disponível do solo.

O solo utilizado foi o mesmo da área avaliada sendo seco ao ar livre e peneirado em malha de 2 mm. Depois de peneirar o solo, uma amostra de 400 g de solo foi colocada em recipientes plásticos de 500 mL. O solo recebeu a mesma adubação aplicada no cultivo da soja, porém sem N-fertilizante. O esquema experimental em casa de vegetação foi composto de 2 profundidades de solo (0-20 e 20-40 cm) x 3 plantas testemunhas (brachiaria, milheto e sorgo) x 3 repetições. Em seguida foram semeadas as três espécies de plantas controle não fixadoras separadamente, ou seja, cada recipiente com solo foi cultivado com apenas uma espécie controle. A semeadura foi feita utilizando-se entre 8 a 10 sementes por recipiente, deixando apenas seis plantas após desbaste que ocorreu na primeira semana após a germinação. As plantas controle cresceram até que as folhas apresentassem clorose, sinal de esgotamento do N disponível do solo. Em seguida a biomassa das plantas foram coletadas. Após secagem em estufa, as plantas foram pesadas e inicialmente trituradas em moinho tipo Wiley (2 mm) para depois serem finamente moídas em moinho de rolos. Em seguida foram feitas as determinações de N total segundo o método semi-micro-Kjeldahl e de $\delta^{15}N$ por meio de espectrometria de massas.

5.3 Produtividade de grãos

A produtividade de grãos ($kg\ ha^{-1}$) foi determinada mediante a colheita de $4,5\ m^2$ em cada quadrante, com o resultado estimado em $Mg\ ha^{-1}$ de grãos a 13% de umidade. Também foi

calculado o índice de colheita (IC) (massa de grãos por planta / massa seca da planta) e o índice de colheita para nitrogênio (ICN). O ICN foi calculado pela relação entre o montante de N exportado pelos grãos na colheita em R8 e o acúmulo total de N na parte aérea das plantas na fase de maior acúmulo de N (R6).

Através da estimativa do N oriundo da FBN, foi calculado o balanço e a suficiência de N. No cálculo do balanço de N para a soja (ΔN), é considerado o total de N acumulado pela cultura (QNC), a porcentagem do N acumulado na planta derivado da FBN (%FBN) e o total de N existente nos grãos colhidos (QNg): $\Delta N = [(QNC \times \%FBN)/100] - QNg$. Sendo assim, o balanço final de N foi determinado subtraindo o máximo montante de N oriundo da FBN pelo total de N exportado pelos grãos em $kg\ ha^{-1}$. Já a suficiência de N foi calculada pela subtração do acúmulo total de N na planta em R6 pelo total de N derivado da FBN (CIAMPITTI; SALVAGIOTTI, 2018).

Também foi realizada a coleta de amostras de solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, para análises químicas de macro e micronutrientes, bem como, caracterização da granulometria do solo (EMBRAPA, 1997). Além disso, foi coletado todas as informações de manejo do solo e das plantas, quantidade de insumos aplicados e quando possível um histórico de cultivo da área amostrada.

A pesquisa é do tipo exploratória e segue as orientações metodológicas que contemplam estudos de casos múltiplos, ou seja, as áreas escolhidas são diferenciadas pelos sistemas de produção adotados, o que concebe a não generalização de seus resultados, mas como suporte e ferramenta para outros estudos, já que não são considerados “unidades de amostragem” (FERREIRA et al., 2014). Diante disso, em cada uma das áreas avaliadas, foi realizada uma estatística descritiva de todos os resultados, obtendo-se a média e desvio padrão.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Produtividade e índice de colheita para nitrogênio

A produtividade encontrada nas duas áreas avaliadas na safra 2019/20 foram de 4.200 kg ha⁻¹ com a variedade BMX Foco IPRO e de 5.040 kg ha⁻¹ com a variedade DM 73i75 IPRO. Já na safra 2020/2021, a mesma área com a variedade BMX Foco IPRO foi avaliada e apresentou uma produtividade de 4.984,96 kg ha⁻¹. Também foram avaliadas na safra 2020/21 outras 4 áreas, onde as produtividades encontradas foram 4.461,41 kg ha⁻¹, 4.918,79 kg ha⁻¹, 4.783,48 kg ha⁻¹ e 4.540,54 kg ha⁻¹ com as variedades NEO 710, BMX VORAZ e DM 73i75 IPRO, respectivamente, como se pode observar na Tabela 3.

No que se refere ao N total acumulado pelas plantas na safra 2019/20, as variedades BMX Foco IPRO e DM 73i75 IPRO apresentaram os valores de 604,20 kg ha⁻¹ e 541,88 kg ha⁻¹, respectivamente. Já no ano seguinte, a mesma área com a variedade BMX Foco IPRO apresentou um acúmulo total de N de 638,03 kg ha⁻¹, sendo o mesmo, próximo ao encontrado na mesma área na safra 2019/20. As novas áreas avaliadas na safra 2020/21 apresentaram os seguintes valores de N total acumulado na parte aérea das plantas 563,76 kg ha⁻¹, 472,51 kg ha⁻¹, 711,96 kg ha⁻¹ e 617,42 kg ha⁻¹, respectivamente, como se observa na Tabela 3.

Os valores de acúmulo total de N na parte aérea das plantas são altos devido a alta demanda da cultura pelo nutriente, onde somente nos grãos, pode chegar até a 6,5% de N. Nas áreas avaliadas na safra 2019/20, o N exportado pelos grãos da cultura foi um pouco acima de 50% para ambas as áreas. Já na safra 2020/21, os valores variam de 35,74% para a variedade NEO 710 a 56,47% para uma das áreas com a variedade DM 73i75 IPRO, como observado na Tabela 3. Esses valores são representados pelo índice de colheita da cultura (ICN), estimado pela relação entre o montante de N exportado pelos grãos na colheita e o acúmulo total de N na parte aérea das plantas em R8.

Esses valores são menores do que os encontrados na literatura em ambientes de alta produtividade (>4.200 kg ha⁻¹). Em um ambiente mais produtivo, BENDER et al., 2015 encontrou 86% de ICN. O elevado acúmulo de N nas vagens comparado a exportação pelos grãos sugere que considerável parte do N ficou retido nas cascas das vagens, fato que pode explicar o ICN inferior ao encontrado na literatura. É especialmente relevante observar os altos valores de ICN, pois justamente estes refletem geralmente altos valores de rendimento, onde se esperaria ter as melhores condições para determinar o potencial da FBN em cobrir a demanda de N da cultura, como também para melhor observar o efeito na lacuna de N do sistema produtor de soja.

Tabela 3. Produtividade de grãos, acumulação de N na parte aérea (R8) e N exportado nos grãos das plantas de soja, e índice de colheita de N para a parte aérea da planta (ICN), na safra 2019/2020 (duas áreas avaliadas) e 2020/2021 (cinco áreas).

Áreas	Variedade	Produtividade	N acumulado pela planta	N exportado nos grãos	ICN
		----- kg ha ⁻¹ -----			%
Safra 2019/2020					
Rio Verde – GO	BMX Foco IPRO	5040,00	604,20 (16,8)	331,94 (22,5)	54,87
Rio Verde – GO	DM 73i75 IPRO	4200,00	541,88 (17,7)	278,40 (16,1)	51,38
Safra 2020/2021					
Rio Verde – GO	BMX Foco IPRO	4984,96	638,03 (21,96)	269,26 (4,20)	41,51
Rio Verde – GO	NEO710 IPRO	4461,41	563,76 (5,35)	203,78 (15,68)	35,74
Rio Verde – GO	BMX Voraz IPRO	4918,79	472,51 (31,54)	269,76 (30,41)	58,93
Rio Verde – GO	DM 73i75 IPRO	4783,48	711,96 (28,85)	395,46 (37,33)	56,47
Rio Verde – GO	DM 73i75 IPRO	4540,54	617,42 (36,71)	287,00 (36,16)	47,01

(¹) Os números entre parênteses representam o desvio-padrão da média.

6.2 Fixação Biológica de Nitrogênio

Como podemos observar na Tabela 4, na safra 2019/20 as porcentagens de FBN para as duas áreas avaliadas foram de 82,11% para a variedade BMX Foco IPRO e de 79,28% para a variedade DM 73i75 IPRO. Esses valores correspondem, respectivamente, a 496,13 kg ha⁻¹ e 429,82 kg ha⁻¹ de N oriundo da FBN. No ano seguinte, safra 2020/21, a mesma área com a variedade BMX Foco IPRO apresentou uma FBN de 71%, que corresponde a um total de N acumulado pelas plantas de 401,07 kg ha⁻¹.

Além dessa área, na safra 2020/21 foram avaliadas 4 novas áreas em Rio Verde – GO que apresentaram valores de FBN variando entre 68,09% a 70,10%. Tais valores de FBN foram suficientes para suprir grande parte da demanda de N pela cultura da soja em seu ciclo, demonstrando que as estirpes basterianas utilizadas na inoculação, mesmo após 40 anos de utilização, ainda apresentam alta eficiência.

Tabela 4. Porcentagem e quantidade de N derivado da fixação biológica de nitrogênio (FBN) na cultura da soja, na safra 2019/2020 (duas áreas) e na safra 2020/21 (cinco áreas).

Variedades	FBN (%) ⁽²⁾	FBN kg ha ⁻¹
Safra 2019/2020		
BMX Foco IPRO	82,11 (0,57)	496,13 (16,47)
DM 73i75 IPRO	79,28 (1,82)	429,82 (21,73)
Safra 2020/2021		
BMX Foco IPRO	71,00 (2,17)	401,07 (9,04)
NEO710 IPRO	68,09 (2,99)	438,44 (24,53)
BMX Voraz IPRO	70,10 (1,44)	330,64 (27,50)
DM 73i75 IPRO	68,47 (4,82)	497,33 (12,26)
DM 73i75 IPRO	67,45 (2,90)	428,58 (28,44)

(1) Os números entre parênteses representam o desvio-padrão da média. (2) Foi utilizado um valor B de -2,606087 deltas para a estimativa da FBN.

6.3 Balanço de nitrogênio

Em função do bom desenvolvimento da cultura da soja, as quantidades de N derivadas da FBN foram elevadas, com variação entre 330 e 496,13 kg ha⁻¹ de nitrogênio (Tabela 4). Porém, os valores devem ter sido ainda maiores, uma vez que o N acumulado nas raízes não foi quantificado, e por isso seria mais correto considerar que o balanço foi parcial.

Tais números sugerem que o balanço parcial de N foi positivo mesmo não considerando a contribuição do N presente nas raízes. Através da subtração do N oriundo da FBN do total exportado pelos grãos, os valores variaram de +68,88 a +205,29 kg de N ha⁻¹ dependendo da variedade. A variedade que mais se destacou no balanço de N foi a BMX Foco IPRO, que na safra 2019/20 teve um balanço positivo de +172,19 kg ha⁻¹ e na safra 2020/21 apresentou um balanço positivo ainda maior, com +205,29 kg ha⁻¹ (Tabela 5).

Tabela 5. Quantificação do balanço de N (kg ha⁻¹) para o sistema, calculado pela diferença entre a entrada de N (fertilizante e FBN em kg ha⁻¹) e a saída (produtos colhidos e perdas de N em kg ha⁻¹) nas safras 2019/20 e 2020/21, Rio Verde - GO.

2020/21, R\$ Verde - CC:					
Áreas	Entrada (A)		Saída (B)		Balanço ⁽²⁾ (A-B)
	Fertilizante	FBN	Colheita	Perdas ⁽¹⁾	
Safra 2019/2020					
BMX Foco IPRO	8,0	496,13	331,94	0,0	172,19
DM 73i75 IPRO	8,0	429,82	278,40	0,0	159,42
Safra 2020/2021					

BMX Foco IPRO	8,0	401,07	203,78	0,0	205,29
NEO710 IPRO	8,0	438,44	269,26	0,0	177,18
BMX Voraz IPRO	8,0	330,64	269,76	0,0	68,88
DM 73i75 IPRO	8,0	466,55	381,31	0,0	93,24
DM 73i75 IPRO	8,0	428,58	287,00	0,0	149,58

(1)Considerou-se que são desprezíveis as perdas de N derivado da FBN até a colheita da soja. (2)valores positivos indicam ganho de N para o sistema, e negativos, perda.

O estudo do balanço parcial de N requer uma estimativa adequada da FBN, e é útil para estimar a magnitude da perda/ganho de N no sistema (LANDRISCINI et al., 2019). O balanço parcial negativo de N indica que a quantidade de N exportado na colheita dos grãos é maior do que o N fixado pela cultura, e assim pode ocorrer depleção de N no solo. Em contrapartida, balanço positivo relata uma situação na qual a fixação do N_2 excede a exportação de N nas sementes, e gera um balanço líquido positivo de N para o solo (CIAMPITTI; SALVAGIOTTI, 2019). Nas condições que esse estudo foi conduzido, a maior exportação de N pelos grãos na colheita aliado a eficiência ótima da FBN conferiram balanço positivo de N, sugerindo o incremento das reservas de N do solo.

7. CONCLUSÃO

No que se refere a FBN, todas as áreas avaliadas com suas respectivas variedades foram capazes de suprir a demanda de N pela cultura. Mesmo não tendo sido considerado o N acumulado pelas raízes, o balanço de N para as variedades de alta produtividade ($>4000 \text{ kg ha}^{-1}$) foi positivo, garantindo, inclusive um aporte acima de 100 kg N ha^{-1} para o solo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABURJAILE, S.B.; SILVA, M.P.; BATISTA, E.A.F.S. Pesquisa e caracterização da diversidade microbiana do solo, na região de São José do Buriti – MG, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa (cerrado) por plantações de eucalipto. *Equatorial Science*, 1, 2011.
- ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. *Plant Soil*. 252:1–9. 2003. doi:10.1023/A:1024191913296
- ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F.M.; HECKLER, J.C.; MACEDO, R.A.T. de; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S. Biological nitrogen fixation and nitrogen fertilizers in the nitrogen balance in soybean, corn and cotton. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.449-456, 2006.
- ALVES, B.J.R., SMITH, K.A., RILNER, A.F., CARDOSO, A.S., OLIVEIRA, W.R.D., JANTALIA, C.P., URQUIAGA, S., BODDEY, R.M. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. *Soil Biol Biochem* v. 46, p. 129-135, 2012.
- ALLEN, A.G.; CARDOSO, A.A.; WIATR, A.G.; MACHADO, C.M.D.; PATERLINIA, W.C.; BAKER, J. Influence of Intensive Agriculture on Dry Deposition of Aerosol Nutrients. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 21, 87-97, 2010.
- ANDRADE, E.M.; AQUINO, D.N.; CRISÓSTOMO, L.A.; RODRIGUES, J.O.; LOPES, F.B. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. *Ciência Rural*, 39, 88-95, 2009.
- ARAUJO, K.E.C., JÚNIOR, C.V.T., GUIMARÃES, A.P., SILVA, M.A., ALVES, B.J.R., URQUIAGA, S., BODDEY, R.M. Natural abundance of ¹⁵N of N derived from the atmosphere by different strains of *Bradyrhizobium* in symbiosis with soybean plants, 2019.
- BAIRD, C.; CANN, M. *Em Energia e Mudanças Climáticas; Química Ambiental*; 4ed, Porto Alegre: Bookman, 2011. cap. 6.
- BARNARD, R.; LEADLEY, P.W. Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, 2005.
- BARAL, H.; GUARIGUATA, M.R.; KEENANC, R.J. A proposed framework for assessing ecosystem goods and services from planted forests. *Ecosystem Services*, 22, 260–268, 2016.

BALIEIRO, F.C., FRANCO, A.A., PEREIRA, M.G., CAMPELLO, E.F.C., DIAS, L.E., DE FARIA, S.M. E ALVES, B.J.R. Dinâmica da serapilheira e transferência de nitrogênio ao solo em plantios de *Pseudosamanea guachapele* e *Eucalyptus grandis*. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.39, n.6, p.597-601, 2004.

23

BARRETO, P.A.B., GAMA-RODRIGUES, E.F., GAMA-RODRIGUES, A.C., BARROS, N.F. DE; ALVES, B.J.R., Fonseca, S. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. *Rev. Bras. Ci. Solo*, vol. 34, n. 3, pp. 735-745. 2010.

BARROS, F.M. Parametrização de modelos de mineralização do nitrogênio orgânico em solo tratado com água residuária da suinocultura. 2005, 80 f. (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosas, MG.

BERGERSEN, F.J.; PEOPLES, M.B.; TURNER, G.L. Isotopic discriminations during the accumulation of nitrogen by soybeans. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.15, p.407-420, 1988.

BEST, A.; ZHANG, L.; MCMAHON, T.; WESTERN, A.; VERTESSY, R. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. Murray-Darling Basin Commission and CSIRO.2003.

BODDEY, R.M.; POLIDORO, J.C.; RESENDE A.S.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Use of the ¹⁵N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N₂ fixation to grasses and cereals. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.28, n.9, p.889–895, 2001.

BOUWMAN, A.F., BOUWMAN, L.J.M., BATJES, N.H. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochem Cycles*, 16, 1080-1088, 2002.

BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R.; WOLF, B. The nitrogen cycle: A review of isotope effects and isotope modeling approaches. *Soil Biology & Biochemistry*, 105, 121-137, 2017.

BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, M.Z.; TRIVELIN, P.C.O.; JOURDAN, C.; SILVA, E.V.; PICCOLO, M.C.; TSAI, S.M.; GALIANA, A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil 2: Nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. *Forest Ecology and Management* 255, 3918–3930, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Plano Nacional de Agroenergia: 2006-2011. 2. Ed. Rev. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006a. 110 p.

CALDEIRA, M.V.W.; MARQUES, R.; SOARES, R.V.; BALBINOT, R. Quantificação de serrapilheira e de nutrientes – Floresta Ombrófila Mista Montana – Paraná. *Rev. Acad.*, Curitiba, 5,101-116, 2007.

CARVALHO JÚNIOR, V.N. Deposição atmosférica e composição química da água de chuva. *Rev. Tecnol.*, Fortaleza, 25, 61-71, 2004.

CARDOSO, E.L.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; FREITAS, D.A.F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no pantanal Sul-Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 613-622, 2011.

CHITRAGAR, A.A.; VASI, S.M.; NADUVINAMANI, S.; KATIGAR, A.J.; HULASOGI, T.I. Nutrients Detection in the Soil: Review Paper. *International Journal on Emerging Technologies*, 7, 257-260, 2016.

CORREA, R.S.; WHIFE, R.R.; WEATHERLEY, A.J. Risk of Nitrate Leaching from Two Soils Amended with Bi

CIAMPITTI, I.A.; SALVAGIOTTI, F. New Insights into Soybean Biological Nitrogen Fixation. *Agronomy Journal*, v.110, n.04, p. 1185-1196, 2018.

COOPER, J.E.; SCHERER, H.W. Nitrogen Fixation - cap. 16. In: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition), 389 – 408, 2012.

COMITÊ ESTRATÉGICO SOJA BRASIL (CESB). Soja: quebrando recordes. CESB: 10 anos de máxima produtividade. Sorocaba – SP: Basf, Bayer, Syngenta et al. 2018. 216 p.

CÓNSUL, J.M.D.; THIELE, D.; VESES, R.C.; BAIBICH, I.M.; DALLAGO, R.M. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. *Quimica Nova*, 27, 3, 432-440, 2004.

COUTINHO, R.P., URQUIAGA, S., BODDEY, R.M., ALVES, B.J.R., TORRES, A.Q.A., JANTALIA, C.P. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.45, n.2, p.195-203, fev. 2010.

DAVIDSON, E.A.; BUSTAMANTE, M.M.C.; PINTO, A.S. Emissions of Nitrous Oxide and Nitric Oxide from Soils of Native and Exotic Ecosystems of the Amazon and Cerrado Regions of Brazil. *The Scientific World*,1,312–319, 2001.

DAMASCENO, F. 2010. 122 f. (Mestre em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria.

DENK, T.R.A.; MOHN, J.; DECOCK, C.; LEWICKA-SZCZEBAK, D.; HARRIS, E.; HUNGRIA, M.; MENDES, I.C.; MERCANTE, F.M. Tecnologia de fixação biológica de nitrogênio com o feijoeiro: viabilidade em pequenas propriedades familiares e em propriedades tecnificadas. Documentos/ Embrapa Soja. 32 p. 2013. 25

EATON, W.D. Microbial and nutrient activity in soils from three diferente subtropical forest habitats in Belize, Central America before and during the transition from dry to wet season. *Applied Soil Ecology* 16, 219–227, 2001.

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global forest resources assessment 2015. 2016. How are the world's forests changing?

GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, 26, 2002.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; SANTOS, G.A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 893-901, 2005.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; VIANA, A.P.; SANTOS, G.A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1489-1499, 2008.

GONÇALVES, J.L.M. Recomendações de Adubação para Eucalyptus, Pinus e Espécies Típicas da Mata Atlântica. *Documentos Florestais*, Piracicaba, 15, 1 –23, 1995.

GALLOWAY, J. N.; ABER, J. D.; ERISMAN, J. W.; SEITZINGER, S. P.; HOWARTH, R. W.; COWLING, E. B.; COSBY, B. J. The nitrogen cascade. *BioScience*, 53, 341, 2003.

GAZOLA, R.N.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; DINALLI, R.P.; MORAES, M.L.T.; CELESTRINO, T.S.; SILVA, P.H.M.; DUPAS, E. Doses de N, P e K na cultura do eucalipto em solo originalmente sob Cerrado. *Ciências Agrárias*, 36, 1895-1912, 2015.

HE, Y.; YANG, S.; XU, J.; WANG, Y.; PENG, S. Ammonia Volatilization Losses from Paddy Fields under Controlled Irrigation with Different Drainage Treatments. *The Scientific World* 26 Journal, 2014.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; CRISPINO, C. C.; MORAES, J. Z.; SIBALDELLI, R. N.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science*, v. 86, n. 4, p. 927-939, 2006.

HUNGRIA, Mariangela. A fixação do nitrogênio como tecnologia de baixa emissão de carbono para as culturas do feijoeiro e da soja. Londrina: Embrapa, 2013.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual 2016. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf– Acesso em: 14 set. 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da extração vegetal e silvicultura. Rio de Janeiro, 30, 2015.

JESUS, G.L.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; HENRIQUES, E.P.; LIMA, V.C.; FERNANDES, L.V.; SOARES, E.M.B. Doses e Fontes de Nitrogênio na Produtividade do Eucalipto e nas Frações da Matéria Orgânica em Solo da Região do Cerrado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 201-214, 2012.

JOHNSON, D.W.; TURNER, J. Nitrogen budgets of forest ecosystems: A review. *Forest Ecology and Management*, 318, 370–379, 2014.

KRAPIVIN, V.F.; VAROTOSOS, C.A. Biogeochemical Cycles in Globalization and Sustainable Development. Praxix Publishing Ltda Chiclester, UK, 2008.

LISBOA, Bruno Brito. COMITÊ Gestor Estadual da Agricultura de Baixa Emissão de Carbono – CGE ABC/Rj. Fixação biológica de nitrogênio. Plano ABC. Porto Alegre: Secretaria da agricultura, pecuária e irrigação, 2016.

LEITÃO FILHO, Considerações sobre a florística de florestas tropicais e sub- tropicais do Brasil. *IPEF*, 35, 41-46, 1987.

LUVISOTTO, D.M. 2013. 108 f. (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo – Piracicaba.

MARIOTTI, A. Atmospheric nitrogen is a reliable standart for ¹⁵N natural abundance measurements. *Nature*, v.303, p.685–687, 1983.

MARQUES, A.J.; FILGUEIRA, C.A.L. A química atmosférica no Brasil de 1790 A 1853. *Quimica Nova*, 33, 1612-1619, 2010.

MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B.; PERES, J. R. R.; VARGAS, M. A. T.; SUHET, A. R. Embrapa Cerrados: 37 anos de contribuições para o avanço da FBN no Brasil.

MENDONÇA, L.A.R.; VÁSQUES, M.A.N.; FEITOSA, J.V.; OLIVEIRA, J.F.; FRANCA, R.M.; VÁSQUES, E.M.F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Engenharia Sanitária Ambiental*, 14, 89-98, 2009.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. 2d. Editora UFLA: Lavras, 2006.

NETO, A.A.C.; SILVA, P.P.A. Nitrogênio: um dos elementos essenciais para as plantas. Cap. 16. In: VI Botânica no Inverno 2016 / Org. Miguel Peña H. [et al.]. – São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Departamento de Botânica, 2016. 223p.

NEILL, C.; STEUDLER, P. A.; GARCIA-MONTIEL, D. C.; MELILLO, J. M.; FEIGL, B. J.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C. C. Rates and controls of nitrous oxide and nitric oxide emissions following conversion of forest to pasture in Rondônia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 71, p.1-15, 2005.

NOGUEIRA, A.K.S.; RODRIGUES, R.A.R.; SILVA, J.J.N.; BOTIN, A.A.; SILVEIRA, J.G.; MOMBACH, M.A.; ARMACOLO, N.M.; ROMEIRO, S.O. Fluxos de óxido nitroso em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, 51, 1156-1162, 2016.

NOGUEIRA, A.C.W. 2007. Caracterização de genes de Resistência a Patógenos em Eucalipto (*Eucalyptus spp.*), Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e Feijão-Caupi (*Vigna unguiculata*). 115 f. Dissertação (Mestre em Genética) – Universidade Federal de Pernambuco.

O'CONNELL, A. M.; SANKARAN, K. V. Organic matter accretion, decomposition and mineralisation. In: Nambiar, E. K. S., Brown, A. G. (Ed.). *Management of soil, nutrients and water in tropical plantations forests*. Canberra: ACIAR Australia/CSIRO, 1997. p. 443-480. (Monograph; n. 43).

OLIVERIA JÚNIOR, J.C.; DIAS, H.C.T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da mata. *Árvore*, Viçosa-MG, 29, 9-15, 2005.

OKITO, A.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Isotopic fractionation during N₂ fixation by four tropical legumes. *Soil Biology and Biochemistry*, v.36, p.1179-1190, 2004.

PAUFERRO, N.; GUIMARÃES, A.P.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.B. ¹⁵N natural abundance of biologically fixed N₂ in soybean is controlled more by the Bradyrhizobium strain than by the variety of the host plant. *Soil Biology & Biochemistry*, 42, p. 1694-1700, 2010.

PEREIRA, N.S.; SOARES, I.; PEREIRA, E.S.S. Uso de leguminosas como fonte alternativa de N nos agroecossistemas. *Revista Verde (Mossoró – RN)*, 7, 36-40, 2012.

PINTO, S.I.C.; MARTINS, S.V.; BARROS, N.F.; DIAS, H.C.T. Ciclagem de nutrientes em dois trechos de floresta estacional semidecidual na reserva florestal mata do paraíso em Viçosa, MT, Brasil. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, 33, 653-663, 2009.

PULROLNIK, K.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BRANDANI, C.R. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha – MG. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 33, 1125-1136, 2009.

PHILLIPS, I.; BURTON, E.; Nutrient leaching in undisturbed cores of an acidic sandy Podosol following simultaneous potassium chloride and di-ammonium phosphate application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73, 1–14, 2005.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 31, 1609-1623, 2007.

RODRIGUES, R. A.R.; DE MELLO, W.Z.; SOUZA, P.A. Aporte atmosférico de amônio, nitrato e sulfato em área de floresta ombrófila densa montana na Serra dos Órgãos, RJ. *Quimica Nova*, 30, 1842-1848, 2007.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D.A.; CHANTIGNHY, M.H.; MACDONALD, J.D.; GASSER, M.O.; BERTRAND, N. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84, 71–80, 2009.

SANCHES, L.; VALENTINI, C.M.A.; BIUDES, M.S.; NOGUEIRA, J.S.; Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serrapilheira em floresta tropical de transição. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 183–189, 2009.

SAKO, H.; ALVES, M.; MORAES, M.F.; TEIXEIRA, W.W.R.; LIMA, R.O.; SHIOZAKI, E.A. Fatores decisivos para se obter produtividade de soja acima de 4.200 kg ha⁻¹. Sorocaba – SP: Basf, Bayer, Syngenta et al. Circular técnica, 2016. 29 p.

SALVAGIOTTI, F., K.G. CASSMAN, J.E. SPECHT, D.T. WALTERS, A. Weiss, and A. Dobermann. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *F. Crop. Res.* 108:1–13. 2008.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N. Atmospheric Trace Constituents. Cap.2. In: Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2 ed. 2006.

SELLE, G.L. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais nutrient cycling in forest ecosystems. Bioscience Journal, 23, 29-39, 2007.

SHEARER, G.; KOHL, D.H. N₂ fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. Australia Journal of Plant Physiology, v.13, p.699–756, 1986.

TEMPLER, P.H.; SILVER, W.L.; PETT-RIDGE, J.; DEANGELIS, K.M.; FIRESTONE, M.K. Plant and microbial controls on nitrogen retention and loss in a humid tropical forest. Ecology, 89, 3030–3040, 2008.

UNKOVICH, M.; HERRIDGE, D.; PEOPLES, M.; CADISCH, G.; BODDEY, R.M.; GILLER, K.; ALVES, B.J.R.; CHALK, P. Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. ACIAR Monograph n° 136, p.258. 2008.

URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. . Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. Porto Alegre, RS - Genesis: Seropédica, RJ - Embrapa Agrobiologia, 2000. v. 1. 110p .

URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.B. Contribuição da Fixação Biológica de Nitrogênio na Produtividade dos Sistemas Agrícolas na América Latina. In: AQUINO, A. M. de; ASSIS, R. L. de (Ed.). Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005. cap. 7. p. 181-200.

URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P.; MORAIS, R.F.; BATISTA, R.B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J.M.; SÁ, J.M. e; BARBOSA, K.P.; RESENDE, A.S. de; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Evidence from field nitrogen balance and ¹⁵N natural abundance data for the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties. Plant and Soil, v.356, p.5–21, 2012.

VIERO, F.; BAYER, C.; FONTURA, S.M.V.; MORAES, R.P. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. Revista Brasileira de Ciências do Solo, 38, 1515-1525, 2014.

VITAL, A.R.T.; GUERRINI, I.A.; FRANKEN, W.K.; FONSECA, R.C.B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. R. Árvore, Viçosa-MG, 28, 793-800, 2004.

VALVERDE, S.R.; SOARES, N.S.; SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; NEIVA, S.A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. *Biomassa & Energia*, 1, 393-403, 2004.

WRAGE, N.; VELTHOF, G. L.; VAN BEUSICHEM, M. L.; OENEMA, O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 33, p. 1723-1732, 2001.

ZAMBON, L.M. Caracterização do crescimento e acúmulo de nitrogênio em uma cultura de soja de elevada produtividade. 70 p. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 2020.

ZHU, X.; ZHANG, W.; CHEN, H.; MO, J. Impacts of nitrogen deposition on soil nitrogen cycle in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 35–43, 2015.

ZILLI, J.E.; PACHECO, R.S.; GIANLUPPI, V.; SMIDERLE, O.J.; URQUIAGA, S.; HUNGRIA, M. Biological N₂ fixation and yield performance of soybean inoculated with *Bradyrhizobium* 119, 323-336, 2021.

ZUFFO, A.M.; STEINER, F.; BUSCH, A.; SANTOS, D.M.S. Adubação nitrogenada na soja inibe a nodulação e não melhora o crescimento inicial das plantas. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá (PR), v. 12, n.2, p. 333-349, abr./jun. 2019.

CAPÍTULO II

Eficiência energética e emissões de CO_{2eq} na cultura da soja de alta produtividade

RESUMO

A avaliação da eficiência energética (EE) e emissões de gases de efeito estufa (GEE) podem evidenciar a sustentabilidade dos agrossistemas e auxiliar na tomada de decisões relativas à redução dos custos de produção e poluição ambiental. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a EE e emissões de GEE em áreas de soja de alta produtividade em diferentes regiões brasileiras no ano agrícola de 2019-2020. Foram avaliadas 3 áreas de soja, situadas em Goiás, Bahia e Rio de Janeiro. As entradas e saídas de energia das operações agrícolas e/ou insumos utilizados foram calculadas pela multiplicação da quantidade utilizada pelo seu poder calorífico ou coeficiente energético em cada etapa de produção. A eficiência energética foi obtida pela razão entre a quantidade de energia total de saída e o consumo total de energia durante o processo produtivo. Para estimar a emissão de GEE, foram aplicados princípios da metodologia de avaliação do ciclo de vida e recomendações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). Para cada 1,0 MJ de energia consumida na produção de soja de alto rendimento, se produziram em média, 10,8 MJ de energia na forma de grãos desta cultura. Os principais gastos energéticos foram com sementes, fertilizantes, herbicidas e combustível. Para cada 1 kg de grãos produzidos de soja são emitidos respectivamente 0,17 kg de CO₂eq durante seus ciclos de produção e entrega no armazém, sendo as principais fontes de emissão de CO₂eq à atmosfera o fertilizantes fosfatado, fertilizante potássico e sementes.

Palavras-Chave: *Glycine max* L. Agricultura de alto rendimento. Energia. Gases de efeito estufa. Produção de grãos.

ABSTRACT

The assessment of energy efficiency (EE) and greenhouse gas (GHG) emissions can highlight the sustainability of agro-systems and the decision-making regarding reduction of production costs and environmental pollution. Given this context, the objective of this work was to evaluate the EE and GHG emissions in high-yield soybean areas in different Brazilian regions in the 2019-2020 agricultural year. Three soybean areas were evaluated, located respectively in Rio Verde-GO, Barreiras-BA and Macaé-RJ. The inputs and outputs of the agricultural operations and / or inputs used were calculated by multiplying the quantity used by their calorific value or energy coefficient at each stage of production. The energy efficiency was obtained by the ratio between the amount of total output energy and the total energy consumption during the production process. In order to estimate GHG emissions, the principles of the life cycle assessment methodology and recommendations of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were applied. For each 1.0 MJ of energy consumed in the production of high-yield soybeans, an average of 10.8 MJ of energy was produced in the form of grains from this crop. The main energy expenditures were on seeds, fertilizers, herbicides and fuel. For each 1 kg of soybeans produced, 0.17 kg of CO₂eq are emitted respectively during their production and delivery cycles in the warehouse. The main sources of CO₂eq emissions to the atmosphere are phosphate fertilizers, potassium fertilizers and seeds.

Key words: *Glycine max* L. High-yield agriculture. Energy. Greenhouse gases. Grain production.

10. INTRODUÇÃO

Considerando a projeção e/ou estimativa da produção mundial de soja para a safra 2020-2021, o Brasil se destacou como o maior produtor de soja (135 Mt), em empate técnico com os Estados Unidos, com uma produção de 112 Mt de soja (Estados Unidos Departamento de Agricultura dos Estados [USDA], 2021).

Na safra 2020/2021, a cultura da soja ocupou uma área de 38,502 milhões de hectares, alcançando uma produtividade média nacional de 3.517 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021). Dados do CESB (2021), mostram que os produtores brasileiros de soja, tem potencial de superar em muitas vezes o valor da média nacional de produtividade. O incremento na produtividade nos últimos treze anos (2008 a 2021), alcançado pelos participantes do desafio de máxima produtividade do CESB (saiu de 4.980 kg ha⁻¹, do primeiro campeão em 2008, para 7.749,68 kg ha⁻¹, o mais recente vencedor (CESB, 2021).

Estes números demonstram o potencial produtivo da cultura da soja, aliado ao esforço dos produtores aplicando boas práticas agrícolas, seguindo os resultados derivados da pesquisa científica e tecnologia, destacando-se o bom uso da, dentro do conceito da sustentabilidade como um todo (CESB, 2021). Porém, as altas produtividades alcançadas pelos produtores brasileiros (> 4200 kg ha⁻¹) estão associadas a técnicas altamente dependentes do consumo de energia, principalmente da queima de combustíveis fósseis, resultando em quantidades significativas de emissão de CO₂ para a atmosfera.

A avaliação da eficiência energética (EE) da agricultura brasileira tem como objetivo determinar os pontos de estrangulamento energético dos sistemas de cultivo adotados, visando à busca por tecnologias poupadoras de energia, especialmente aquelas de origem fóssil (combustível, fertilizante, defensivos agrícolas, energia despendida na fabricação das máquinas e implementos, etc.) (CAMPOS; CAMPOS, 2004; CUNHA et al., 2015). Diante disso, tais estudos de EE tornam-se uma excelente ferramenta de indicação da sustentabilidade dos sistemas agropecuários, os quais vem evoluindo muito e aumentando suas produtividades com o passar do anos (GUARESCHI et al., 2019).

No entanto, são escassos ou inexistentes trabalhos na literatura nacional que tem avaliado a EE em áreas com histórico de alta produtividade de soja (> 4.200,00 kg ha⁻¹). Isso se torna um objeto de pesquisa, visando elucidar quais estão sendo os maiores gastos energéticos e onde se pode melhorar para tornar esse cultivo da soja mais sustentável.

Os estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma técnica para avaliar o impacto ambiental associado ao uso dos recursos naturais (energia e matérias), emissões de poluentes e identificação de oportunidades para melhorar o sistema de forma a aperfeiçoar o desempenho

ambiental do produto durante sua fase agrícola e/ou industrial (QUEIROZ; GARCIA, 2010). Nesse contexto, em futuro próximo, países importadores de soja podem exigir garantias e/ou certificações de produção de grãos sustentáveis, e a partir da ACV é possível ter uma base neste sentido, ou seja, saber quantos quilos de CO₂eq foram emitidos para cada quilo de soja produzida (PIRES et al., 2002; GUARESCHI et al., 2019). No Brasil ainda se verificam poucas pesquisas com a abordagem em ACV e praticamente nenhuma pesquisa deste tipo em áreas de alta produtividade de soja. No entanto, o tema é emergente e vem ganhando espaço em razão da crescente preocupação da sociedade quanto às práticas produtivas sustentáveis, socialmente justas e economicamente viáveis (CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

Diante o exposto, através da avaliação da EE e ACV, pode-se perceber ao longo do ciclo de vida da cultura da soja, os fatores que auxiliam na degradação ambiental e assim propor técnicas e/ou práticas que possam minimizar ou suprimir estes fatores negativos, contribuindo assim, para a formação de uma cadeia de produção destas culturas mais sustentável (GUARESCHI et al., 2019).

Com isso, a hipótese desse capítulo foi que a cultura da soja em condições de alto rendimento diminui o balanço energético, com efeito nas emissões dos gases de efeito estufa. O objetivo do estudo foi determinar a eficiência energética e o balanço da emissão de CO₂eq na produção de soja em condições de alto rendimento.

11. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi do tipo exploratória e seguiu as orientações metodológicas que contemplam estudos de casos múltiplos, com uso de pesquisa bibliográfica e entrevistas com produtores. Nesses estudos de casos múltiplos, as unidades de produção escolhidas são diferenciadas pelos sistemas de produção adotados, o que concebe a não generalização de seus resultados, mas como suporte e ferramenta para outros estudos, já que não são considerados “unidades de amostragem” (FERREIRA et al., 2014).

As coletas de informações de manejo para os cálculos da EE e emissões de GEEs de 3 áreas de soja com histórico de alta produtividade, foram analisadas no ano safra 2019/2020, e foram fornecidos através de entrevistas com produtores nas cidades de Rio Verde-GO, Barreiras-BA e Macaé-RJ. As áreas de Rio Verde-GO e Barreiras-BA foram campeãs regionais no desafio nacional de máxima produtividade promovido pelo CESB. Já a área de Macaé-RJ vem sendo acompanhada através de pesquisas da Embrapa Agrobiologia nas últimas 2 safras de soja.

As principais informações coletadas foram: a) Quantidades utilizadas de mão-de-obra, combustível, fertilizantes sintéticos e orgânicos, sementes, defensivos agrícolas, entre outros insumos utilizados da semeadura à colheita; b) Quais operações agrícolas são utilizadas no manejo da cultura, bem como, quais tratores, máquinas e/ou implementos são utilizados para estes serviços; c) produtividade de grãos da cultura da soja; d) índices técnicos, como tempo de realização de cada operação agrícola e consumo de combustível ($L^{-1} h^{-1}$).

Informações das áreas de soja avaliadas neste estudo (Tabela 6).

Tabela 6. Localização, tamanho da área e produtividade média de grãos de soja das áreas avaliadas.

*ID	Cidade / Estado	Tamanho da área (ha)	¹ Produtividade média (kg ha ⁻¹)
1	Rio Verde – GO	2,5	5.040,00
2	Macaé-RJ	10,00	5.040,00
3	Barreiras-BA	10,00	5.364,00
Média:	-	7,5	5.148,00

*Números de Identificação das áreas utilizadas no decorrer do texto. ¹Dados fornecidos pela média de produtividade de grãos obtida pelos produtores nas áreas.

Através de visitas às unidades de produção (UPs) de estudo foram levantados dados de todos os insumos e práticas agrícolas utilizadas por meio de entrevistas estruturadas, os quais foram, depois, convertidos em unidades de energia por meio da multiplicação do produto físico pelos respectivos índices de conversão (coeficientes energéticos), computados em Mega Joule

(MJ) (ASSENHEIMER et al., 2009; CAPELLESSO; CAZELLA, 2013).

A conversão dos insumos e práticas agrícolas em energia (caloria) foi baseada na bibliografia, sendo calculada e adaptada para as condições da pesquisa, tanto para entradas (fatores necessários para a produção) quanto para saídas (produção de grãos) (CAPELLESSO; CAZELLA, 2013). Diante o exposto, os valores de coeficientes energéticos que foram utilizados neste estudo para transformação dos produtos/insumos físicos em energia, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Principais coeficientes energéticos utilizados na estimativa do consumo de energia pelas lavouras analisadas

1. Energia direta			
Especificações	Unidade	Coeficiente energético (CE)	Referência bibliográfica
Mão de obra humana	MJ h ⁻¹ homem	7,84	Boddey et al. (2008)
Fertilizantes sintéticos nitrogenados (N)	MJ kg ⁻¹	63,79	Macedônio & Picchioni (1985)
Fertilizantes sintéticos fosfatados (P ₂ O ₅)	MJ kg ⁻¹	13,97	Macedônio & Picchioni (1985)
Fertilizantes potássicos (K ₂ O)	MJ kg ⁻¹	9,79	Macedônio & Picchioni (1985)
Calcário	MJ kg ⁻¹	0,167	Comitre (1993)
Gesso	MJ kg ⁻¹	0,167	Vieira (2007)
Micronutriente Zinco	MJ kg ⁻¹	8,37	Pimentel (1980)
Cobalto + molibdênio (CoMo)	MJ L ⁻¹	0,042	Gomes (2012)
Micronutrientes em geral	MJ kg ⁻¹	6,32	Souza et al. (2008)
Esterco bovino	MJ kg ⁻¹	0,063	Souza et al. (2008)
¹ Conversor de Reais em energia	MJ R\$	2,23	EPE (2015)
Valor calorífico do Óleo diesel	MJ L ⁻¹	43,93	Comitre (1993)
² Valor calorífico do óleo lubrificante	MJ L ⁻¹	35,94	Comitre (1993)
² Valor calorífico da graxa	MJ L ⁻¹	49,22	Comitre (1993)
Sementes de Soja	MJ kg ⁻¹	31,75	Pimentel (1980)
Inoculantes	MJ dose ⁻¹	5,25	Sá et al. (2013)
⁴ Herbicidas, inseticidas, fungicidas, etc...	kg ou L /i.a	(Tabela 8)	Pimentel (1980)
2. Energia indireta			
^{5,6} Trator ou máquinas (Autopropelidos)	MJ kg ⁻¹	69,83	Macedônio & Picchioni (1985)
Colheitadeiras (Autopropelidas)	MJ kg ⁻¹	69,87	Macedônio & Picchioni (1985)
Implementos (não-autopropelidos)	MJ kg ⁻¹	57,2	Macedônio & Picchioni (1985)

¹Para insumos muito específicos e de contribuição pouco expressiva, foi estimado o valor energético com base no custo de uma unidade monetária para o Produto Interno Bruto relacionado ao Balanço Energético Nacional, ambos de 2014. ²Para o cálculo do consumo de óleo lubrificante, foi considerado 1,5% do consumo de diesel e, para a graxa, 33% do consumo de lubrificante. ⁴Varia de acordo com o ingrediente ativo (i.a) e formulação utilizado (Tabela 8). ⁵Também foi estabelecido um valor energético gasto para reparos dos tratores, máquinas e implementos agrícolas, que corresponde a 5% do total de energia utilizada

na fabricação destes. ⁶Também foi considerado um valor de 2,24 % (Boddey et al., 2008) em relação ao gasto de energia total na produção agrícola como estimativa do gasto energético com o transporte de máquinas, implementos e insumos à lavoura.

O cálculo da depreciação energética (DE) e da energia indireta dos tratores, máquinas e/ou implementos agrícolas, foram baseados de acordo com BEBER (1989):

$$DE = ((M - 10\% \cdot M) / Vu) \cdot tu \cdot CE$$

Onde: M (massa do trator ou implemento agrícola em kg); Vu (vida útil do trator ou implemento agrícola em horas); tu (tempo de utilização em horas) e CE (coeficiente energético do trator, máquina ou implemento agrícola analisado). A massa dos tratores, máquinas e implementos foram obtidas junto aos catálogos de fabricantes. Já os valores de vida útil foram obtidos segundo dados da CONAB (2010).

Os coeficientes energéticos utilizados para conversão da quantidade de defensivos agrícolas utilizados em energia foram estimados de acordo com trabalhos disponíveis na literatura (Tabela 8).

Tabela 8. Coeficientes energéticos utilizados para calcular os gastos de energia com herbicidas e defensivos agrícolas para o controle de pragas e doenças nas culturas avaliadas deste estudo.

Formulação	Coeficiente energético (MJ kg⁻¹ ou L⁻¹) de i.a.
Herbicidas	
Concentrado dispersível	418,30
Pó solúvel	262,80
Granulado	362,58
*Valor médio	347,89
Defensivos agrícolas para controle de pragas	
Concentrado dispersível	363,87
Pó solúvel	311,07
Granulado	311,07
Pó molhável	257,36
*Valor médio	310,84
Defensivos agrícolas para controle de doenças	
Concentrado dispersível	271,76
Pó solúvel	116,27
Granulado	216,04
Pó molhável	216,04
*Valor médio	205,02
i.a – ingrediente ativo. *Valor médio atribuído pelos autores para outros tipos de formulações.	

Os cálculos do consumo de energia nas operações agrícolas (distribuição de corretivos; plantio; transporte interno; aplicação de defensivos agrícolas; colheita, etc.), foram obtidos através dos valores gastos de combustível (L h⁻¹) do conjunto (Trator + implemento) ou máquina utilizada, juntamente com o rendimento desse conjunto ou máquina (ha h⁻¹). Com esses dados em mãos, foi

realizado uma divisão do gasto de combustível ($L h^{-1}$) pelo rendimento ($ha h^{-1}$) obtendo-se os gastos de combustíveis ($L ha^{-1}$) e após isso, uma multiplicação do valor encontrado pelo valor calorífico do óleo diesel ($43,93 MJ L^{-1}$).

Alguns fatores de correção foram utilizados nos cálculos de gasto de combustível (diesel) nas operações de transporte e transbordo de grãos, transporte de água e preparo do solo. Nas operações de transporte (grãos e água), o gasto de combustível foi dividido pela capacidade de transporte de carga por hectare, por exemplo, se um conjunto Trator + tanque de água gasta 10 L de diesel para transportar 2000 L de água e o volume de calda utilizado por hectare é de 200 L, isso significa que os 10 L de diesel consumidos nesta operação foram utilizados para 10 hectares e que na verdade o consumo de diesel por hectare nesta operação é igual a 1 L. Já nas operações de preparo do solo e correção do solo, o consumo de diesel e calcário foi dividido pela quantidade de anos de efeito residual que o manejo realizado poderá proporcionar benefícios ao solo.

A relação de tratores, máquinas e implementos agrícolas, bem como seus rendimentos operacionais ($h ha^{-1}$) e consumos de diesel ($L ha^{-1} ano^{-1}$) nas áreas de cultivo de soja citadas acima, são apresentados na Tabela 9. As operações realizadas em cada propriedade são descritas na Tabela 10.

Tabela 9. Tratores, máquinas e implementos agrícolas utilizados nas propriedades de soja avaliadas, expondo sua potência (P), indicador operacional (IO) e consumo estimado de diesel (CD).

*ID	Fonte de tração	P	Implementos	IO	CD
		(cv)		($h^{-1} ha^{-1}$)	($L ha^{-1} ano^{-1}$)
1	Trator	220	Distribuidor Stara Hercules 6.0	0,029	0,27
2	Trator	143	Pá carregadeira CAT 924 G	0,001	0,013
3	Caminhão Volvo 330	330	Distribuidor Stara Hercules 6.0	0,039	0,68
4	Trator	220	Rolo faca	0,200	2,57
5	Pulverizador autopropelido	243	Jacto Uniport 3030	0,041	1,88
6	Caminhão MB 1214	136	Caminhão tanque	0,020	0,02
7	Trator	143	Semeadora Jumil 7090	0,140	2,16
8	Avião	-	Air Tractor 502B	0,029	-
9	Pulverizador autopropelido	243	Jacto Uniport 3030	0,022	0,50
10	Trator	370	Grade intermediária de 28 polegadas	0,476	11,04
11	Colhedora	470	Colheitadeira MF9895	0,083	3,71
12	Caminhão	380	Carreta romeu e Julieta (30t)	0,80	10,3
13	Trator	125	Distribuidor Tatu DCA ² 7500 de 3,75 m ³	0,200	2,38
14	Trator	115	Pulverizador Montana 3000 L	0,080	0,95
15	Trator	125	Semeadora Baldan PP Solo 4000	0,690	9,84

16	Colhedora	175	MF 5650 ano 2008	0,310	5,17
17	Caminhão	173	VW 17.180 WORKER caçamba 12 m ³	0,800	5,53
18	Trator	305	Distribuidor Stara Brutus 12000	0,220	3,67
19	Pulverizador autopropelido	260	JOHN DEERE 4720	0,023	0,57
20	Trator	520	Semeadora JOHN DEERE DB 48 linhas	0,070	2,16
21	Colhedora	480	JOHN DEERE S680	0,110	5,02

*ID – Número de Identificação dos conjuntos tratores + implementos ou máquinas autopropelidas utilizadas nas operações agrícolas das áreas de soja.

Tabela 10. Descrição das operações agrícolas realizadas nas propriedades produtoras de soja avaliadas.

Operações agrícolas	**Áreas avaliadas		
	Rio Verde - GO	Macaé-RJ	Barreiras-BA
Construção de curva de nível	10	-	-
Aplicação de adubo orgânico	-	13	-
Calagem	1 e 2	13	18
Adubação em pré-semeadura	2 e 3	-	-
Preparo do solo - rolo faca	4	-	-
Dessecação em pré-semeadura	5 e 6	14	19 ^{2x}
Semeadura	7	15	20
Aplicação de herbicida pós-emergente	5 e 6	14	19 ^{4x}
Aplicação aérea	#8 ^{2x}	-	-
Controle de pragas e doenças	6 e 9 ^{2x}	14 ^{3x}	19 ^{7x}
Aplicação de fertilizantes foliares	6 e 9	-	-
Colheita	11	16	21
Transporte dos grãos até o armazém	12	17	12

** Descrição dos tratores, máquinas e implementos agrícolas utilizados, bem como, seus rendimentos operacionais identificados por números de acordo com a Tabela 9. # Considerou-se o valor médio entre 20 a 35 R\$ ha⁻¹ para estimar o valor energético com base no custo de uma unidade monetária para o Produto Interno Bruto relacionado ao Balanço Energético Nacional de 2013. Número subscrito e com "x" indica o número de vezes da operação realizada.

As quantidades de nitrogênio, fósforo e potássio aplicadas via fertilizantes e gastos de sementes, calcário, adubo orgânico e inoculantes usados em cada área estão listados na Tabela 11.

Já as quantidades de herbicidas, inseticidas, fungicidas, óleo mineral e adjuvantes e fertilizantes biológicos e foliares utilizados no cultivo das áreas avaliadas de soja estão listadas na Tabela 12, respectivamente.

Tabela 11. Nitrogênio, fósforo e potássio via fertilizantes e gastos de sementes, calcário, adubo orgânico e inoculantes nas áreas de soja avaliadas.

Cidade / Estado	N	*P ₂ O ₅	*K ₂ O	Calcário	**Adubo orgânico	Sementes	Inoculantes
	----- kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----						doses
Rio Verde-GO	8	56	76	2430	-	75	4,0
Macaé-RJ	1,8	100	80	2000	6000	69	4,0
Barreiras-BA	-	55,5	90	2200	-	60	3,0

* Para converter as quantidades de P₂O₅ e K₂O aplicadas em P e K, multiplica-se respectivamente pelos índices 0,436 e 0,830. **aplicação superficial de esterco de confinamento bovino

Tabela 12. Herbicidas (HE), inseticidas, fungicidas, óleo mineral e adjuvantes e fertilizantes biológicos e foliares utilizados no cultivo das áreas avaliadas de soja.

Insumos	Rio Verde-GO		Macaé-RJ		Barreiras-BA	
	*P.C	kg ou L ha ⁻¹	P.C	kg ou L ha ⁻¹	P.C	kg ou L ha ⁻¹
Herbicidas	Sumisoya® WP	0,100	Roundup® WG	3,50	DMA® 806 BR SL	1,80
	Roundup® WG	2,197	Select 240® EC	0,69	AURORA® 400 EC	0,50
	Paraquat 200® SL	1,925	-	-	Dual Gold 915 EC	0,80
	Roundup Transorb® SL	2,218	-	-	Spider® 840 WG	0,03
	-	-	-	-	Roundup Transorb® SL	4,50
	-	-	-	-	Poquer® EC	0,50
	-	-	-	-	Radiant 100 EC	0,50
	-	-	-	-	Flex SL	0,80
Inseticidas	Certero® SC	0,231	Cyprin 250® CE	0,176	TALISMAN® EC	1,00
	Lorsban® 480 EC	2,00	Engeo Pleno® SC	1,000	DIAFENTIURON CCAB 500 SC®	0,50

	Connect® SC	1,00	Premio® SC	0,05	-	-
	Atabron 50® EC	0,607	-	-	-	-
	Perito 970® SG	0,753	-	-	-	-
	Talisman® EC	0,502				
Fungicidas	Fox® Xpro SC	1,004	Aproach Prima® SC	0,40	Fox ® SC	0,120
	Fox ® SC	0,418	Dithane® WP	1,40	MANCOZEB 800 WP	4,00
	-	-	Priori Xtra® SC	0,40	ELATUS® WG	0,200
	-	-	-	-	ZIGNAL® SC	1,00
Adjuvantes e óleo mineral	Aureo® EC	0,210	Aureo® EC	0,210	ARES®	0,65
	Amino AD+ WG	0,152	-	-	-	-
Fertilizantes biológicos e foliares	Shocker® WG	0,45	Amino Plus®	2,80	Profol Comol® 225 FIX	0,15
	Amino Omnia®	0,293	Ureia diluida	4,00	-	-
	Molibor®	0,816	-	-	-	-
	Phytovida Mn ®	0,408	-	-	-	-
	Fert Mag®	0,209	-	-	-	-
	CoMo Omnia®	0,146	-	-	-	-
	Stimulat® SL	0,251	-	-	-	-
			-	-	-	-
	Purakelp®	0,105	-	-	-	-

*PC - produto comercial

No que diz respeito às saídas de energia, para padronizar os cálculos, foi levado em consideração à produção de grãos de soja com 13% de umidade, adotando-se, como base para a conversão de produtividade (saída) em energia, de 16,74 MJ kg⁻¹ (SANTOS et al., 2013). Diante do exposto, para o cálculo total de produção de energia que sai dos agrossistemas, basta apenas

multiplicar a produtividade de grãos de soja pelo seu respectivo coeficiente energético, citado anteriormente neste parágrafo. Os restos culturais deixados na lavoura após a colheita foram desconsiderados das saídas, uma vez que são reincorporados ao sistema (CAPELLESCO; CAZELLA, 2013).

Por fim, para se calcular a eficiência energética (EE), foi realizada a divisão da energia produzida (MJ ha^{-1}) pela consumida (MJ ha^{-1}), em cada unidade de produção (UP) (SANTOS et al., 2013).

Uma das maneiras de estimar a contribuição nas emissões de GEEs pela produção de grãos pode ser através da conversão dos gastos energéticos fósseis em emissões equivalentes de CO_2 e com dados default de emissão de GEEs publicados na literatura (MACEDO et al., 2004; SOARES et al., 2009).

Desta forma, utilizando os gastos energéticos das áreas de soja de alta produtividade citada anteriormente neste módulo, estimou-se as emissões totais de GEEs expressas em kg de CO_2 equivalente por hectare por ano ($\text{kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$). Os fatores e/ou dados default de emissão de GEEs utilizado nesta estimativa foram extraídos de trabalhos publicados na literatura, conforme consta a seguir:

1) De acordo com SOARES et al. (2009) a energia utilizada para a produção de herbicidas, inseticidas e sementes vêm de uma grande diversidade de fontes, e para isso utiliza-se a conversão de MJ para CO_2 assumindo os fatores de emissão para petróleo (“crude oil”) do IPCC (2006). Segundo o IPCC (2006) a combustão de petróleo para produzir 1 GJ de energia produz 73,3 kg CO_2 , 0,003 kg CH_4 e 0,00006 kg de N_2O . Também foi utilizado esse mesmo procedimento para converter o consumo energético dos fertilizantes orgânicos em emissão de GEE.

2) A energia embutida nas máquinas agrícolas é contabilizada como se fosse a mesma para fabricação de aço (energia fornecida por carvão mineral). Conforme IPCC (2006) para 1 GJ de energia derivada de carvão mineral (“coking coal”) são emitidos 94,6 kg CO_2 , 0,001 kg CH_4 e 0,0015 kg N_2O .

3) A energia do óleo diesel utilizado como combustível nos tratores e máquinas agrícolas também é convertida em GEEs, segundo dados do IPCC (2006). Para 1 GJ de energia derivada de óleo diesel são emitidos 74,1 kg CO_2 , 0,003 kg CH_4 e 0,00006 kg N_2O .

4) Segundo o fator de emissão adotado pelo IPCC (2006), a emissão provocada pela calagem realizada com calcário dolomítico é de 0,13 t C- CO_2 por tonelada de calcário aplicado no solo.

5) Também foi considerado o fator de emissão que considera que 1% do N adicionado ao solo via fertilizantes orgânicos é emitido diretamente na forma de N_2O (IPCC, 2006).

Foram realizadas nas 3 áreas de soja avaliadas uma estatística descritiva de todos os resultados, obtendo-se a média, valor mínimo, valor máximo e desvio padrão.

12. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em média, a eficiência energética (EE) encontrada nas áreas de alta produtividade de soja (AAPS) foi de 10,88 (Tabela 13). Isso significa que para cada MJ de energia consumida, esses valores de energia mencionados foram produzidos e acumulados em forma de grão desta cultura (Tabela 13).

Tabela 13. Energia total consumida (MJ ha⁻¹) (TEC), energia total produzida (MJ ha⁻¹) (TEP) (b) e eficiência energética (EE) na fase agrícola das áreas de soja avaliadas.

Área	TEC (MJ ha ⁻¹)	TEP (MJ ha ⁻¹)	EE
Rio Verde-GO	7833,65	84369,60	10,77
Macaé-RJ	7678,26	84369,60	10,99
Barreiras-BA	7193,26	89793,36	12,48
Média	7755,95	84369,60	10,88

Esses resultados de EE das AAPS relativos à safra 2019-2020 foram superiores à alguns trabalhos encontrados na literatura que avaliaram a cultura da soja no Brasil, tais como, os resultados de 4,4 (MOURAD & WALTER, 2011), e 5,30 (RIQUETTI, 2014). Essa diferença é explicada pelas diferenças no manejo das lavouras e na produtividade de grãos entre as áreas avaliadas e entre as safras (GUARESCHI et al., 2019). Só para se ter uma base, a produtividade média de grãos das AAPS deste trabalho (Tabela 6) foram 22 e 21% superiores as atingidas respectivamente pelos trabalhos de Mourad & Walter (2011) e Riquetti (2014).

Mas quando se trata de EE, a diferença do manejo pode influenciar muito mais do que a diferença de produtividade de grãos entre áreas. Por exemplo, temos o trabalho de Assenheimer et al. (2009) o qual ao avaliar a EE de uma área de soja na safra 2003/2004 no estado do Paraná, obteve uma EE de apenas 7,81 com uma produtividade de grãos de 7.800 kg ha⁻¹. Desta forma, o trabalho de Assenheimer et al. (2009) com uma produtividade de grãos e energia 34% maior em relação a média das AAPS deste trabalho (Tabela 6), teve uma EE 28% menor nessa mesma comparação (Tabela 13). Isso ocorre principalmente porque no trabalho de Assenheimer et al. (2009) houve um grande consumo de energia com herbicidas que representou 52,85% dos gastos energéticos, enquanto que nas AAPS deste trabalho o consumo com herbicidas só representou em média 16% dos gastos energéticos (Tabela 14).

Tabela 14. Contribuição percentual dos principais gastos energéticos na etapa agrícola das áreas avaliadas de produção de soja.

Áreas	Porcentagem (%) de gastos energéticos*										
	TMI	Cb	Se	CAL	SF	AO	HE	DAP	DAD	OI	TL
1	1	9	30	1	26	-	15	10	1	3	2
2	2	13	29	1	30	2	13	1	4	2	2
3	1	11	26	1	23	-	21	2	11	0	2
Média:	2	11	28	1	26	2	16	5	6	2	2

* Mão de obra humana (MH), Tratores, máquinas e implementos agrícolas (TMI), Combustíveis (Cb), Lubrificantes (L), Graxas (G), Energia utilizada na reparação de tratores, máquinas e implementos agrícolas (ERMN), Sementes (Se), Inoculantes (Ino), Calcário (CAL), Gesso (GES), Fertilizantes sintéticos (SF), Adubação orgânica (AO), Herbicidas (HE), Defensivos agrícolas para controle de pragas (DAP), Defensivos agrícolas para controle de doenças (DAD), Outros insumos como óleo mineral, adjuvantes e fertilizantes foliares (OI), Transporte de máquinas, implementos e insumos para o campo (TL). Gastos energéticos menores que 1% não foram expressos nesta tabela.

Diante o exposto, a busca pelo aumento da EE na cultura da soja no Brasil, deve levar em conta não somente o aumento de produtividade nas AAPS, mas sim focar em aumentar a eficiência no manejo da cultura e uso de insumos, pensando em reduzir os gastos energéticos a patamares sustentáveis sem interferir na produtividade de grãos da soja.

Em média os principais gastos energéticos das AAPS foram com sementes (28%), fertilizantes (26%), herbicidas (16%) e combustível (11%) (Tabela 14). Juntas essas despesas energéticas representam 81% do gasto total de energia durante a etapa agrícola de produção das AAPS (Tabela 14). Observa-se que mesmo sendo áreas de alta produtividade de soja, o padrão de gastos energéticos continuam sendo semelhantes a outros estudos de EE com a cultura da soja em safras passadas, os quais demonstram que fertilizantes (MOURAD & WALTER, 2011; RIQUETTI, 2014), sementes (CAMPOS et al., 2009; RIQUETTI, 2014), herbicidas (MELO et al., 2007; CAMPOS et al., 2009; ASSENHEIMER et al., 2009; RIQUETTI, 2014) e os combustíveis (CAMPOS et al., 2009; FERREIRA et al., 2014) foram responsáveis pelos maiores aportes energéticos no cultivo da soja no Brasil.

A área de Rio Verde-GO apresentou uma EE de 10,77 (Tabela 8), sendo os principais gastos energéticos respectivamente com sementes (30%), fertilizantes (26%) e herbicidas (15%) (Tabela 14). O diferencial desta área para as demais avaliadas é o menor gasto de combustível (Cb) e consequente maior gasto com DAP (defensivos agrícolas para controle de pragas) e OI (outros insumos) (Tabela 14). Isso ocorre porque a área de Rio Verde-GO dispõe de maior pacote tecnológico de máquinas e implementos, além de utilizar aplicações áreas de insumos (Tabelas 9 e 10). Tais máquinas e implementos agrícolas da área de Rio Verde-GO apresentam alta capacidade efetiva ($\text{h}^{-1} \text{ha}^{-1}$), o que lhe proporciona maior eficiência no uso de combustível e permite que mais entradas nas áreas sejam realizadas para aplicação de defensivos agrícolas e

fertilizantes foliares, sem afetar tanto no custo de produção e EE.

Em contraste temos a AAPS de Macaé-RJ, a qual apresentou EE de 10,99 (Tabela 13) e seus principais gastos energéticos foram com fertilizantes, sementes, herbicidas e combustível (Tabela 14). Essa área dispõe de um pacote tecnológico de máquinas e implementos mais simples, o que destaca seu maior gasto de combustível em relação as demais áreas (Tabela 9 e 14). Porém observa-se através desta área, que mesmo com um pouco menos de tecnologia foi possível atingir altas produtividades, pois todos os manejos necessários para o desenvolvimento da cultura foram realizados com eficiência. Outro fator em destaque nesta AAPS de Macaé-RJ é seu menor gasto energético com DAP e DAD, o que pode ser reflexo do efeito de ilha, ou seja, pelo estado do Rio de Janeiro ainda não ter grandes áreas de produção soja, a disseminação de pragas e doenças é menor.

A AAPS de Barreiras-BA foi a que obteve maior EE (12,48) (Tabela 13) e seus principais gastos energéticos foram semelhantes a área de Rio Verde-GO, onde sementes, fertilizantes e herbicidas foram os destaques (Tabela 14). Essa área se destacou das demais, por ter obtido a maior produtividade de grãos (Tabela 6), o que diretamente aumentou seu resultado de EE (Tabela 13). Além disso, percebe-se um maior gasto com herbicidas e DAD (Tabela 14).

Conforme discutido anteriormente, as sementes de soja têm grande impacto no consumo de energia, e na EE das AAPS. A elevada quantidade de energia empregada na produção de sementes ocorre devido a maior quantidade de insumos utilizados em sua produção, as quais são maiores do que a utilização de insumos geralmente empregadas na produção comercial de grãos de soja (MOURAD & WALTER, 2011; RIQUETTI, 2014; GUARESCHI et al., 2019). Por exemplo, nos campos de produção de sementes de soja são realizadas aplicações frequentes de fungicidas e inseticidas para evitar a propagação de pragas e doenças pelas sementes. Ademais, a energia utilizada no processamento, classificação, embalagem e armazenamento das sementes é superior à utilizada normalmente na produção de grãos convencionais (MOURAD & WALTER, 2011; RIQUETTI, 2014). Portanto, tecnologias que melhorem as etapas de produção de sementes e/ou reduzam o uso de energia durante seu desenvolvimento agroindustrial podem contribuir para aumentos na EE da cultura da soja (GUARESCHI et al., 2019).

Já o segundo mais significativo gasto energético nas AAPS foi o uso de fertilizantes fosfatados e potássicos (Tabela 14). Neste estudo, foi aplicada uma média de 70 e 82 kg ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente de P₂O₅ e K₂O (Tabela 11). Uma forma de reduzir o gasto de energia com esses fertilizantes seria aumentar a eficiência do uso destes nutrientes na cultura da soja. Neste sentido, o uso de fertilizantes de eficiência aumentada e/ou organominerais (Teixeira, Silva, Sousa, Mattiello & Soares, 2016), adubação verde e ciclagem de nutrientes (Silva, Oliveira, Merloti & Sá,

2017), e promoção do enraizamento via co-inoculação com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* (Ferri, Braccini, Anghinoni & Pereira, 2017) são exemplos de técnicas que têm sido indicadas para aumentar a eficiência do uso de P e K pela soja e, conseqüentemente, aumentar EE.

Em relação ao significativo aporte de energia nas AAPS com herbicidas ocorrem devido à grande quantidade de energia utilizada em sua produção, que varia entre 262,8 e 418,3 MJ kg⁻¹ de i.a, dependendo da formulação (Tabela 8). Assim, pequenas quantidades do ingrediente ativo em herbicidas, mesmo em doses e frequências de aplicação moderadas, levam a entradas de energia significativas no sistema de produção (Tabela 12 e Tabela 14). Algumas estratégias podem ser adotadas visando a redução do gasto de energia com herbicidas nas AAPS: 1) escolha adequada de ingredientes ativos e/ou da aplicação, visando seu uso mais eficiente a fim de reduzir as doses aplicadas; 2) melhorar a eficiência na produção dos herbicidas nas indústrias, visando reduzir a quantidade de energia embutida neste insumo; 3) priorizar técnicas de manejos, culturais e/ou adoção de sistemas conservacionistas que venham a reduzir a infestação de plantas daninhas e assim reduzir a utilização de herbicidas para o seu controle; 4) acertar o time da aplicação, e utilizar herbicidas pré e pós-emergente, com rodízio de princípios ativos.

Outro gasto com alta demanda energética das AAPS foi a utilização de combustível (Tabela 14). As operações agrícolas que mais demandaram combustíveis nas AAPS foi uso de grade e rolos faca, semeadura, colheita e caminhões para transporte de grãos (Tabela 9 e 10). Atualmente a economia de combustível está atrelada ao aumento da eficiência das máquinas e implementos citados anteriormente, e o que tem se priorizado para aumentar suas capacidades efetivas são: 1) aumento da largura de trabalho de grades, semeadoras e colheitadeiras; 2) utilização de GPS e aumento de velocidade de operação; 3) melhoria no consumo, com motores mais eficientes.

Quanto às emissões de gases de efeito estufa pelas AAPS, foi constatado um fator médio de emissão (0,17), ou seja, para cada 1 kg de soja produzido emituiu-se 0,17 kg de CO_{2eq} (Tabela 15). São escassos ou inexistentes trabalhos na literatura que tem avaliado as emissões de GEE em áreas de AAPS no Brasil. No entanto, esse valor emitido nas AAPS são menores que os encontrados em áreas comerciais de soja por Silva et al. (2010) (0,37) e Castanheira e Freire (2013) (0,30) na região sul do país e Raucci (2015) (0,19) no estado de Mato Grosso.

Tabela 15. Estimativa das emissões de GEE nas diferentes fontes de emissão das áreas de alto rendimento de soja avaliadas.

Áreas	Fontes de emissão (kg de CO ₂ eq. ha ⁻¹)																³ Fator de emissão (a/b)
	*TI	Cb	L	G	Se	Cal	FN	FP	FK	HE	DP	DD	OI	TL	¹ a	² b	
1	11	50	1	0	175	32	102	251	92	84	59	8	20	13	898	5040	0,18
2	14	76	1	0	161	26	23	449	97	72	8	21	12	12	974	5040	0,19
3	9	61	1	0	140	29	0	249	109	109	12	60	0	12	790	5364	0,15
Média	12	62	1	0	158	29	41	316	100	88	26	30	10	12	887	5148	0,17

*Tratores, máquinas e implementos agrícolas (TI), Combustíveis (Cb), Lubrificantes (L), Graxa (G), Sementes (Se), Calcário (Cal), Fertilizantes sintéticos nitrogenado (FN), Fertilizantes sintéticos fosfatados (FP), Fertilizantes sintéticos potássico (FK), Defensivos agrícolas para controle de pragas (DP), Defensivos agrícolas para controle de doenças (DD), outros insumos (OI) e transporte a lavouras (TL). ¹ Emissão total de GEE fóssil em CO₂ eq. ha⁻¹(a). ² Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) (b). ³ Quilos de CO₂eq emitido por kg de grãos produzido.

Analisando os trabalhos citados da literatura anteriormente, observa-se que a alta produtividade das AAPS foram cruciais para se obter esse reduzido valor de emissão de CO₂eq. Em média, as cinco principais fontes de emissão de gases de efeito estufa das AAPS avaliadas foram: 1) fertilizante fosfatado (36%); 2) sementes (18%); 3) fertilizante potássico (11%); 4) herbicidas (10%); 5) combustível (7%). Juntas essas fontes representam 82% das emissões, sendo que 65% são emissões apenas com fertilizantes e consumo de sementes (Tabela 15). Esses resultados são reflexos dos maiores gastos energéticos com essas fontes (Tabela 14). Outros trabalhos na literatura também têm destacado estas fontes como as principais emissoras de GEEs no cultivo da soja (CASTANHEIRA & FREIRE, 2013; RAUCCI, 2015).

Destaca-se o consumo de fertilizantes como a principal e mais importante fonte de emissão de GEEs, representando em média, cerca de 50% das emissões (Tabela 15). Além da quantidade aplicada, as maiores emissões dos fertilizantes podem ser atribuídas a seu processo de produção, embalagem e transporte os quais emitem antes de chegar a propriedade rural, respectivamente 4,32; 0,90 e 0,73 kg de CO₂eq por kg de fertilizante nitrogenado, fosfatado e potássico. Já a maior quantidade de emissão do fertilizante fosfatado em relação ao potássico e nitrogenado se deve principalmente pela maior quantidade aplicada por unidade de área (Tabela 11). Diante o exposto, pode-se inferir que o desenvolvimento e/ou consolidação de tecnologias que venham a reduzir esses gastos na fabricação e/ou substituição desses fertilizantes sintéticos por outras fontes de fósforo, potássio e nitrogênio, menos intensas em energia fóssil, poderiam atuar como as principais fontes mitigadores de gases à atmosfera no cultivo em AAPS.

Por fim, em termos de mitigação de GEEs das demais fontes emissoras comentadas anteriormente (sementes, herbicidas e combustível), as estratégias comentadas para aumentar a EE também cabem aqui neste tópico.

13. CONCLUSÕES

Nas áreas de alta produtividade de soja avaliadas, para cada 1,0 MJ de energia consumida se produziram em média, 10,8 MJ de energia na forma de grãos desta cultura. Os principais gastos energéticos foram com sementes, fertilizantes, herbicidas e combustível.

O aumento da Eficiência energética na produção de soja deve levar em conta não somente o aumento de produtividade da cultura, mas sim focar em reduzir os gastos energéticos a patamares sustentáveis, sem interferir na produtividade de grãos.

Para cada 1 kg de grãos produzidos nas áreas de alta produtividade de soja (AAPS) são emitidos respectivamente 0,17 kg de CO₂eq durante seus ciclos de produção e entrega no armazém. Sendo as principais fontes de emissão de CO₂eq à atmosfera o fertilizantes fosfatado, fertilizante potássico e sementes.

14. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em poucos anos, muitas mudanças podem ocorrer na agricultura, principalmente no que se refere ao uso dos solos. Manter medidas que garantem maior sustentabilidade do sistema solo x planta x atmosfera é essencial, como o que ocorre com a FBN na cultura da soja. Soma-se a isso, buscar cada vez mais diminuir os gastos com energia fóssil no ciclo de produção da(s) cultura(s), e assim, aumentar a eficiência energética no(s) sistema(s) produção.

15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSENHEIMER, A.; CAMPOS, A.T.; GONÇALVES JÚNIOR, A.C. Análise energética de sistemas de produção de soja convencional e orgânica. *Ambiência*, v.5, n.3, p.443 – 455, 2009.
- BEBER, J.A.C. *Eficiência energética e processos de produção em pequenas propriedades rurais*. 1989. Dissertação (Mestrado em Extensão Rural), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- BODDEY, R.M.; SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Bio-ethanol production in Brazil. In: PIMENTEL, D. (Ed.). *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems*. Dordrecht: Springer, 2008. p.321-356.
- 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, 2013.
- CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. *Ciência Rural*, v.34, n.6, p. 1977-1985, 2004.
- CASTANHEIRA, É. G.; FREIRE, F. Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 54, n.01, p. 49–60, 2013.
- CLAUDINO, E.S.; TALAMINI, E. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio - Uma revisão de literatura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.1, p.77–85, 2013.
- COMITÊ ESTRATÉGICO SOJA BRASIL (CESB). Soja: quebrando recordes. CESB: 10 anos de máxima produtividade. Sorocaba – SP: Basf, Bayer, Syngenta et al. 2018. 216 p.
- COMITRE, V. *Avaliação energética e aspectos econômicos da soja na região de Ribeirão Preto, SP*. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Planejamento Agropecuário) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v.7, Safra 2019/20. 2020. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> >. Acesso em: 27/04/2020 às 17 h.
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. *Custos de produção agrícola: a metodologia da Conab*. Brasília: Conab, 2010. 60 p.
- CUNHA, J.P.B.; CAMPOS, A.T.; MARTINS, F.G.L.; PAULA, V.R.; VOLPATO, C.E.S.; SILVA, F.C. Demanda energética de diferentes manejos de solo no cultivo de milho. *Bioscience. Journal*, v. 31, n. 3, p. 808-817, 2015.
- FERREIRA, F.F.; NEUMANN, P.S.; HOFFMANN, R. Análise da matriz energética e econômica das

culturas de arroz, soja e trigo em sistemas de produção tecnificados no Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, v.44, n.2, p.380-385, 2014.

Ferri, G.C., Braccini, A.L., Anghinoni, F.B.G., & Pereira, L.C. (2017). Effects of associated co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* with *Azospirillum brasilense* on soybean yield and growth. *African Journal of Agricultural Research*, 12(1), 6–11. doi:10.5897/AJAR2016.11711

GUARESCHI, R.F.; MARTINS, M.R.; SARKIS, L.F.; ALVES, B.J.R.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, U. An analysis of energy efficiency and greenhouse gas emissions from organic soybean cultivation in Brazil. *Revista Semina*, Londrina, v. 40, n. 6, suplemento 3, p. 3461-3476, 2019

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. *Guidlines for national greenhouse gas inventories*. 2006. Disponível: < <http://www.ipccnggi.iges.or.jp/public/2006gl>>. Acesso em: 02 Mar 2015.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil*. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2004. 34 p.

MACEDÔNIO, A. C.; PICCHIONI, S. A. *Metodologia para o cálculo do consumo de energia fóssil no processo de produção agropecuária*. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura, 1985.

PIRES, A.C.; RABELO, R.R.; XAVIER, J.H.V. Uso potencial da análise do ciclo de vida (ACV) associada aos conceitos da produção orgânica aplicados à agricultura familiar. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v.19, n. 2, p.149-178, 2002.

PRUDÊNCIO DA SILVA, V. et al. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 91, n. 9, p. 1831–1839, 2010.

QUEIROZ, G. C.; GARCIA, E. E. C. Reciclagem de sacolas plásticas de polietileno em termos de inventário de ciclo de vida. *Revista Polimeros*, v.20, n.01, p.401-406, 2010.

RAUCCI, G.S. *Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production and postharvest nitrous oxide emissions from crop residues decomposition*. 2015. Dissertação (Mestrado em química na Agricultura e Ambiente) – Universidade de São Paulo, Piracicaba,SP.

SÁ, J.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; MARCHÃO, R.L.; VILELA, L. Balanço energético da produção de grãos, carne e biocombustíveis em sistemas especializados e mistos. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.48, n.10, p.1323-1331, 2013.

SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; SPERA, S.T.; DREON, G. Conversão e balanço energético de sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.8, n.1, p.1-7, 2013.

Silva, M.S., Oliveira, G.R.F., Merloti, L.F., & Sá, M.E. (2017). Accumulation of nutrients and dry matter produced by *Crotalaria juncea* cultivated in Cerrado. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 11(1), 26–36. doi: 10.18011/bioeng2017v11n1p26-36

SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. *Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil*. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Circular Técnica, 27.).

SOUZA, J. L. *Balanço energético em cultivos orgânicos de hortaliças*. 2006. Tese (Doutorado de Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOUZA J.L.; CASALI, V.W.D.; SANTOS, R.H.S.; CECON, P.R. Balanço e análise da sustentabilidade energética na produção orgânica de hortaliças. *Horticultura Brasileira*, v.26, n.4. p.433-440, 2008.

Teixeira, R.S., Silva, I.R., Sousa, R.N., Mattiello, E.M., & Soares, E.M.B. (2016). Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 16(4), 1097–112. doi:10.4067/S0718-95162016005000081

USDA (United States Department of Agriculture). (2020). *World agricultural supply and demand estimates*. Virgínia, US: USDA.