



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

ELISSON STEPHÂNIO SAVI PAULETTI

**USO DA METODOLOGIA EMERGÉTICA PARA AVALIAÇÃO DA
SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS**

**ERECHIM
2016**

ELISSON STEPHÂNIO SAVI PAULETTI

**USO DA METODOLOGIA EMERGÉTICA PARA AVALIAÇÃO DA
SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental, sob a orientação dos Professores Dr. Amauri Nelson Beutler e D.Sc. Leandro Galon.

ERECHIM
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL

Rua General Osório, 413D

CEP: 89802-210

Caixa Postal 181

Bairro Jardim Itália

Chapecó - SC

Brasil

ELISSON STEPHÂNIO SAVI PAULETTI

**USO DA METODOLOGIA EMERGÉTICA PARA AVALIAÇÃO DA
SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental, defendido em banca examinadora no dia 15/09/2016.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Nelson Beutler
Prof. D.Sc. Leandro Galon

Aprovado em __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. D.Sc. Leandro Galon - UFFS
Presidente/Orientador

Prof. Dr. Amauri Nelson Beutler - UNIPAMPA
Orientador

Prof. Dr. André Luiz Radunz
UFFS - Chapecó

Prof. Dr. Altemir José Mossi
UFFS - Erechim

Erechim/RS, Setembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

À consciência superior, grande arquiteto do universo, que me concede livre arbítrio para pensar, fazer escolhas, analisar e compreender as consequências, e evoluir.

À Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), pela oportunidade de realizar um curso de pós-graduação público, gratuito e de qualidade.

Aos orientadores, D.Sc. Leandro Galon e Dr. Amauri Nelson Beutler pelos ensinamentos e orientação sempre assertiva e oportuna e pela paciência e tolerância em relação à escolha de um tema novo e desafiador. Com vocês muito aprendi e evolui no caminho da pesquisa e da ciência.

Ao Professor Dr. Enrique Ortega Rodrigues, da UNICAMP, pelo apoio à distância, respondendo aos questionamentos e auxiliando-me, inestimavelmente, na compreensão do tema.

Aos demais professores vinculados ao curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFFS, que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Ao colega de curso César Tiago Forte pela parceria estabelecida na condução dos experimentos, por sua dedicação e apoio fundamental, sem o qual, não teria sido possível a realização deste trabalho.

Aos colegas de curso, com os quais tive o privilégio de conviver, ainda que pouco tempo, onde tivemos ricos e intensos debates sobre temas e questões polêmicas de interesse nas áreas de ciência e tecnologia ambiental e agronomia, especialmente sobre sustentabilidade. Foi um grande aprendizado a convivência com todos vocês.

À minha esposa Rosicléia Teixeira Pauletti por todo o seu amor, companheirismo, incentivo e, sobretudo, por compreender minhas ausências nesse percurso.

À minha família, pelo apoio e incentivo de sempre, e por acreditarem na minha capacidade de superação.

A todos àqueles que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar”.

Eduardo Galeano

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Diagrama ecossistêmico dos sistemas de produção avaliados.....	21
FIGURA 2 - Produtividade dos sistemas no ciclo completo de rotação de culturas.....	23

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Tratamentos e sucessão de culturas. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	17
TABELA 2. Indicadores emergéticos por tratamento. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	22
TABELA 3. Produtividade final e componentes de rendimento para a cultura da soja. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	24
TABELA 4. Produtividade final e componentes de rendimento para a cultura do feijão. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	24
TABELA 5. Produtividade final e componentes de rendimento para a cultura do milho. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	24
TABELA 6. Análise emergética para T1, ano-safra: 2013/14 (aveia + nabo / feijão). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	25
TABELA 7. Análise emergética para T1, ano-safra: 2014/15 (aveia / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	26
TABELA 8. Análise emergética para T1, ano-safra: 2015/16 (aveia + ervilhaca / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016	27
TABELA 9. Análise emergética para T2, ano-safra: 2013/14 (aveia + ervilhaca / soja). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016	28
TABELA 10. Análise emergética para T2, ano-safra: 2014/15 (ervilhaca / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016	29
TABELA 11. Análise emergética para T2, ano-safra: 2015/16 (aveia + nabo / soja). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	30
TABELA 12. Análise emergética para T3, ano-safra: 2013/14 (pousio / feijão). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	31
TABELA 13. Análise emergética para T3, ano-safra: 2014/15 (pousio / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	33
TABELA 14. Análise emergética para T3, ano-safra: 2015/16 (pousio / soja). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.....	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	10
2 ARTIGO: Análise emergética de sistemas de produção de soja, milho e feijão sob plantio direto e convencional para avaliação da sustentabilidade	12
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
2.1 INTRODUÇÃO	13
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	16
2.2.1 Delineamento experimental e caracterização geral do experimento.....	17
2.2.2 Coleta de dados de radiação solar e precipitação.....	18
2.2.3 Aplicação da metodologia emergética	18
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
3.4 CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS	37
Apêndice A	42
Apêndice B.....	44
Apêndice C.....	46
Apêndice D	48
Apêndice E.....	50
Apêndice F	52
Apêndice G	54
Apêndice H	56
Apêndice I.....	58

1 INTRODUÇÃO GERAL

A sustentabilidade está pautada no difícil equilíbrio entre a produção de alimentos e a preservação dos recursos naturais, que é o que sustenta a economia e que mantém nossa biosfera em condições de continuar com as prerrogativas de seu prefixo, ou seja, de manter as condições básicas para a manutenção da vida no planeta, através da prestação dos chamados serviços ecossistêmicos.

Em relação à sustentabilidade, muito se tem falado, em eventos científicos e conferências, na mídia e até mesmo entre as pessoas nas ruas. Talvez nenhum outro conceito na atualidade seja tão controverso e abstrato quanto o conceito de sustentabilidade (MARZAL, 1999). Apesar de acalorados debates, a maioria ainda não possui uma ideia clara do que isso significa, já que o emprego generalizado do termo (DUESTERHAUS, 1990; VEIGA, 1993; SAHTOURIS, 1996; MILLER JUNIOR, 2007) e a variedade de abordagens e definições encontradas em textos e documentos (BELLEN, 2005), acaba gerando divergências na sua concepção, sendo importante definir-se a base conceitual que sustenta a argumentação.

Isto acontece por que, quase sempre, o debate baseia-se em visões fragmentadas de mundo, com recortes específicos, onde cada um dá o viés que melhor lhe convém, vinculando sustentabilidade à sua área de formação ou aos seus interesses, enquanto seu real significado abarca uma visão muito mais complexa e sistêmica do mundo, das coisas e das pessoas, perpassando diversas áreas do conhecimento, exigindo visão sistêmica.

A literatura especializada em sustentabilidade indica que as ações devem, primeiramente, esclarecer o conceito de sustentabilidade que será o orientador do trabalho (DALMAGO et al., 2016). Nesse sentido, qualquer iniciativa desprovida deste propósito, implica em dificuldade no entendimento e também em delinear, com precisão, os recortes do problema que se deseja esclarecer por meio da avaliação (FARROW e WINOGRAD, 2001).

O conceito de sustentabilidade que mais tem sido aceito em projetos e trabalhos científicos com vistas a avaliação da sustentabilidade, seja para a aplicação de metodologias já existentes ou para a criação de novas metodologias e indicadores, é aquele apresentado no relatório Brundtland (DALMAGO et al. 2016), em que o desenvolvimento sustentável deve “permitir atender as necessidades atuais da população sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987).

Alinhada ao conceito do relatório Brundtland, a FAO (1989) define agricultura sustentável como aquela que envolve o manejo eficiente dos recursos disponíveis, mantendo a produção nos níveis necessários para satisfazer às necessidades de uma população crescente,

sem exaurir os recursos ou degradar o ambiente. Para o caso de sistemas produtivos de grãos isso significa, também, aproveitar ao máximo o potencial ambiental de produção nas diferentes regiões de cultivo, com o mínimo possível de impactos negativos.

Do ponto de vista energético, a agricultura pode ser definida como uma atividade que consiste em converter energia solar em alimentos, mas que necessita, dentro de uma escala comercial, do aporte de outras fontes de energia que podem ser renováveis ou não. A proporção de energia renovável usada em relação à energia total consumida constitui o índice da renovabilidade ou sustentabilidade energética do sistema, o qual avalia quantitativamente a adequação dos sistemas agrícolas ao desenvolvimento sustentável (ORTEGA e POLIDORO, 1998).

Numa abordagem energética, a sustentabilidade de um sistema pode ser calculada a partir de seu índice de energia. A economia clássica não consegue estimar, por exemplo, os recursos energéticos da biosfera. Então, se torna necessário mensurar com abordagens ecológicas e energéticas para que se compreenda a real economia (ODUM, 1996). Energia é a energia que a biosfera investe para produzir seus bens e serviços, incluindo os bens e serviços da sociedade (BROWN, 1998), representando, desta maneira, o valor biosférico dos recursos da terra (ORTEGA e BACIC, 2008).

A metodologia emergética, também chamada de síntese de energia ou memória energética, é um método de avaliação integral e sistêmica da sustentabilidade (ODUM, 1996). Seus indicadores são úteis para o planejamento dos agroecossistemas e o desenvolvimento de sistemas de produção agrícolas sustentáveis, podendo servir como norteador de políticas públicas visando atingir a sustentabilidade (ORTEGA, 2002).

Para a avaliação emergética é necessário conhecer o sistema de produção em estudo, os principais componentes, as relações internas e quantificar os fluxos de energia e massa que entram e saem do sistema. O fluxo de entrada deve levar em conta as contribuições gratuitas da natureza e as adquiridas da economia.

O primeiro desafio que se apresenta, ao aplicar-se a metodologia emergética é a diferença de unidades entre os fluxos dos recursos ambientais e os econômicos (J ano^{-1} , kg ano^{-1} ou $\text{\$ ano}^{-1}$), não sendo possível contabilizá-los. É preciso convertê-los numa unidade comum: os joules de energia solar (emjoules ou seJ^{-1}). Para a conversão das unidades comuns em joules de energia solar, o valor numérico do fluxo expresso na sua unidade comum é multiplicado pelo respectivo valor de transformidade (seJ J^{-1} , seJ kg^{-1} ou $\text{seJ \$}^{-1}$). Desta forma, todos os fluxos de entrada convertidos em unidades de energia solar equivalente (seJ^{-1}) no sistema de produção podem ser contabilizados (ORTEGA et al., 2010).

Os principais indicadores emergéticos são: *yield* (Y), energia total do sistema; *transformity* (TR), transformidade do sistema; *emergy yield ratio* (EYR), taxa de rendimento emergético; *renewability* (R%), renovabilidade; *emergy investment ratio* (EIR), taxa de investimento emergético; *environmental load ratio* (ELR), carga ambiental; e *emergy sustainability index* (ESI), índice de sustentabilidade emergética (ODUM, 1996; ORTEGA, 2002; BROWN e ULGIATI, 2004; ORTEGA et al., 2010).

O objetivo deste trabalho foi aplicar a metodologia emergética para avaliação da sustentabilidade de agroecossistemas de produção de grãos, com foco nas principais culturas graníferas cultivadas no Brasil (soja, milho e feijão) em diferentes sistemas de produção e verificar seu potencial de uso para mensuração da sustentabilidade em sistemas agrícolas.

2 ARTIGO: Análise emergética para avaliação da sustentabilidade de sistemas de produção de soja, milho e feijão em plantio direto e convencional

RESUMO

A sustentabilidade está pautada no difícil equilíbrio entre a produção de alimentos e a preservação dos recursos naturais, sendo a agricultura uma das áreas estratégicas na busca deste objetivo. Sistemas produtivos de grãos demandam grande quantidade de energia e recursos no seu processo produtivo. Soja, milho e feijão são as culturas graníferas mais cultivadas no Brasil, somando quase 50 milhões de hectares. A metodologia emergética apresenta uma proposta de avaliação da sustentabilidade para sistemas de produção a partir da energia. Trata-se de uma abordagem energética, com base na termodinâmica e na ecologia de sistemas e que tem sido utilizada em diversos países do mundo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a sustentabilidade de sistemas de produção de soja, milho e feijão em plantio direto e convencional, por meio da metodologia emergética, a partir de dados coletados em experimento de campo. O experimento foi conduzido durante as safras de 2013/14, 2014/15 e 2015/16. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram os sistemas de produção, com diferentes arranjos de rotação de culturas sendo: T1 (sistema 1/plantio direto: aveia+nabo/feijão - aveia/milho - aveia+ervilhaca/milho), T2 (sistema 2/plantio direto: aveia+ervilhaca/soja - ervilhaca/milho - aveia+nabo/soja) e T3 (sistema 3/plantio convencional: pousio de inverno e feijão, milho e soja no verão). As análises emergéticas seguiram as três etapas metodológicas básicas propostas por Odum (1996): (1) elaboração do diagrama ecossistêmico; (2) construção das tabelas para o cálculo da energia total e, (3) discussão dos indicadores emergéticos obtidos. Foram utilizados os indicadores emergéticos clássicos: energia total do sistema (Y), transformidade do sistema (TR), taxa de rendimento emergético (EYR), renovabilidade (R%), taxa de investimento emergético (EIR), carga ambiental (ELR) e índice de sustentabilidade emergética (ESI). Os resultados obtidos foram: ESI, 2,26 - 2,93 - 1,17 e R% 50,62% - 54,83% - 34,43% para T1, T2 e T3, respectivamente. O uso da metodologia emergética para a avaliação da sustentabilidade em sistemas de produção de grãos, com base neste estudo, mostrou-se coerente e adequado. Concluiu-se que os sistemas manejados em plantio direto, com rotação de culturas e coberturas de inverno, (T1 e T2), apresentaram os melhores

indicadores ambientais e econômicos e as melhores respostas energéticas (razão entre energia gasta e energia produzida), sendo sustentáveis em médio e longo prazo e que o sistema manejado em plantio convencional com pousio de inverno (T3) é insustentável em longo prazo.

Palavras-Chave: Emergia. Sustentabilidade. Sistemas de Produção de Grãos.

ABSTRACT

The sustainability is guided in the difficult balance between food production and the preservation of natural resources, with agriculture one of the strategic areas in pursuing this goal. Grain production systems require large amounts of energy and resources in its production process. Soybeans, corn and beans are the most grain crops grown in Brazil, totaling nearly 50 million hectares. The emergy methodology presents a proposal for evaluation of sustainability for production systems from emergy. It is an energy approach, based on thermodynamic and ecology systems which have been used in many countries of the world. The objective of this study was to evaluate the sustainability of soybean production systems, corn and beans in tillage and conventional tillage, through the emergy methodology, from data collected in a field experiment. The experiment was conducted during the seasons of 2013/14, 2014/15 and 2015/16. The experimental design was a randomized complete block design with three treatments and four replications. The treatments were the production systems with different crop rotation arrangements: T1 (system 1/tillage: oatmeal+turnip/beans - oats/corn - oats+vetch/corn), T2 (system 2/tillage: oats+vetch/soybeans - vetch/corn - oat+radish/soybean) and T3 (3 system/conventional tillage: winter fallow and beans, corn and soybeans in the summer). The emergy analysis followed the three basic methodological steps proposed by Odum (1996): (1) elaboration of the ecosystem diagram; (2) construction of tables for the calculation of the total emerging and, (3) discussion of emergy indicators obtained. Classic emergy indicators were used: total emergy system (Y), system transformity (TR), emergy yield rate (EYR), renewability (R%), emergy investment rate (EIR), environmental load (ELR) and emergy sustainability index (ESI). The results obtained were: ESI, 2,26 - 2,93 - 1,17 and R% 50,62% - 54,83% - 34,43% for T1, T2 and T3, respectively. The use of emergy methodology for assessing the sustainability of grain production systems, based on this study, proved to be consistent and appropriate. It was concluded that the systems managed in tillage, crop rotation and winter cover, (T1 and T2), showed the best environmental and economic indicators and the best energy responses (ratio emerged spend and energy produced), and sustainable in medium and long term and that the managed system in conventional tillage with winter fallow (T3) is unsustainable in the long term.

Keywords: Emergy. Sustainability. Grain Production Systems.

2.1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade está pautada no difícil equilíbrio entre a produção de alimentos e a preservação dos recursos naturais, que é a base da economia e que mantém nossa biosfera em condições de continuar com as prerrogativas de seu prefixo, ou seja, de manter as condições básicas para a manutenção da vida no planeta, através da prestação dos chamados serviços ecossistêmicos.

O setor agrícola demanda a utilização de grande quantidade de insumos, exigindo um fluxo constante de recursos naturais não renováveis, especialmente energia fóssil. Attingido o pico de extração de petróleo, seus derivados não serão capazes de atender a demanda, que tende a aumentar com base nos parâmetros atuais (modelo agroquímico). Haverá um declínio da produção agrícola e industrial, e a produção de alimentos dependerá da eficiente utilização dos recursos naturais e de mão de obra local (ODUM, 1996; ALTIERI, 2002; GLIESSMAN, 2005).

Do ponto de vista energético, a agricultura pode ser definida como uma atividade que consiste em converter energia solar em alimentos. Entretanto, dentro de uma escala comercial, necessita do aporte de outras fontes de energia, que podem ser renováveis ou não. A proporção de energia renovável usada em relação à energia total consumida constitui o índice da renovabilidade ou sustentabilidade energética do sistema (ORTEGA e POLIDORO, 1998).

Numa abordagem energética, a sustentabilidade de um sistema pode ser calculada a partir de seu índice de energia. A economia clássica não consegue estimar, por exemplo, os recursos energéticos da biosfera. Então, se torna necessário mensurar com abordagens ecológicas e energéticas para que se compreenda a real economia do planeta (ODUM, 1996). Energia é a energia que a biosfera investe para produzir seus bens e serviços, incluindo os bens e serviços da sociedade (BROWN, 1998), representando o valor biosférico dos recursos da terra (ORTEGA e BACIC, 2008).

O termo energia vem do inglês *emergy* (*embodied + energy*), e sua tradução mais apropriada para o português seria energia incorporada. Pode ser compreendida, também, por memória energética, pois corresponde a toda energia gasta para produzir um produto ou um serviço, incluindo a energia gasta na matéria-prima ou insumos necessários ao longo de todo o processo produtivo (ODUM, 1996; ORTEGA, 2002).

Para realizar uma análise emergética é necessário conhecer o sistema de produção em estudo: seus principais componentes, as relações internas e quantificar os fluxos de energia e matéria que entram e saem do sistema. O orçamento do fluxo de entrada deve levar em conta as contribuições gratuitas da natureza (I) e as adquiridas da economia (F). Porém, os fluxos dos recursos ambientais (I) e os econômicos (F) são informados em unidades diferentes ($J \text{ ano}^{-1}$, $\text{kg} \text{ ano}^{-1}$ ou $\$ \text{ ano}^{-1}$), não sendo possível contabilizá-los. A solução da análise emergética é convertê-los numa moeda comum, os joules de energia solar, ou emjoules (seJ). Para a conversão, o valor numérico do fluxo expresso na sua unidade comum é multiplicado pelo respectivo valor de transformidade ($\text{seJ} \text{ J}^{-1}$, $\text{seJ} \text{ kg}^{-1}$ ou $\text{seJ} \text{ \$}^{-1}$). Desta forma, todos os fluxos de entrada no sistema de produção podem ser contabilizados (ORTEGA et al., 2010).

A relação entre o total de energia utilizada e a energia do produto é um coeficiente de transformação, daí vem o nome de transformidade. As dimensões deste parâmetro se expressam em seJ J^{-1} ou seJ kg^{-1} . Como seu nome implica, a transformidade pode ser utilizada para converter um fluxo de energia em um fluxo correspondente de trabalho necessário para produzi-lo, simplesmente multiplicando a energia pela transformidade (ORTEGA, 2003; ORTEGA e CAVALETT, 2007).

Para obter o valor da energia solar equivalente (seJ J^{-1}) de um recurso, é necessário conhecer o fluxograma completo do processo de transformação que ocorre em etapas sucessivas até sua produção e/ou obtenção. Depois de reconhecer os processos que integram o fluxograma completo devem se obter os valores em massa ou energia dos fluxos de entrada de cada processo para serem multiplicados pela transformidades respectivas. A somatória das energias fornece o valor da energia necessária para produzir certa quantidade de um recurso e assim pode-se calcular a relação energia por unidade (EPU) que corresponde à transformidade. Este trabalho tem sido feito por diversos pesquisadores ao redor do mundo, para uma grande variedade de recursos e serviços naturais dos ciclos biogeoquímicos da Terra e também para produtos comerciais (ODUM, 1996, 2000; PANZZIERI et al., 2000; ORTEGA, 2002; ORTEGA et al., 2002a e 2002b; BROWN e ULGIATI, 2004). Por conveniência, pra não ter que calcular a energia de um insumo a partir de seu fluxograma completo cada vez que se faz uma avaliação emergética, se recomenda aproveitar as transformidades que já foram calculadas previamente por outros pesquisadores (ODUM, 1996; ORTEGA et al., 2002a e 2002b; ORTEGA e CAVALETT, 2007).

Os principais indicadores emergéticos são: energia total do sistema (Y), transformidade do sistema (TR), taxa de rendimento emergético (EYR), renovabilidade (R%), taxa de investimento emergético (EIR), carga ambiental (ELR) e índice de sustentabilidade emergética (ESI) (ODUM, 1996; ORTEGA et al., 2002; BROWN e ULGIATI, 2004).

A análise emergética ou síntese de energia é uma metodologia que vem sendo utilizada com sucesso em muitos países do mundo e tem sido aplicada a diversos sistemas de produção e consumo (ODUM, 1996; BROWN, 1998; BROWN e ULGIATI, 2004; ORTEGA e BACIC, 2008; AGOSTINHO, 2009). Após revisão da literatura especializada no assunto, percebe-se que a China, os Estados Unidos, a Itália e a Espanha são países que mais desenvolvem trabalhos com esta metodologia.

Os pesquisadores que se dedicam ao estudo e avaliação de sistemas de produção e consumo com base na metodologia emergética, entendem que se trata de uma ferramenta sistêmica e complexa, adequada para análise, planejamento e remodelamento dos sistemas

estudados visando à melhoria dos indicadores de desempenho e, conseqüentemente, do seu índice de sustentabilidade (ODUM, 1996; BROWN, 1998; BROWN e ULGIATI, 2004; ORTEGA e BACIC, 2008; AGOSTINHO, 2009; ORTEGA et al., 2010). Portanto, os resultados de sua aplicação, de forma assertiva, podem ser úteis para o planejamento de políticas públicas nas mais diversas áreas de aplicação. Desta forma, pode-se avançar na busca da tão almejada sustentabilidade, prevista nas ações prioritárias da Agenda 21 Brasileira (BRASIL, 2004) que é respaldada pelo Decreto Presidencial nº 24, de 03 de fevereiro de 2004, bem como em diversos tratados e acordos internacionais relacionados às questões ambientais. A agricultura e a produção de alimentos estão no cerne dessas questões, em função de sua importância estratégica (alimentação) e em função da grande demanda energética (uso de recursos renováveis e não renováveis).

No Brasil, diversos estudos já foram realizados com base na metodologia, porém em sistemas agrícolas de produção de grãos são escassos os trabalhos e, aqueles que existem, tratam do tema numa escala regional macro (ORTEGA et al., 2005; CAVALETT e ORTEGA, 2007; VENDRAMETTO e BONILLA, 2009; FRANZESE et al., 2013), ou então, tratam da comparação de sistemas convencionais de produção com sistemas orgânicos (TEIXIERA, et al. 2007; ORTEGA et al, 2010; FRIMAIO, et al., 2013). Além disso, os estudos existentes são feitos a partir do levantamento de informações e dados obtidos junto aos produtores e órgãos oficiais. Portanto, se carece de estudos de sua aplicação com uma base experimental, com controle de variáveis, medições de fluxos de energia *in loco*, coleta e sistematização de dados dentro de uma metodologia científica mais adequada para a obtenção de resultados mais consistentes.

O objetivo deste estudo foi testar a metodologia emergética dentro de uma base experimental estruturada, através da coleta e sistematização de dados de campo, visando avaliar sua eficiência como ferramenta para mensuração da sustentabilidade de sistemas de produção de grãos em diferentes sistemas de manejo (plantio direto e convencional).

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foi instalado experimento de campo, durante três safras consecutivas, com início em maio de 2013 e término em maio de 2016, para a coleta dos dados que foram utilizados nas análises emergéticas. A metodologia emergética foi aplicada de acordo com o método proposto por Odum (1996).

2.2.1 Delineamento experimental e caracterização geral do experimento

O experimento foi realizado nas safras agrícolas 2013/14, 14/15 e 15/16, no município de Quatro Irmãos/RS, nas coordenadas geográficas 27° 44' S e 52° 26' W, altitude de 680 m e clima Cfa (temperado úmido com verão quente) de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (PEEL et al., 2007). O solo foi classificado como Cambissolo Háplico Ta eutrófico (EMBRAPA, 2013).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com três tratamentos e quatro repetições constituídas por parcelas de 30 m² (3 m x 10 m). Os tratamentos foram as rotações de culturas para cada sistema avaliado, durante três safras: plantas de cobertura de inverno antecedendo as culturas de verão (soja, milho e feijão) em sistema plantio direto (PD) e pousio de inverno antecedendo as culturas de verão em plantio convencional (PC), conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Tratamentos e rotação de culturas. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Tratamento	Manejo	Rotação de culturas		
		2013/2014	2014/2015	2015/2016
1	PD	aveia + nabo/feijão	aveia/milho	aveia + ervilhaca/milho
2	PD	aveia + ervilhaca/soja	ervilhaca/milho	aveia + nabo/soja
3	PC	pousio/feijão	pousio/milho	pousio/soja

Antes do experimento, a área foi cultivada em PD e na safra 2012/13 com feijão preto. Em maio de 2013, 2014 e 2015 foram semeadas as plantas de cobertura do solo, isoladas ou em consórcio, de acordo com os tratamentos. As densidades de semeadura para as plantas de cobertura do solo foram: 130 plantas m⁻² de aveia preta e 170 plantas m⁻² de ervilhaca comum; nos cultivos consorciados: 90 + 30 plantas m⁻² de aveia preta + nabo forrageiro e 170 + 35 plantas m⁻² de ervilhaca + nabo. A semeadura foi realizada com uma semeadora adubadora no espaçamento 0,17 m entre linhas e com adubação de base de 200 kg ha⁻¹ da fórmula 08-24-12 (NPK) e adubação de cobertura com 45 kg ha⁻¹ de N em todos os tratamentos.

Para T1 e T2, sistemas com plantas de cobertura de inverno, o manejo adotado foi PD para as culturas de inverno e de verão. Em T3, sistema com pousio de inverno, realizou-se o PC com utilização de subsolador e grade niveladora antes da semeadura das culturas de verão nos três anos.

A dessecação das plantas de cobertura e da área em pousio foi realizada com o herbicida glyphosate na dose de 1,08 kg ha⁻¹ + sethoxydim na dose de 0,22 kg ha⁻¹ em 50, 20 e 20 dias antes da semeadura, para as safras de 2013/14, 14/15 e 15/16, respectivamente.

A semeadura das culturas de verão foi realizada no dia 24/11/2013, 15/11/2014 e 15/11/2015. A densidade de semeadura foi de 30 plantas m^{-2} para a cultura da soja (*Glycine max*), cultivar BMX Alvo (2013 e 2014) e BMX Ativa (2015), 21 plantas de feijão preto m^{-2} (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar BRS Campeiro e 6 plantas m^{-2} para a cultura do milho (*Zea mays* L.), cultivares AG 8041 PRO (2013), SX 7331 VIP (2014) e P1630 (2015), no espaçamento de 0,47 m entre linhas. A adubação de base foi de 350 kg ha^{-1} para as culturas de feijão, milho e soja da fórmula 05-30-15 (NPK), nos três anos de cultivo.

O controle de plantas daninhas na cultura do feijão foi realizado com os herbicidas fluazifop-p-butyl + fomesafen na dose de 0,25 + 0,25 kg ha^{-1} , respectivamente; na cultura do milho utilizaram-se os herbicidas atrazine + simazine na dose de 1,25 + 1,25 kg ha^{-1} , respectivamente; na cultura da soja com o herbicida glyphosate na dose de 1,08 kg ha^{-1} .

O controle de insetos-praga e doenças foi realizado somente nas culturas de verão, de acordo com a necessidade para cada ano, através da aplicação de inseticidas e fungicidas. As quantidades utilizadas por ano e por cultura constam nas análises emergéticas realizadas (Tabelas 7 a 15).

Foi avaliada a massa seca da parte aérea das plantas de cobertura em área de 0,25 m^2 e a produtividade de grãos das culturas de soja, milho e feijão numa área de 3 m^2 - corrigida a 13% de umidade, bem como os principais componentes de rendimento para cada cultura (Tabelas 5 a 7).

2.2.2 Coleta de dados de radiação solar e precipitação

Os dados de radiação solar utilizados neste estudo foram obtidos da base de dados da Estação Meteorológica do INMET em Erechim, para os três anos do experimento.

Os dados de precipitação pluvial foram coletados na área do experimento, com leituras diárias em pluviômetro manual.

2.2.3 Aplicação da metodologia emergética

Os fundamentos teóricos da metodologia emergética se encontram na termodinâmica e na teoria geral de sistemas. A teoria levou três décadas para ser desenvolvida e esse processo é descrito por Odum no livro “*Environmental Accounting: emery for environmental decision-making*” (1996).

A análise emergética realizada neste estudo seguiu as três etapas metodológicas propostas por Odum (1996): 1) elaboração do diagrama sistêmico a partir da observação e compreensão dos fluxos de energia e matéria atuantes em cada sistema de produção, com base

na linguagem simbólica; 2) montagem das tabelas para o cálculo da energia total dos sistemas e obtenção dos indicadores emergéticos dos sistemas em estudo; 3) interpretação e discussão dos valores obtidos nos indicadores emergéticos (ODUM, 1996; ORTEGA, 2002; BROWN e ULGIATI, 2004).

A primeira etapa realizada após a implantação dos experimentos foi a observação atenta dos fluxos de energia atuantes com base no conceito da “janela de observação da ecologia de sistemas” (ODUM, 1996; ORTEGA, 2002). Esta etapa consiste em fazer um recorte (enquadramento) do sistema com base nesses fluxos dentro do processo produtivo em análise, neste caso, o experimento. Para a elaboração das análises emergéticas, foram observados os fluxos de entrada e saída da área do experimento, dentro de cada sistema avaliado e no conjunto dos três sistemas. Os fluxos de entrada (aporte de energia) foram: 1) fluxos renováveis da natureza: radiação solar, pluviosidade, nitrogênio atmosférico (fixação biológica pelas leguminosas do sistema) e reservas do solo (matéria orgânica e minerais); 2) fluxos da economia humana (insumos e serviços): sementes, agrotóxicos, combustível fóssil, fertilizantes, maquinário (depreciação) e mão de obra. Os fluxos de saída contabilizados foram: perda de solo por erosão/arraste e produtividade das culturas avaliadas.

A partir da observação dos fluxos de energia atuantes, acima descritos, e com base na linguagem simbólica proposta por Odum (1996) foi construído o diagrama geral sistêmico dos sistemas produtivos estudados no experimento, com as rotações de culturas para cada etapa dos sistemas, ao longo das safras avaliadas.

Os fluxos de matéria e energia, de entrada e saída dos sistemas de produção, foram quantificados com base nos insumos e operações utilizados no experimento (contribuições da economia = F) e com base nos dados coletados nos experimentos (precipitação anual, produtividade das culturas, nitrogênio de fixação biológica, biomassa), bem como dados climatológicos obtidos junto à Estação Meteorológica Automática do INMET em Erechim (contribuições da natureza = I), nos três anos experimentais.

O desempenho emergético dos sistemas de produção foi avaliado com base nos indicadores emergéticos clássicos (ODUM, 1996; BROWN e ULGIATI, 2004) - descritos a seguir:

- a) Transformidade do sistema (seJ J^{-1}): é a energia total ($Y = I + F$) em seJ , dividida pela energia produzida (E) em J (ODUM, 1996). Indica a eficiência do sistema ($\text{Tr} = Y / E$). Corresponde a medida da quantidade de energia incorporada por unidade de recurso produzido: quanto menor for o valor, maior é a eficiência da transformação da energia (ODUM, 1996). A transformidade do sistema mostra o valor real do produto, pois

- possibilita contabilizar, de fato, todo o investimento energético demandado para sua produção (ORTEGA et al., 2010).
- b) Taxa de rendimento (EYR): indica a habilidade do sistema em aproveitar os recursos locais e transformá-los em produtos, em resposta aos investimentos externos. Se o valor de EYR for igual a um (EYR=1) a energia dos recursos locais (Y) é igual a energia dos recursos externos, provenientes da economia (F). Isto indica que o sistema não contribui para o crescimento econômico. Para Brown e Ulgiati (2004), a energia líquida de contribuição é pequena quando: $1 < EYR < 2$; moderada quando $2 < EYR < 5$ e alta quando $EYR > 5$. Portanto, sistemas com $EYR > 5$ têm potencial significativo de contribuição para o crescimento socioeconômico. Equação: $EYR = Y / F$ (ODUM, 1996).
- c) Taxa de investimento (EIR): avalia o uso eficiente da energia dos investimentos em recursos da economia (ORTEGA et al., 2010). Valores menores de EIR indicam menos gastos com energia não renovável, diminuindo, portanto, o custo de produção e proporcionando melhor desempenho e competitividade no mercado. Para Ortega et al. (2010), pode ser interpretado como um índice de competitividade: EIR menor, competitividade maior (EIR ↓ = competitividade ↑). Equação: $EIR = F / I$ (ODUM, 1996).
- d) Carga ambiental (ELR): indica a pressão do sistema sobre o meio ambiente. Segundo Ortega et al. (2010), teoricamente $ELR = 0$ indica ecossistemas naturais maduros. Quanto maior a ELR, devido ao uso de recursos não renováveis, maior é a distância entre os sistemas de produção e os ecossistemas locais e maior é o impacto sobre o ambiente. Segundo Brown e Ulgiati (2004), o stresse ambiental é baixo quando: $ELR < 2$; é moderadamente baixo quando: $2 < ELR < 10$; e, alto quando: $ELR > 10$. Equação: $ELR = (N + F) / R$ (BROWN e ULGIATI, 2004).
- e) Renovabilidade (R%): é a porcentagem de energia renovável. Sistemas com alta renovabilidade se sustentam em longo prazo. Equação: $R = (R / Y) \times 100$ (ODUM, 1996).
- f) Índice de sustentabilidade (ESI): avalia a contribuição do sistema para a economia por unidade de carga ambiental (ORTEGA et al., 2010). O $ESI < 1$ indica sistema insustentável e $ESI > 1$ indica sistemas que contribuem para a economia sem grave perturbação ambiental. Valores intermediários: $1 < ESI < 5$ caracterizam sustentabilidade em médio prazo e $ESI > 5$ indica sustentabilidade em longo prazo. Equação: $ESI = EYR / ELR$ (BROWN e ULGIATI, 2004).

As transformidades para conversão dos fluxos de energia das unidades comuns de entrada (J, kg, L, R\$) em energia (seJ J^{-1}) foram obtidas através de estudos prévios de vários pesquisadores. Para elaboração das planilhas emergéticas foram utilizados os coeficientes de

transformidade de vários desses estudos diretamente da fonte e também em consultas ao Manual de Cálculo Emergético e da Tabela Geral de Transformidades, disponível no site do Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada - LEIA da UNICAMP.

As análises de energia para cada sistema de produção dos experimentos foram estruturadas por ano-agrícola (2013/14; 14/15 e 15/16) e no conjunto dos três anos (2013 a 2016), com vistas a obter os indicadores e índices parciais, a cada ano (curto prazo), e os indicadores e índices do ciclo completo (médio prazo). Como a sustentabilidade está sempre no futuro (GLIESSMAN, 2005) embora se construa a cada passo que se avança na sua busca (ALTIERI, 2002), a organização dos dados, desta maneira, permite avaliar o conjunto dos indicadores e os índices de sustentabilidade para cada sistema em curto e médio prazo, tornando possível vislumbrar como será o comportamento do sistema em longo prazo.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O diagrama ecossistêmico (Figura 1) foi elaborado considerando cada etapa dos tratamentos (ano/safra) e todas as contribuições (fluxos de energia e matéria) avaliadas durante a condução do experimento, permitindo a observação completa dos processos energéticos básicos ocorridos em cada sistema e no conjunto dos três sistemas: entradas e saídas, produção e dissipação de energia.

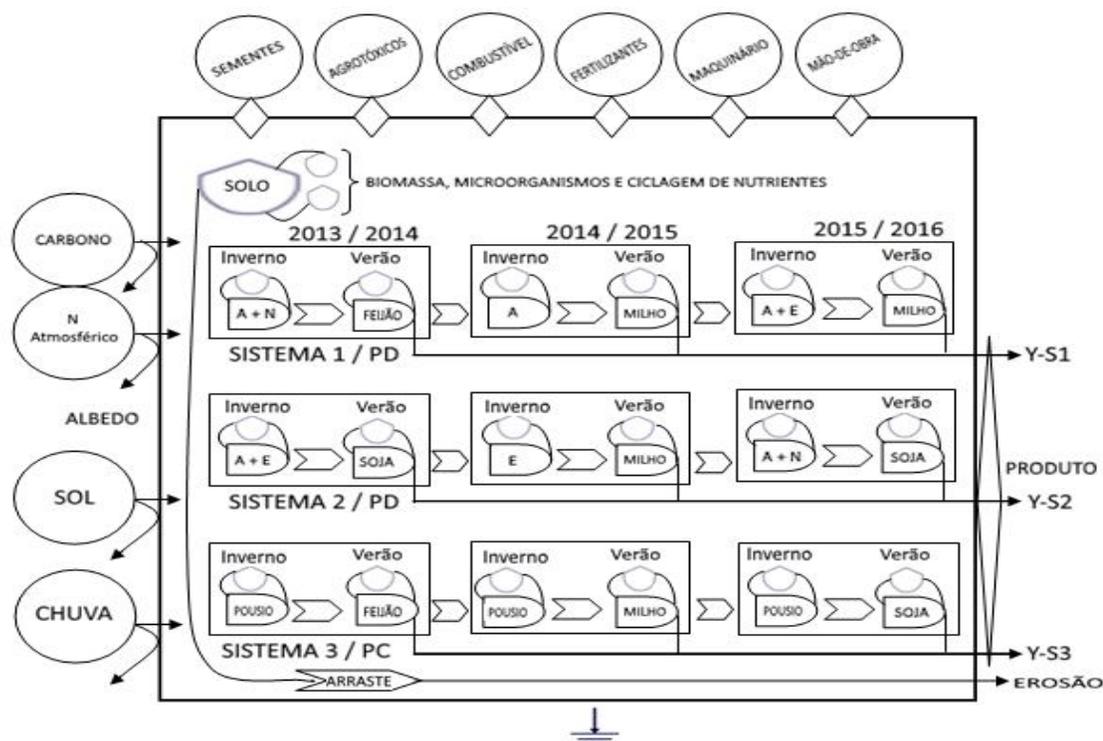


Figura 1. Diagrama ecossistêmico dos sistemas de produção avaliados.

Na elaboração do diagrama também foi considerada a hierarquia universal da energia proposta por Odum (1996). Desta forma, as contribuições da natureza (recursos renováveis) foram agrupadas à esquerda do diagrama (sol, chuva, N atmosférico e CO₂). As contribuições da economia, à direita e acima (aporte de energia externa), contemplando recursos parcialmente renováveis (sementes e mão de obra) e recursos não renováveis, com alta transformidade (combustível, fertilizantes, agrotóxicos e maquinário).

As análises emergéticas foram realizadas para cada ano/safra (balanço anual de energia) para os três tratamentos. As análises anuais permitem visualizar todas as contribuições e a energia total para cada etapa dos sistemas, possibilitando compreender se contribuem positivamente ou negativamente para a sustentabilidade dos sistemas como um todo (Tabelas 6 a 14).

Após o cálculo da energia total para cada etapa dos sistemas, foram calculados os indicadores emergéticos (Tabela 2): energia total do sistema (Y), transformidade do sistema (TR), taxa de rendimento emergético (EYR), renovabilidade (R%), taxa de investimento emergético (EIR), carga ambiental (ELR) e índice de sustentabilidade emergética (ESI).

Tabela 2. Indicadores emergéticos por tratamento. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Tratamento	Indicador	Unidade	Resultados por ano/safra			Média
			2013/14	2014/15	2015/16	
1	Y	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,18E+15	8,33E+15	9,86E+15	8,79E+15
2	Y	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	10,40E+15	8,56E+15	9,74E+15	9,58E+15
3	Y	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,35E+15	5,67E+15	5,86E+15	5,29E+15
1	TR	seJ J ⁻¹	3,77	2,31	2,99	3,02
2	TR	seJ J ⁻¹	1,37	1,76	1,64	1,59
3	TR	seJ J ⁻¹	1,75	1,96	1,03	1,58
1	EYR	Adimensional	2,34	1,76	2,16	2,09
2	EYR	Adimensional	2,44	1,90	2,51	2,28
3	EYR	Adimensional	1,76	1,60	2,41	1,93
1	EIR	Adimensional	0,75	1,32	0,86	0,98
2	EIR	Adimensional	0,69	1,11	0,66	0,82
3	EIR	Adimensional	1,31	1,66	0,71	1,23
1	ELR	Adimensional	0,77	1,36	0,89	1,01
2	ELR	Adimensional	0,71	1,15	0,68	0,85
3	ELR	Adimensional	2,47	2,76	1,09	2,11
1	R	%	56,54	42,29	53,02	50,62
2	R	%	58,43	46,50	59,56	54,83
3	R	%	28,82	26,58	47,90	34,43
1	ESI	Adimensional	3,05	1,29	2,44	2,26
2	ESI	Adimensional	3,43	1,65	3,70	2,93
3	ESI	Adimensional	0,71	0,58	2,22	1,17

A energia total (Y) dos três sistemas foi $8,79E+15$ para T1; $9,58E+15$ para T2; e $5,29E+15$ para T3 (Tabela 2), sendo diretamente proporcional à produtividade obtida, comparando-se as mesmas culturas (Tabelas 3, 4 e 5), dentro de cada sistema (Figura 2). Isso significa que os sistemas avaliados produziram energia, na forma de produto colhido por unidade de área, na mesma proporção da energia requerida ao longo do processo de produção. Quanto maior a energia do sistema, mais recursos, na forma de energia incorporada, são requeridos ao longo do ciclo de produção. Mais processos de transformação ocorrem visando converter energia de baixa qualidade em energia mais concentrada, de alta qualidade, de acordo com a hierarquia universal da energia (ODUM, 1996; ORTEGA, 2002; BROWN e ULGIATI, 2004; AGOSTINHO, 2009).

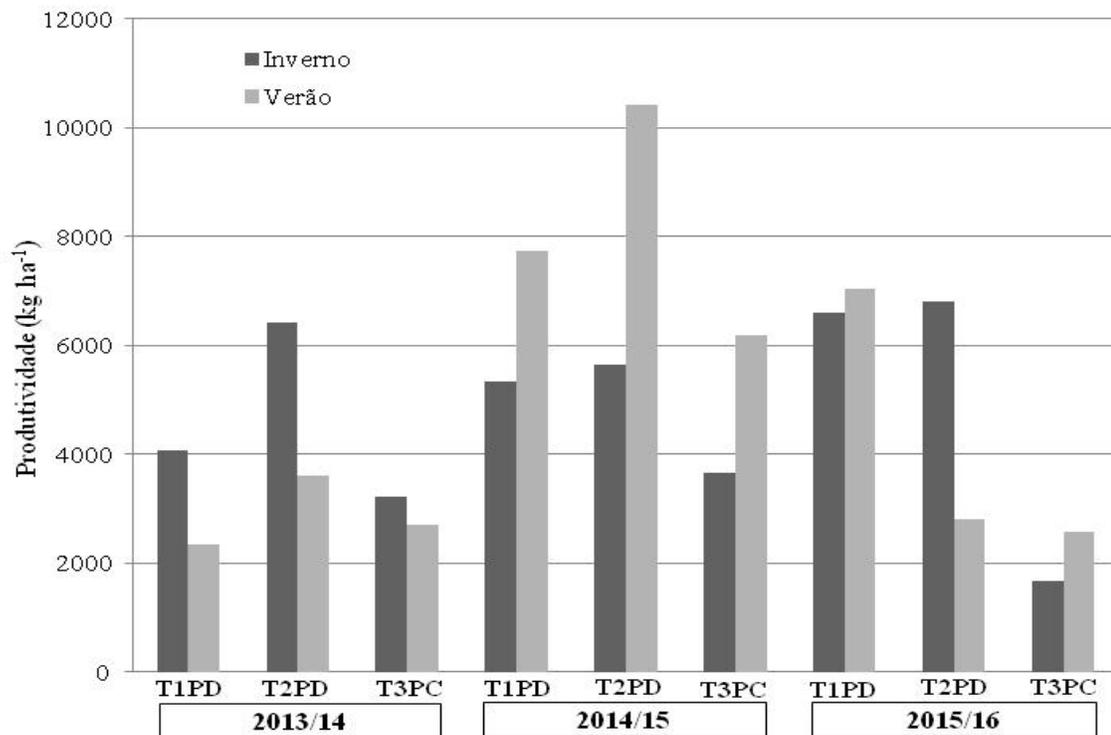


Figura 2. Produtividade dos sistemas no ciclo completo de rotação de culturas.

Os indicadores emergéticos não podem ser interpretados isoladamente (ODUM, 1996), ou apenas comparados com indicadores obtidos em outros estudos (BROWN e ULGIATI, 1997), uma vez que os mesmos estão intimamente relacionados entre si e atrelados às características do sistema de produção em estudo (ORTEGA, 2002) que podem ser diferentes se comparados a outros sistemas. Por isso é fundamental conhecer o sistema em estudo e compreender as relações de energia estabelecidas nos seus fluxos.

A análise de viabilidade da aplicação da metodologia emergética para avaliação da sustentabilidade exigiu o confronto dos indicadores e dos índices emergéticos obtidos nesse estudo com os parâmetros agronômicos mais relevantes. Desta forma, a produtividade final e os principais componentes de rendimento, para cada cultura e para cada etapa dos sistemas estudados, são apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3. Produtividade final e componentes de rendimento para a cultura da soja. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Ano-Safra	T ^(a)	M ^(b)	n° leg. pl. ^(c)	n° gr. leg. ^(d)	n° gr. pl. ^(e)	PMG (g) ^(f)	P ^(g)
2013/2014	2	PD	33,30	2,53	83,25	177,67	3607
2015/2016	2	PD	34,80	2,28	76,87	145,74	2815
2015/2016	3	PC	30,23	2,23	65,03	118,40	2585

^(a) tratamento; ^(b) manejo; ^(c) n° legumes por planta; ^(d) n° grãos por legume; ^(e) n° grãos por planta; ^(f) peso de mil grãos; ^(g) produtividade corrigida a 13% em kg ha⁻¹.

Tabela 4. Produtividade final e componentes de rendimento para a cultura do feijão. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Ano-Safra	T ^(a)	M ^(b)	n° leg. pl. ^(c)	n° gr. leg. ^(d)	n° gr. pl. ^(e)	PMG (g) ^(f)	P ^(g)
2013/2014	1	PD	13,80	4,25	58,56	248,65	2358
2013/2014	3	PC	13,75	4,16	57,33	254,12	2700

^(a) tratamento; ^(b) manejo; ^(c) n° legumes por planta; ^(d) n° grãos por legume; ^(e) n° grãos por planta; ^(f) peso de mil grãos; ^(g) produtividade corrigida a 13% em kg ha⁻¹.

Tabela 5. Produtividade final e componentes de rendimento para a cultura do milho. UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Ano-Safra	T ^(a)	M ^(b)	n° e. p. ^(c)	n° f.e. ^(d)	n° gr. e. ^(e)	n° gr. p. ^(f)	PMG (g) ^(g)	P ^(h)
2014/2015	1	PD	1,02	14,70	435,84	445,84	351,95	7739
2014/2015	2	PD	1,12	15,60	484,58	541,12	309,51	10414
2014/2015	3	PC	1,06	15,40	499,62	526,93	301,22	6190
2015/2016	1	PD	1,00	14,80	514,96	514,96	320,05	7050

^(a) tratamento; ^(b) manejo; ^(c) n° espigas por planta; ^(d) n° fileiras por espiga; ^(e) n° grãos por planta; ^(f) n° de grãos por planta; ^(g) peso de mil grãos; ^(h) produtividade corrigida a 13% em kg ha⁻¹.

O ponto de partida para a interpretação de uma análise emergética deve ser a observação do ESI, pois é o índice que avalia a sustentabilidade com base na emergia de cada sistema (ODUM, 1996; ORTEGA et al., 2010; WANG et al., 2014).

Segundo Odum (1996), ESI < 1 indica sistema insustentável e ESI > 1 indica sistemas que contribuem para a economia sem grave perturbação ambiental. Valores intermediários: 1 < ESI < 5 caracterizam sustentabilidade em médio prazo e ESI > 5 indica sustentabilidade em longo prazo.

Observando-se a Tabela 2, todos os sistemas se encontram na faixa de valores intermediários ($1 < \text{ESI} < 5$), o que significa que são sustentáveis em médio prazo. Para serem sustentáveis em longo prazo, os sistemas de produção agrícola precisam ter $\text{ESI} > 5$. Entretanto, as médias de todos os sistemas avaliados apresentaram $\text{ESI} > 1$, o que significa que contribuem para o sistema econômico sem grave perturbação ambiental em médio prazo (ODUM, 1996; BROWN e ULGIATI, 2004; ORTEGA et al., 2010).

Os resultados apontam a existência de diferenças tanto para ESI quanto para os demais indicadores dentro de cada sistema avaliado (Tabela 2). Essas diferenças decorrem em consequência das características distintas para cada etapa avaliada (Tabelas 6 a 14), em termos de contribuições ao sistema como um todo (fluxos de energia), na forma de aporte de recursos renováveis (N de fixação biológica, maior incidência de radiação ou mais chuva) ou uso mais intensivo de recursos não renováveis (combustível, agrotóxicos, mobilização de solo) e, também, conforme a relação energia investida x produtividade obtida (energia do sistema).

Tabela 6. Análise emergética para T1, ano-safra: 2013/14 (aveia + nabo / feijão). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Fluxos Matéria e Energia no Sistema				Conversão Unidades		Transformidade		Energia
N ^(a)	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
1	Radiação solar	6,52E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,52E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	6,52E+13
2	Precipitação	2.794	mm m ² ano ⁻¹	1,40E+11	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	4,28E+15
3	N atmosférico	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,60E+12	seJ kg ⁻¹	2,76E+14
R^(b)								4,63E+15
4	Erosão	1.500	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,48E+08	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	6,26E+13
N^(c)								6,26E+13
I = R+N^(d)								4,69E+15
5	Sementes (A+N)	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	1,00E+14
6	Sementes (Feijão)	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	6,00E+13
7	Fertilizante (N)	121	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	121	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	4,60E+14
8	Fertilizante (P)	120	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	120	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	2,14E+15
9	Fertilizante (K)	54	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	54	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	9,40E+13
10	Herbicidas	12,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,75	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,30E+14
11	Fungicidas	1,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,05	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,55E+13
12	Inseticidas	1	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	0,7	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,04E+13
13	Combustível	26	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,24E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	2,31E+14
14	Depreciação	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,18E+14
M^(e)								3,35E+15
15	Mão-de-obra	83,82	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	36,60	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	1,39E+14
S^(f)								1,39E+14
F = M+S^(g)								3,49E+15
Y^(h)								8,18E+15
16	Produto (Feijão)	2.357,53	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,19E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,80E+04	seJ J ⁻¹	2,17E+15
P⁽ⁱ⁾								2,17E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice A. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Energia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

Na safra 2013/14, verifica-se que o feijão semeado sobre a resteva de aveia preta + nabo forrageiro (T1) apresentou maior ESI quando comparado aos resultados obtidos nas etapas subsequentes de rotação de culturas, nas safras seguintes, para o mesmo tratamento (Tabela 2), sendo mais eficiente no uso dos recursos (energia). Também foi menos impactante ao ambiente, tendo apresentado maior percentual de renovabilidade (56,54%) e menor EIR (0,75), indicando menos gasto com energia não renovável, além de menor ELR (0,77), mostrando que este arranjo depende menos de recursos externos que os demais arranjos do mesmo sistema, portanto, mais sustentável do que as demais combinações do mesmo sistema.

Brown e Ulgiati (1997) demonstraram que sistemas desenvolvidos apresentam valores de ESI > 1 e > 10. Em contrapartida, verificaram que valores acima de 10 são indicativos de sistemas subdesenvolvidos, devido, basicamente, à insuficiência de recursos locais, e que sistemas com ESI < 1 exigiam uma grande entrada de energia externa para subsistirem, com predominância de recursos não renováveis, portanto insustentáveis em longo prazo.

Tabela 7. Análise emergética para T1, ano-safra: 2014/15 (aveia / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

N ^(a)	Fluxos Matéria e Energia no Sistema			Conversão Unidades		Transformidade		Energia seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	
1	Radiação solar	6,44E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,44E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	6,44E+13
2	Precipitação	2255	mm m ² ano ⁻¹	1,13E+11	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	3,46E+15
R^(b)								3,52E+15
3	Erosão	1500	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,48E+08	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	6,26E+13
N^(c)								6,26E+13
I = R+N^(d)								3,58E+15
4	Sementes (Aveia)	80	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	80	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	8,00E+13
5	Sementes (Milho)	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+13	seJ kg ⁻¹	2,00E+14
6	Fertilizante (N)	207	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	207	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	7,87E+14
7	Fertilizante (P)	156	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	156	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	2,78E+15
8	Fertilizante (K)	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	1,88E+14
9	Herbicidas	20,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	14,35	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	2,12E+14
10	Inseticidas	1	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	0,7	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,04E+13
11	Combustível	26	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,24E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	2,31E+14
12	Depreciação	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,18E+14
M^(e)								4,60E+15
13	Mão-de-obra	83,82	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	37,08	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	1,41E+14
S^(f)								1,41E+14
F = M+S^(g)								4,74E+15
Y^(h)								8,33E+15
14	Produto (Milho)	7739,42	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,46E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,10E+04	seJ J ⁻¹	3,61E+15
P⁽ⁱ⁾								3,61E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice B. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Energia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

Ao comparar os indicadores obtidos neste estudo com os parâmetros elaborados por Brown e Ulgiati (1997), em relação aos valores de ESI, verifica-se que apenas T3, nas safras

de 2013/14 (Tabela 12) e 2014/15 (Tabela 13) apresentou valores menores do que um, demonstrando que se trata de um sistema insustentável em longo prazo. Esse resultado se confirma ao observarem-se os demais indicadores obtidos para T3, que também apresentou menor R% (34,43% contra 50,62% para T1 e 54,83% para T2), mostrando que o sistema possui baixo percentual de renovabilidade em comparação com os demais sistemas avaliados. Esses resultados também corroboraram para o valor mais baixo de EYR (Tabela 2) em relação aos outros sistemas, o que significa menor habilidade do sistema em transformar recursos locais em produtos, em resposta aos investimentos externos. Segundo Ortega et al. (2010), valores de EYR oscilam entre 1 e 4 na maioria dos sistemas agrícolas, sendo considerado baixo quando inferior a 2.

Tabela 8. Análise emergética para T1, ano-safra: 2015/16 (aveia + ervilhaca / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Fluxos Matéria e Energia no Sistema				Conversão Unidades		Transformidade		Energia
N ^(a)	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
1	Radiação solar	5,66E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	5,66E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	5,66E+13
2	Precipitação	3072	mm m ² ano ⁻¹	1,54E+11	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	4,71E+15
3	N atmosférico	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,60E+12	seJ kg ⁻¹	4,60E+14
R^(b)								5,23E+15
4	Erosão	1500	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,05E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	7,75E+13
N^(c)								7,75E+13
I = R+N^(d)								5,31E+15
5	Sementes (A+E)	130	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	130	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	1,30E+14
6	Sementes (Milho)	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+13	seJ kg ⁻¹	2,00E+14
7	Fertilizante (N)	152	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	152	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	5,78E+14
8	Fertilizante (P)	156	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	156	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	2,78E+15
9	Fertilizante (K)	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	1,88E+14
10	Herbicidas	17,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	12,25	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,81E+14
11	Inseticidas	1	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	0,7	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,04E+13
12	Combustível	26	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,24E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	2,31E+14
13	Depreciação	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,18E+14
M^(e)								4,41E+15
14	Mão-de-obra	129,27	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	37,58	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	1,43E+14
S^(f)								1,43E+14
F = M+S^(g)								4,56E+15
Y^(h)								9,86E+15
15	Produto (Milho)	7049,14	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,07E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,10E+04	seJ J ⁻¹	3,30E+15
P⁽ⁱ⁾								3,30E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice C. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Energia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

Observando-se os indicadores EIR e ELR, percebe-se que os maiores valores também foram apresentados para T3: 1,23 e 2,11 - respectivamente (Tabela 2). Ambos estão diretamente relacionados, uma vez que EIR avalia o uso eficiente da energia em recursos da economia que impactam positivamente o sistema. Quanto maior o valor, maior o gasto com energia não renovável (ODUM, 1996), colaborando para o aumento do custo de produção e

diminuindo a competitividade no mercado (BROWN e ULGIATI, 2004). Por sua vez, ELR indica a pressão do sistema sobre o ambiente, sendo que $ELR = 0$ indica ecossistemas naturais maduros (ODUM, 1996). Quanto maior o ELR, mais estresse o sistema causa ao ambiente. Mesmo considerado moderadamente baixo ($2 < ELR < 3$), foram valores significativamente maiores que os encontrados para T1 e T2, mostrando que o plantio convencional foi muito mais impactante que o sistema de plantio direto, nos tratamentos avaliados no experimento.

Como se trata de um sistema de baixo aproveitamento energético dos recursos (solo, água, radiação e disponibilidade de área), uma vez que passa a maior parte do tempo em desuso (pousio de inverno), com manejo agressivo (prática de subsolagem e gradagem), que gera maiores perdas de energia (erosão, dissipação de calor, evaporação da umidade, rápida degradação de matéria orgânica), bem como a necessidade de maior aporte de recursos não renováveis, especialmente de origem fóssil (combustível, agrotóxicos e fertilizantes) os indicadores emergéticos apresentam-se coerentes na análise de sustentabilidade dos sistemas estudados.

Tabela 9. Análise emergética para T2, ano-safra: 2013/14 (aveia + ervilhaca / soja). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Fluxos Matéria e Energia no Sistema				Conversão Unidades		Transformidade		Energia
N ^(a)	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
1	Radiação solar	6,52E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,52E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	6,52E+13
2	Precipitação	2794	mm m ² ano ⁻¹	1,40E+11	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	4,28E+15
3	N atmosférico	380	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	380	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,60E+12	seJ kg ⁻¹	1,75E+15
R^(b)								6,10E+15
4	Erosão	1500	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,48E+08	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	6,26E+13
N^(c)								6,26E+13
I = R+N^(d)								6,16E+15
5	Sementes (A+E)	130	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	130	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	1,30E+14
6	Sementes (Soja)	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+13	seJ kg ⁻¹	6,00E+14
7	Fertilizante (N)	67	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	67	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	2,55E+14
8	Fertilizante (P)	138	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	138	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	2,46E+15
9	Fertilizante (K)	69	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	69	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	1,20E+14
10	Herbicidas	17,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	12,25	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,81E+14
11	Fungicidas	2	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,4	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	2,07E+13
12	Inseticidas	1,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,05	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,55E+13
13	Combustível	27	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,29E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	2,40E+14
14	Depreciação	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,18E+14
M^(e)								4,14E+15
15	Mão-de-obra	83,82	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	36,60	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	1,39E+14
S^(f)								1,39E+14
F = M+S^(g)								4,28E+15
Y^(h)								1,04E+16
16	Produto (Soja)	3606,54	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,53E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,01E+05	seJ J ⁻¹	7,61E+15
P⁽ⁱ⁾								7,61E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice D. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Energia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

As diferenças tornam-se mais evidentes ao considerarem-se os valores obtidos para cada ano/safra, em cada etapa do sistema. Nesse caso, os indicadores obtidos para T3 na safra 2013/14 (pousio/feijão) e 2014/15 (pousio/milho) evidenciam que se trata de um sistema de baixa sustentabilidade, sem capacidade de subsistir em longo prazo. Nota-se, porém, que na safra 2015/16 (pousio/soja), os indicadores foram melhores do que os obtidos nas safras anteriores (Tabela 2). Apesar de se tratar do mesmo sistema (T3), houve uma contribuição significativamente maior na entrada de recursos renováveis: o nitrogênio de origem atmosférica (Tabela 14). É um fluxo de energia que amplia a fração renovável do sistema, pois apresenta um alto coeficiente de transformação: 4,60E+12 (BROWN e ULGIATI, 2004; ORTEGA, 2002), elevando os valores de todos os indicadores e do ESI em relação aos obtidos para os demais arranjos do mesmo sistema, pousio/feijão (Tabela 12) e pousio/milho (Tabela 13). O nitrogênio sintético é um fertilizante de origem fóssil, que apresenta alta transformabilidade (ODUM, 1996). Segundo a Embrapa (FERREIRA e MENDES, 2014), são necessários cerca de seis barris de petróleo para produzir uma tonelada de fertilizante nitrogenado (uréia) no processo de produção.

Tabela 10. Análise emergéctica para T2, ano-safra: 2014/15 (ervilhaca / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

N ^(a)	Fluxos Matéria e Energia no Sistema			Conversão Unidades		Transformidade		Emergia seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	
1	Radiação solar	6,44E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,44E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	6,44E+13
2	Precipitação	2255	mm m ² ano ⁻¹	1,13E+11	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	3,46E+15
3	N atmosférico	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,60E+12	seJ kg ⁻¹	4,60E+14
R^(b)								3,98E+15
4	Erosão	1500	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,05E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	7,75E+13
N^(c)								7,75E+13
I = R+N^(d)								4,06E+15
5	Sementes (E)	50	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	50	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	5,00E+13
6	Sementes (Milho)	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+13	seJ kg ⁻¹	2,00E+14
7	Fertilizante (N)	152	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	152	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	5,78E+14
8	Fertilizante (P)	156	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	156	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	2,78E+15
9	Fertilizante (K)	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	1,88E+14
10	Herbicidas	20,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	14,35	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	2,12E+14
11	Inseticidas	1	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	0,7	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,04E+13
12	Combustível	26	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,24E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	2,31E+14
13	Depreciação	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,18E+14
M^(e)								4,36E+15
14	Mão-de-obra	83,82	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	37,08	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	1,41E+14
S^(f)								1,41E+14
F = M+S^(g)								4,50E+15
Y^(h)								8,56E+15
15	Produto (Milho)	10414,44	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,01E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,10E+04	seJ J ⁻¹	4,87E+15
P⁽ⁱ⁾								4,87E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice E. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Energia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

Agostinho (2009) estudou a sustentabilidade dos sistemas de produção agropecuários da bacia hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo através da análise emergética e da análise de ciclo de vida, e obteve para os sistemas de produção de cana, cana + amendoim, cana + soja, cana + amendoim + soja, fruticultura, pastagem, eucalipto + pinus e seringueira, respectivamente, os seguintes ESI: 0,79; 0,79; 0,82; 0,80; 0,62; 0,32; 0,97 e 1,38 – caracterizando-os como sistemas de baixa sustentabilidade, demandando elevado aporte de energia externa, predominantemente, de recursos não renováveis (ODUM, 1996; BROWN e ULGIATI, 2004). Ainda, este mesmo trabalho apresentou R% entre 20 e 30%, ficando na média dos percentuais encontrados na literatura para estudos de energia em sistemas agrícolas convencionais no Brasil: 25% (ORTEGA et al., 2005), 30% (CAVALETT et al., 2006) e 25% (AGOSTINHO et al., 2008). Comparando-se os resultados de ESI e R% encontrados por Ortega et al. (2005), Cavalett et al. (2006), Agostinho et al. (2008) e Agostinho (2009), observa-se muita semelhança com os obtidos neste trabalho, para T3 (Tabela 2), especialmente nos arranjos de pousio / feijão (ESI = 0,71 e R% = 28,82) e pousio / milho (ESI = 0,58 e R% = 26,58).

Tabela 11. Análise emergética para T2, período 2015/16 (aveia + nabo / soja). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

N ^(a)	Fluxos Matéria e Energia no Sistema			Conversão Unidades		Transformidade		Emergia seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	
1	Radiação solar	5,66E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	5,66E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	5,66E+13
2	Precipitação	3072	mm m ² ano ⁻¹	1,54E+11	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	4,71E+15
3	N atmosférico	224	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	224	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,60E+12	seJ kg ⁻¹	1,03E+15
R^(b)								5,80E+15
4	Erosão	1500	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,48E+08	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	6,26E+13
N^(c)								6,26E+13
I = R+N^(d)								5,86E+15
5	Sementes (A+N)	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	100	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	1,00E+14
6	Sementes (Soja)	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+13	seJ kg ⁻¹	6,00E+14
7	Fertilizante (N)	116	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	116	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	4,41E+14
8	Fertilizante (P)	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	108	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	1,92E+15
9	Fertilizante (K)	54	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	54	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	9,40E+13
10	Herbicidas	17,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	12,25	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,81E+14
11	Fungicidas	2	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,4	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	2,07E+13
12	Inseticidas	1,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,05	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,55E+13
13	Combustível	27	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,29E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	2,40E+14
14	Depreciação	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	17,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,18E+14
M^(e)								3,73E+15
15	Mão-de-obra	129,27	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	37,57	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	1,43E+14
S^(f)								1,43E+14
F = M+S^(g)								3,88E+15
Y^(h)								9,74E+15
16	Produto (Soja)	2815,49	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	5,88E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,01E+05	seJ J ⁻¹	5,94E+15
P⁽ⁱ⁾								5,94E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice F. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Emergia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

Cavalett e Ortega (2007) analisaram a produção de soja no Estado do Mato Grosso, com base na metodologia emergética, avaliando a eficiência produtiva e a sustentabilidade emergética da cadeia produtiva da soja para grandes propriedades com foco na monocultura e para pequenas propriedades, onde a soja não era a única alternativa de renda. Concluíram que o modelo de produção nas propriedades menores foi mais eficiente, apresentando menor TR (81.000 seJ J⁻¹ para 107.000 seJ J⁻¹); maior R% (30,4% para 27,5%), demonstrando menor dependência de recursos não renováveis; maior EYR (1,86 para 1,72), indicando maior rendimento líquido; e menor EIR (1,16 para 1,40), mostrando que necessitam de menor investimento.

Tabela 12. Análise emergética para T3, ano-safra: 2013/14 (pousio / feijão). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Fluxos Matéria e Energia no Sistema				Conversão Unidades		Transformidade		Emergia
N ^(a)	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
1	Radiação solar	2,08E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	2,08E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	2,08E+13
2	Precipitação	790	mm m ² ano ⁻¹	3,95E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	1,21E+15
3	N atmosférico	5	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	5	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,60E+12	seJ kg ⁻¹	2,30E+13
R^(b)								1,25E+15
4	Erosão	15000	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,48E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	6,26E+14
N^(c)								6,26E+14
I = R+N^(d)								1,88E+15
5	Sementes (Feijão)	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+12	seJ kg ⁻¹	6,00E+13
6	Fertilizante (N)	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	2,28E+14
7	Fertilizante (P)	72	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	72	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	1,28E+15
8	Fertilizante (K)	30	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	30	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	5,22E+13
9	Herbicidas	9,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	9,84E+13
10	Fungicidas	1,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,05	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,55E+13
11	Inseticidas	1	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	0,7	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,04E+13
12	Combustível	50	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	2,39E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	4,44E+14
13	Depreciação	27,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	27,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,85E+14
M^(e)								2,38E+15
14	Mão-de-obra	55,88	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	24,40	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	9,27E+13
S^(f)								9,27E+13
F = M+S^(g)								2,47E+15
Y^(h)								4,35E+15
15	Produto (Feijão)	2700,43	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,66E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,80E+04	seJ J ⁻¹	2,49E+15
P⁽ⁱ⁾								2,49E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice G. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Emergia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

É interessante ressaltar que tanto o trabalho de Agostinho (2009) como o de Cavalett e Ortega (2007), ocorreu em sistemas de produção com características distintas das pesquisadas no presente estudo. Nesse sentido, observou-se que não existem estudos de aplicação desta metodologia na Região Sul do Brasil, no tocante a produção de grãos no sistema de plantio direto e convencional. Destaca-se ainda, que nenhum dos estudos encontrados na literatura, envolvendo as culturas de soja, milho e feijão, foi realizado a partir de dados coletados em

experimentos de campo. A maioria dos trabalhos é realizada com base em levantamento expedito de dados e informações, o que configura diferença substancial na metodologia deste trabalho com os demais estudos encontrados na literatura.

Comparando-se os resultados dos valores encontrados por Agostinho (2009) e por Cavalett e Ortega (2007), observou-se, novamente, grande similaridade com os obtidos para T3, tanto para R% como para EYR e EIR. Porém os resultados apresentados para T1 e T2 novamente foram bastante superiores. É preciso ressaltar que os valores obtidos para T1 e T2 neste trabalho são de sistemas com alto potencial de rendimento para a região onde foi realizada a pesquisa, com culturas de alta produtividade (especialmente soja e milho) e diferentes coberturas de inverno (diversificação, ciclagem de nutrientes, proteção contra erosão, manutenção da umidade), em solo fértil (típico do sistema plantio direto bem manejado), aliado às condições favoráveis de clima (chuva e radiação solar) obtidos nos três anos de condução do experimento.

Wang et al. (2014) aplicaram a metodologia emergética em fazendas de produção tradicional e de larga-escala na Planície do Norte da China (região onde predomina o cultivo de grãos). As fazendas tradicionais obtiveram, na média, ESI de 0,11 para trigo e de ESI de 5,02 para milho (média ponderada de 2,56 entre as duas culturas), EYR de 1,19 e 2,35 e ELR de 10,59 e 0,47 para trigo e milho, respectivamente. As fazendas de larga-escala obtiveram, em média, ESI de 0,18, EYR de 1,23 e ELR de 6,72 para o sistema de duplo-corte trigo/milho (WANG et al., 2014). Nesse estudo, os pesquisadores concluíram que o trigo cultivado nos sistemas tradicionais chineses exige grande entrada de insumos externos (indicado pelo ELR elevado), com predomínio de recursos não renováveis e baixa produtividade, mas que o impacto desse cultivo é amenizado pelo cultivo mais sustentável e eficiente de milho (baixo ELR), enquanto nas fazendas modernas o cultivo de milho também é altamente dependente de recursos energéticos não renováveis, tornando o sistema de duplo-corte insustentável em longo prazo, apesar de aparentemente lucrativo em curto prazo.

O valor médio do ESI obtido nas fazendas tradicionais chinesas ($ESI = 2,56$) estudadas por Wang et al. (2014) foi muito semelhante aos valores obtidos neste estudo, para T2 ($ESI = 2,93$) e T1 ($ESI = 2,26$), mostrando coerência da metodologia ao avaliar sistemas de produção com características semelhantes através da obtenção de indicadores com resultados aproximados. Wang et al., 2014 concluem que a agricultura tradicional chinesa apresenta sistemas mais diversificados e menos dependentes de recursos não renováveis, de maneira muito similar aos sistemas de produção para os tratamentos T1 e T2 do experimento.

Comparando o estudo dos pesquisadores chineses com este trabalho, verifica-se que, da mesma forma com que o milho impactou positivamente o sistema naquele caso (cultivo mais eficiente e sustentável dessa cultura), possibilitando a melhoria dos indicadores e do ESI do sistema, que na cultura do trigo eram muito baixos, o mesmo se percebe nos sistemas aqui estudados, em relação aos arranjos de culturas de verão com as coberturas de inverno, onde houve interações positivas e/ou negativas dentro de um mesmo sistema ou ao compararem-se os sistemas entre si, para as mesmas culturas e safras.

Tabela 13. Análise emergética para T3, ano-safra: 2014/15 (pousio / milho). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

N ^(a)	Fluxos Matéria e Energia no Sistema		Conversão Unidades		Transformidade		Emergia seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	
	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor		Un.
1	Radiação solar	3,23E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,23E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	3,23E+13
2	Precipitação	964	mm m ² ano ⁻¹	4,82E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	1,47E+15
R^(b)								1,51E+15
3	Erosão	15000	kg/ha.ano	8,48E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	6,26E+14
N^(c)								6,26E+14
I = R+N^(d)								2,13E+15
4	Sementes (Milho)	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	20	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+13	seJ kg ⁻¹	2,00E+14
5	Fertilizante (N)	152	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	152	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	5,78E+14
6	Fertilizante (P)	96	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	96	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	1,71E+15
7	Fertilizante (K)	78	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	78	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	1,36E+14
8	Herbicidas	17,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	12,25	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,81E+14
9	Inseticidas	1	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	0,7	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,04E+13
10	Combustível	50	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	2,39E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	4,44E+14
11	Depreciação	27,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	27,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,85E+14
M^(e)								3,44E+15
12	Mão-de-obra	55,88	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	24,72	US\$/ha/ano	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	9,39E+13
S^(f)								9,39E+13
F = M+S^(g)								3,54E+15
Y^(h)								5,67E+15
13	Produto (Milho)	6189,55	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,57E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,10E+04	seJ J ⁻¹	2,89E+15
P⁽ⁱ⁾								2,89E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice H. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Emergia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

Um exemplo clássico dessas interações (conhecido e amplamente estudado na agronomia) que os indicadores emergéticos expressaram com clareza nesse estudo foi a resposta positiva da semeadura de milho sob cobertura de ervilhaca (T2) quando comparado à semeadura de milho sobre aveia preta (T1), para a mesma safra (2014/15) em igualdade de condições (mesma cultivar, adubações, tratamentos fitossanitários, datas de semeadura e demais ações de manejo ao longo do ciclo).

Na Tabela 2 observa-se que o ESI foi de 1,65 para a interação ervilhaca x milho (T2) e de 1,29 para aveia x milho (T1). A interação positiva com ervilhaca aumentou em 20% a sustentabilidade do sistema, além do aumento na fração renovável (R%) e diminuição nos

valores de EIR e ELR, indicando maior eficiência produtiva e aproveitamento de recursos renováveis. A eficiência produtiva fica evidente ao analisar as avaliações emergéticas (Tabelas 7 e 10). Sobre condições idênticas de manejo, radiação e pluviosidade, a interação com ervilhaca rendeu 10.414 kg ha⁻¹ contra 7.739 kg ha⁻¹. Os resultados demonstram um incremento na fração renovável de energia para T2 (Tabela 10) em relação à T1 (Tabela 7), correspondente à fixação de nitrogênio atmosférico pela ervilhaca.

Tabela 14. Análise emergética para T3, ano-safra: 2015/16 (pousio / soja). UFFS, Câmpus Erechim/RS, 2016.

Fluxos Matéria e Energia no Sistema				Conversão Unidades		Transformidade		Energia
N ^(a)	Descrição	Quant.	Un.	Quant.	Un.	Valor	Un.	seJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
1	Radiação solar	2,41E+07	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	2,41E+13	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1	seJ J ⁻¹	2,41E+13
2	Precipitação	1378	mm m ² ano ⁻¹	6,89E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,06E+04	seJ J ⁻¹	2,11E+15
3	N atmosférico	147	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	147	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	4,60E+12	seJ kg ⁻¹	6,76E+14
R^(b)								2,81E+15
4	Erosão	15000	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	8,48E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	7,38E+04	seJ J ⁻¹	6,26E+14
N^(c)								6,26E+14
I = R+N^(d)								3,43E+15
5	Sementes (Soja)	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	60	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,00E+13	seJ kg ⁻¹	6,00E+14
6	Fertilizante (N)	6	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ kg ⁻¹	2,28E+13
7	Fertilizante (P)	48	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	48	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,78E+13	seJ kg ⁻¹	8,54E+14
8	Fertilizante (K)	24	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	24	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,74E+12	seJ kg ⁻¹	4,18E+13
9	Herbicidas	14,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	10,15	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,50E+14
10	Fungicidas	2	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,4	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	2,07E+13
11	Inseticidas	1,5	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,05	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,48E+13	seJ kg ⁻¹	1,55E+13
12	Combustível	50	L ha ⁻¹ ano ⁻¹	2,39E+09	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,86E+05	seJ J ⁻¹	4,44E+14
13	Depreciação	27,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	27,65	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	6,70E+12	seJ kg ⁻¹	1,85E+14
M^(e)								2,33E+15
14	Mão-de-obra	86,18	R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	25,05	US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹	3,80E+12	seJ US\$ ⁻¹	9,52E+13
S^(f)								9,52E+13
F = M+S^(g)								2,43E+15
Y^(h)								5,86E+15
15	Produto (Soja)	2584,77	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	5,63E+10	J ha ⁻¹ ano ⁻¹	1,01E+05	seJ J ⁻¹	5,69E+15
P⁽ⁱ⁾								5,69E+15

^(a) Notas explicativas no apêndice I. ^(b) R: Recursos renováveis da natureza. ^(c) N: Recursos não renováveis da natureza. ^(d) I: Recursos naturais (R+N). ^(e) M: Materiais da economia. ^(f) S: Serviços da economia. ^(g) F: Recursos da economia (M+S). ^(h) Y: Energia total do sistema. ⁽ⁱ⁾ P: Produto (energia disponível no alimento produzido).

Comparando as Tabelas 7 (T1), 10 (T2) e 13 (T3), o milho, para a mesma safra (2014/15), nas mesmas condições climáticas e experimentais (mesma cultivar, adubação e tratos culturais), apresentou respostas totalmente diferentes, caracterizando o impacto do sistema de produção (manejo e rotação de culturas) nas diferenças encontradas. Ao confrontarem-se os indicadores obtidos para o milho na safra 2014/15 (Tabela 2) com os dados de produtividade e componentes de rendimento da cultura (Tabela 5), observa-se que as respostas de ambas as tabelas se alinham, mostrando que os melhores indicadores emergéticos vão ao encontro das melhores respostas produtivas para a cultura, conforme já discutido.

O mesmo raciocínio pode ser observado para as culturas de soja e feijão. Ao compararem-se as respostas dos principais componentes de rendimento e a produtividade final obtida para essas culturas para os diferentes tratamentos e safras (Tabelas 3 e 4), observa-se que essas respostas são diretamente proporcionais ao desempenho dos indicadores para essas culturas (Tabelas 6, 9, 11, 12 e 14).

Da mesma forma, ao analisar-se a Tabela 2, na safra 2015/16, observa-se um valor de ESI bastante superior para T2 (aveia preta + nabo forrageiro / soja) em relação a T1 (aveia preta + ervilhaca / milho). Esse arranjo, inclusive, foi o que apresentou o melhor desempenho entre todos os arranjos estudados ao longo de três safras: maior ESI, maior R% e maior EYR, demonstrando ser a combinação mais sustentável, com maior aproveitamento dos recursos locais disponíveis e maior taxa de renovabilidade, com menor impacto sobre o ambiente (menor ELR) e melhor taxa de rendimento (menor EIR). Por outro lado, os indicadores obtidos para T1 (aveia preta + ervilhaca / milho) também confirmaram um sistema de bom desempenho e eficiente.

Analisando o detalhamento dos fluxos emergéticos desses arranjos (Tabelas 8 e 11), percebe-se que ambos possuem incrementos na fração renovável na forma de nitrogênio atmosférico capturado para o sistema, porém, a eficiência de absorção para a soja em T2 é maior que para ervilhaca em T1. Além disso, o gasto com energia não renovável foi maior no milho (uso de fertilizantes) expresso no ELR da Tabela 2. Outro fato importante é que a energia final obtida no processo produtivo da soja é muito maior do que a obtida com milho (Tabelas 8 e 11), sendo $5,94E+15$ contra $3,30E+15$. Isto acontece por que a metodologia avalia o poder calorífero dos alimentos, que corresponde à energia final obtida. Obtém-se a transformidade do sistema dividindo-se a energia (energia investida) pelo produto (energia final obtida). O milho apresentou uma transformidade significativamente menor ($8,79E+15$) do que a soja ($9,58E+15$), uma vez que a razão da energia pela exergia (produto) foi sensível à quantidade de energia calorífica da soja, revertendo em favor da oleaginosa a maior eficiência produtiva emergética obtida para todos os arranjos avaliados neste estudo.

3.4 CONCLUSÕES

O uso da metodologia emergética para a avaliação da sustentabilidade em agroecossistemas de produção de grãos mostrou-se adequado, com base nos resultados obtidos neste trabalho.

As avaliações emergéticas realizadas mostraram que sistemas de produção de grãos com soja, milho e feijão manejados em plantio direto, com rotação de culturas no verão e com

uso de coberturas de inverno, solteiras ou consorciadas, apresentam melhores indicadores ambientais e econômicos, melhor resposta agronômica (produtividade) e melhor resposta energética (razão entre energia gasta e energia produzida), além de maior fração renovável, sendo, portanto sustentáveis em médio prazo.

Sistemas de produção de grãos em plantio convencional com pousio de inverno apresentaram baixo desempenho energético em função do mau aproveitamento dos recursos locais (solo, água, radiação e disponibilidade de área), do uso intenso de recursos não renováveis, especialmente de origem fóssil (combustível, agrotóxicos e fertilizantes), com práticas agressivas ao ambiente (subsolagem e gradagem), o que resultou em perda de energia no sistema (erosão, dissipação de calor, evaporação da umidade e rápida degradação de matéria orgânica) e menor resposta agronômica (produtividade). Os indicadores mostraram que esse sistema se sustenta apenas em curto prazo.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, F. **Estudo da sustentabilidade dos sistemas de produção agropecuários da bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo através da análise Emergética.** Tese de Doutorado. p. 230 . São Paulo: UNICAMP, 2009.

_____. et al. The use of emergy assessment and the geographical information system to diagnostic small family farms in Brazil. **Ecological Modeling**, 210: 37-57, 2008.

AITA, C. et al. Espécies de inverno como fonte de nitrogênio para o milho no sistema de cultivo mínimo e feijão em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 18: p. 101-108, 1994.

_____. Plantas de cobertura de solo como fontes de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25: 157-1165, 2001.

ALTIERI, M. **Agroecologia. Bases Científicas para uma Agricultura Sustentável.** Guaíba: Agropecuária, 2002.

ALVES, F. P. et al. Composição centesimal de grãos de soja de oito diferentes cultivares. **Embrapa Soja - Documentos**, 328. Londrina: Embrapa Soja, 2011.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico de Taxas de Câmbio do Dólar dos Estados Unidos no Brasil.** Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

BELLEN, H. M. van. **Indicadores de Sustentabilidade. Uma Análise Comparativa.** Rio de Janeiro: FGV, 2005.

BRASIL. **Agenda 21 Brasileira: ações prioritárias.** Comissão de políticas de desenvolvimento sustentável e da agenda 21 brasileira. 2. ed. Brasília/DF: 2004.

_____. **Decreto Presidencial nº 24, de fevereiro de 2004.** Brasília/DF: 2004

_____. **Tabela Brasileira de Composição Centesimal de Alimentos (TACO).** 4. ed. rev. e amp. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação (NEPA). Campinas/SP: UNICAMP, 2011.

BROWN, M. T. Environmental Accounting: Emergy Perspectives on Sustainability. **Dialogo LI. Valoração econômica en el uso de los recursos naturales y el medio ambiente.** Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico del Cono Sur (Procisur). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), p. 47-70, 1998.

_____. et al. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**, 9: 51-69. 1997

_____. Emergy analysis and environmental accounting, **Encyclopedia of Energy**, v. 2: 329-354. 2004.

BRUNDTLAND, N. **Our common future.** Report of the World Commission on Environment and Development, United Nations. 1987. Disponível em: <<https://www.cpp.edu/~tgyoung/rs510/1987-brundtland.pdf>>. Acesso em: 15 Jan. 2015.

CALEGARI, A. et al. **Adubação verde no Sul do Brasil.** Rio de Janeiro: AS-PTA, 1993. p. 346.

CAVALETT, O. **Análise do ciclo de vida da soja.** Dissertação de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2008.

_____. et. al. Análise emergética da produção de soja no Mato Grosso. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, v.2, n.1, fev. 2007.

_____. Emergy a ssesment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. **Ecological Modelling**, 193: 205-224, 2006.

CONAB. **Custos de produção agrícola: a metodologia da Conab.** Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Brasília/DF: Conab, 2013.

_____. **Projeções do Agronegócio.** Brasil 2014/15 a 2024/25. Projeções de longo prazo. Brasília/DF: 2015.

DALMAGO, G. et al. Bases Teóricas para Definição de Indicadores de sustentabilidade para Cultivo de Trigo no Brasil. **Documentos On Line**, 156. Embrapa Trigo: Passo Fundo/RS, 2016.

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno**. Londrina: IAPAR, 1992. p.80.

DUESTERHAUS, P. The SWCS View: sustainability's promise. In: **Journal of Soil and Water Conservation**. Akeny, v. 45, n.1, p.4, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária de Solos (Brasília, DF). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; p. 154. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2013.

FAO. **Sustainable agricultural production: implications for international agricultural research**. FAO Res. and Tech. Paper 4, 1989. p. 131.

FARROW, A.; WINOGRAD, M. Land use modelling at the regional scale: an input to rural sustainability indicators for Central America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 85, n. 1/3, p. 249-268, 2001.

FERREIRA, E; MENDES, I. de C. **Fixação biológica de nitrogênio no feijão comum**. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. EMBRAPA, 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/dia-de-campo-na-tv/busca-de-noticias/-/noticia/2196511/dia-de-campo-na-tv---fixacao-biologica-de-nitrogenio-em-feijao-comum>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

FRANZESE, P. P. et al. **Integrated Environmental Assessment of Agricultural and Farming Production Systems in the Toledo River Basin, Brazil**. UNESCO. Paris, France, 2013.

FRIMAIO, A. et al. Environmental Accounting of Strawberry Conventional Production. 4nd **Intenational Workshop: Advances in Cleaner Production**. São Paulo, Brazil: 22 a 24 de maio de 2013.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: Processos Ecológicos em Agricultura Sustentável**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

HUNGRIA, M. CAMPO, R. J. MENDES, I. C. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. **Circular Técnica nº 35 - Embrapa Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001.

IMEA. **Custos de produção de Soja e Milho**. Instituto Matogrossense de Economia Aplicada - IMEA. Mato Grosso: 2012. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/site/publicacoes.php?categoria=3&subcategoria=3>> Acesso em: 04 abr. 2016.

MARZALL, K. **Indicadores de Sustentabilidade para Agro ecossistemas**. Porto Alegre, UFRGS, 1999.

MILLER JUNIOR, G. T. **Ciência Ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

ODUM, H. T. **Environmental accounting, emergy and decision making**. New York: J. Wiley, 1996. 370 p.

_____. **Handbook of Emergy Evaluation: Emergy and Global Processes**. Gainesville, Florida: Center for Environmental Policy, 2000. 16 p.

ORTEGA, E. **Caderno da disciplina de engenharia de alimentos e meio ambiente**. UNICAMP, 2002. Disponível em <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/plan-disc/TA530-1a.htm>> . Acesso em: 09 Jan. 2015.

_____. **Ecologia de Sistemas**. LEAIA/FEA/Unicamp, 2003. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/ecologia/desafio-11.htm>>. Acesso em: 04 Fev. 2015.

_____. et. al. **Uso da metodologia emergética em sistemas de produção e consumo**. Campinas, São Paulo: UNICAMP, 2008. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/modulo5.pdf>> . Acesso em: 10 jan. 2014.

_____. **Análise emergética da produção de soja no Mato Grosso**. Rev. Bras. Agroecologia, v.2, n.1, fev. 2007.

_____. Factors to consider in Emergy Analysis of Agroecological projects. **Reunion for XXV Anniversary of Center for Wetlands, University of Florida**, Gainesville, Florida, EUA, November 6-8, 1998.

_____. **Análise emergética de sistemas de produção de olerícolas sob manejo orgânico**. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, v.3, n.3, 2010.

_____. **Brazilian Soybean Production: emergy analysis with an expanded scope**. Bulletin of Science, Technology & Society, 25: 323-334. 2005.

ORTEGA, E. et. al. **Manual de Cálculo de Emergia. Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada (LEIA)**. Campinas/SP: UNICAMP, 2002 a. Disponível em <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/manual.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

_____. **Tabela de Transformidades (LEIA)**. Campinas/SP: UNICAMP, 2002 b. Disponível em <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/transformid.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

PANZZIERI, M; MARCHETTINI, N; HALLAM, T. G. **Importance of the Bradhyrizobium japonicum symbiosis for the sustainability of a soybean cultivation**. Ecol. Model, 135, 301-310. 2000.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, p.1633-1644, 2007.

SAHTOURIS, E. **A Dança da Terra**. Sistemas vivos em evolução: uma nova visão da biologia. Rio de Janeiro: Editora Rosa dos Tempos, 1996.

TEIXEIRA, G. G. et al. **Análise econômica e emergética num sistema integrado de produção de arroz irrigado em transição para o cultivo orgânico**. R. Bras. Agrociência, Pelotas, v.13, n.3, p. 319-324, jul-set, 2007.

VEIGA, J. E. da. **A insustentável utopia do desenvolvimento**. In: LAVINAS, L.; CARLEIAL, L. M. F.; NABUCO, M. R.. Reestruturação do espaço urbano e regional do Brasil. São Paulo: Hucitec, 1993. p. 149-169

VENDRAMETTO, L. P; BONILLA, S. H. **Contribuições da Contabilidade Ambiental em Emergia para a Compreensão do sistema de Produção de Soja na Perspectiva da Agricultura Sustentável**. 2nd Intenational Workshop: Advances in Cleaner Production. São Paulo, Brazil: 20 a 22 de maio de 2009.

WANG, X. et al. **Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China Plain based on LCA**. Agricultural Systems, n.128, 2014. 66-78

APÊNDICE A

Notas da Tabela 6: T1 (aveia preta + nabo forrageiro/feijão, 2013/2014).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 01/05/2013 a 30/04/2014 (365 dias), totalizando 6515,1 MJ m² ano⁻¹. Então: 6515,1 (MJ m² ano⁻¹) * 10.000 m² (1 ha) = 6,52E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto, a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 6,52E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 01/05/2013 a 30/04/2014 (365 dias), totalizando 2794 mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 2794 (mm) * 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 1,40E+11 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+04 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. N Atmosférico. A demanda média de N para a cultura do feijoeiro comum é de 120 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2014). É recomendado pela EMBRAPA a suplementação via fertilizante de, no máximo 60 kg de N ha⁻¹ em lavouras inoculadas, para não afetar a nodulação que supre o restante da demanda total de N durante o ciclo. No experimento as sementes foram inoculadas e a dosagem de N via fertilizante na cultura foi de 60 Kg de N ha⁻¹, sendo o restante da demanda (60 kg de N ha⁻¹) considerado proveniente de fixação biológica. A transformidade do nitrogênio corresponde a Tr = 4,60E+12 seJ Kg⁻¹ do elemento (ORTEGA et al., 2002b).

4. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 1.500 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 1500*0,025*5400*4186 = 8,48E+08 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002a).

5 e 6. Sementes (aveia preta, nabo e feijão). Transformidade da semente produzida pelos agricultores ou fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+12 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

7. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (A+N / feijão) totalizando 121 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (A+N / feijão), totalizando 120 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (A+N / feijão), totalizando 54 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

10. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (A+N / feijão), totalizando 8,75 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Fungicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com fungicidas realizadas no sistema (A+N / feijão), totalizando 1,05 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os fungicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

12. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (A+N / feijão), totalizando 0,7 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

13. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (A+N / feijão) somou de $26 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: Energia (J) = $26 (\text{L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) * 1,14\text{E}+04 (\text{kcal L}^{-1}) * 4186 (\text{J kcal}^{-1}) = 1,24\text{E}+09 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade é $\text{Tr} = 1,86\text{E}+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2010).

14. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: Kg aço trabalhado ha^{-1} (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: $3.000 \text{ kg (trator)} + 2.000 \text{ kg (semeadora)} + 300 \text{ kg (pulverizador)} = 5.300 \text{ kg}$. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em Kg aço $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se utilizou a seguinte fórmula: $5.300 (\text{peso total do maquinário convertido em aço}) / 10 \text{ anos (tempo de vida útil)} / 30 (\text{ha cultivados com grãos na propriedade}) = 17,65 \text{ kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade para o aço trabalhado é $\text{Tr} = 67\text{E}+11 \text{ seJ Kg}^{-1}$ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

15. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de soja na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2013-14 foi de R\$ 55,88 (IMEA). Para fins do experimento, levando em consideração a tecnologia e metodologia utilizada, que demandou exatamente a mesma mão de obra gasta com a soja, considerou-se o mesmo valor. Estimou-se um custo de 50% deste valor, ou seja, R\$ 27,94 para a mão de obra da safra de inverno, totalizando R\$ 83,82 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sistema avaliado. Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2013, que era de R\$ 2,29/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ 36,60 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A emergia do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), foi de $3,80\text{E}+12 \text{ seJ US}\$^{-1}$. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em $\text{seJ US}\$^{-1}$ deste trabalho.

16. Produto (feijão). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal^{-1} ou kJ^{-1} . A composição centesimal do feijão preto (grão cru), segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO (BRASIL, 2011), é de 324 kcal^{-1} ou 1354 kJ^{-1} por 100 g^{-1} de grãos. Portanto, 1 kg^{-1} de feijão contém 13540 kJ^{-1} de energia. Desta forma, o valor calórico total do produto dá-se pela seguinte equação: $2357,53 \text{ kg ha}^{-1} (\text{produtividade obtida no experimento}) * 13540 \text{ kJ kg}^{-1} (\text{valor calórico por quilograma de feijão}) * 1000 \text{ joules (1 kJ}^{-1}) = 3,19\text{E}+10 \text{ J ha}^{-1}$. A transformidade calculada para grãos em sistema de produção familiar é de $6,80\text{E}+04 \text{ seJ j}^{-1}$ segundo a Tabela de Transformidades da UNICAMP (ORTEGA et al., 2002b).

APÊNDICE B

Notas da Tabela 7: T1 (aveia preta/milho, 2014/2015).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 01/05/2014 a 30/04/2015 (365 dias), totalizando 6440,0 MJ m² ano⁻¹. Então: 6440,0 MJ m² ano⁻¹ x 10.000 m² (1 ha) = 6,44E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto, a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 6,44E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 01/05/2014 a 30/04/2015 (365 dias), totalizando 2255 mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 2255 (mm) * 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 1,13E+11 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+04 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 1.500 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 1500*0,025*5400*4186 = 8,48E+08 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002a).

4. Sementes (aveia preta). Transformidade da semente produzida pelos agricultores ou fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+12 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

5. Sementes (milho). Transformidade da semente transgênica fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+13 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

6. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (aveia / milho) totalizando 207 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

7. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (aveia / milho), totalizando 165 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (aveia / milho), totalizando 108 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (aveia / milho), totalizando 14,35 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

10. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (aveia / milho), totalizando 0,7 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (aveia / milho) somou de 26 L ha⁻¹ ano⁻¹, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: Energia (J) = 26 (L ha⁻¹ ano⁻¹) * 1,14E+04 (kcal L⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹) = 1,24E+09 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade é Tr = 1,86E+05 seJ J⁻¹ (ORTEGA et al., 2010).

12. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: Kg aço trabalhado ha⁻¹ (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: 3.000 kg (trator) + 2.000 kg (semeadora) + 300 kg (pulverizador) = 5.300 kg. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para

máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em Kg aço ha⁻¹ ano⁻¹ se utilizou a seguinte fórmula: 5.300 (peso total do maquinário convertido em aço) / 10 anos (tempo de vida útil) / 30 (ha cultivados com grãos na propriedade) = 17,65 kg aço ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para o aço trabalhado é Tr = 67E+11 seJ Kg⁻¹ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

13. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de soja na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2014-15 foi de R\$ 55,88 (IMEA). Estimou-se um custo de 50% deste valor, ou seja, R\$ 27,94 para a mão de obra da safra de inverno, totalizando R\$ 83,82 ha⁻¹ ano⁻¹ para o sistema avaliado. Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2014, que era de R\$ 2,26/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ 37,08 ha⁻¹ ano⁻¹. A emergia do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), foi de 3,80E+12 seJ US\$⁻¹. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em seJ US\$⁻¹ deste trabalho.

14. Produto (milho). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal ou kJ⁻¹. A composição centesimal do milho (grão cru), segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO, (BRASIL, 2011), é de 138 kcal⁻¹ ou 578 kJ⁻¹ por 100 g⁻¹ de grãos. Portanto, 1 kg⁻¹ de milho contém 5768 kJ⁻¹ de energia. Desta forma, o valor calórico total do produto dá-se pela seguinte equação: 7739,42 kg ha⁻¹ (produtividade obtida no experimento) x 5768 kJ kg⁻¹ (valor calórico por quilograma de milho) x 1000 joules (1 kJ⁻¹) = 4,46E+10 j ha⁻¹. O valor da transformidade do milho para pequenas propriedades é Tr = 8,10E+04 seJ J⁻¹ de acordo com a Tabela de Transformidades / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002b).

APÊNDICE C

Notas da Tabela 8: T1 (aveia preta + ervilhaca/milho, 2015/2016).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 01/05/2015 a 30/04/2016 (365 dias), totalizando 5657,4 MJ m² ano⁻¹. Então: 5657,4 MJ m² ano⁻¹ x 10.000 m² (1 ha) = 5,66E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 5,66E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 01/05/2015 a 30/04/2016 (365 dias), totalizando 3072 mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 3072 (mm) * 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 1,54E+11 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+4 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. N Atmosférico. Segundo diversos estudos (DERPSCH e CALEGARI, 1992; CALEGARI et al., 1993; AITA et al., 1994; AITA et al., 2001), a fixação biológica de N pela cultura da ervilhaca fica entre 80 e 120 kg N ha⁻¹. Para fins deste trabalho, optamos por utilizar o valor da média citada nos referidos estudos, ou seja, 100 kg de N ha⁻¹. A transformidade do nitrogênio corresponde a Tr = 4,60E+12 seJ Kg⁻¹ do elemento (ORTEGA et al., 2002b).

4. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 1.500 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 1500*0,025*5400*4186 = 8,48E+08 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002a).

5. Sementes (aveia preta e ervilhaca). Transformidade da semente produzida pelos agricultores ou fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+12 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

6. Sementes (milho). Transformidade da semente transgênica fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+13 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

7. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (A+E / milho) totalizando 152 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (A+E / milho), totalizando 156 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (A+E / milho), totalizando 108 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

10. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (A+E / milho), totalizando 12,25 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (A+E / milho), totalizando 0,7 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

12. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (A+E / milho) somou de 26L ha⁻¹ ano⁻¹, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira.

Para cálculo da energia foi utilizada a equação: Energia (J) = 26 (L ha⁻¹ ano⁻¹) * 1,14E+04 (kcal L⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹) = 1,24E+09 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade é Tr = 1,86E+05 seJ J⁻¹ (ORTEGA et al., 2010).

13. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: Kg aço trabalhado ha⁻¹ (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: 3.000 kg (trator) + 2.000 kg (semeadora) + 300 kg (pulverizador) = 5.300 kg. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em Kg aço ha⁻¹ ano⁻¹ se utilizou a seguinte fórmula: 5.300 (peso total do maquinário convertido em aço) / 10 anos (tempo de vida útil) / 30 (ha cultivados com grãos na propriedade) = 17,65 kg aço ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para o aço trabalhado é Tr = 67E+11 seJ Kg⁻¹ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

14. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de milho na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2015-16 foi de R\$ 86,18 (IMEA). Estimou-se um custo de 50% deste valor, ou seja, R\$ 43,09 para a mão de obra da safra de inverno, totalizando R\$ 129,27 ha⁻¹ ano⁻¹ para o sistema avaliado. Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2015, que era de R\$ 3,44/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ 37,58 ha⁻¹ ano⁻¹. A energia do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), foi de 3,80E+12 seJ US\$⁻¹. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em seJ US\$⁻¹ deste trabalho.

15. Produto (milho). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal ou kJ⁻¹. A composição centesimal do milho (grão cru), segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO, (BRASIL, 2011), é de 138 kcal⁻¹ ou 578 kJ⁻¹ por 100 g⁻¹ de grãos. Portanto, 1 kg⁻¹ de milho contém 5768 kJ⁻¹ de energia. Desta forma, o valor calórico total do produto dá-se pela seguinte equação: 7049,14 kg ha⁻¹ (produtividade obtida no experimento) x 5768 kJ kg⁻¹ (valor calórico por quilograma de milho) x 1000 joules (1 kJ⁻¹) = 4,07E+10 j ha⁻¹. O valor da transformidade do milho para pequenas propriedades é Tr = 8,10E+04 seJ J⁻¹ de acordo com a Tabela de Transformidades / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002b).

APÊNDICE D

Notas da Tabela 9: T2 (aveia preta + ervilhaca/soja, 2013/2014).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 01/05/2013 a 30/04/2014 (365 dias), totalizando 6515,1 MJ m² ano⁻¹. Então: 6515,1 (MJ m² ano⁻¹) * 10.000 m² (1 ha) = 6,52E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto, a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 6,52E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 01/05/2013 a 30/04/2014 (365 dias), totalizando 2794 mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 2794 (mm) * 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 1,40E+11 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+04 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. N Atmosférico. Corresponde à soma do N fixado pela ervilhaca, no inverno e pela soja, no verão. Segundo diversos estudos (DERPSCH e CALEGARI, 1992; CALEGARI et al., 1993; AITA et al., 1994; AITA et al., 2001), a fixação biológica de N pela cultura da ervilhaca fica entre 80 e 120 kg N ha⁻¹. Para fins deste trabalho, optamos por utilizar o valor da média citada nos referidos estudos, ou seja, 100 kg de N ha⁻¹. Segundo Circular Técnica da Embrapa Soja (HUNGRIA et al, 2001), a demanda de N na cultura da soja é de 80 kg ha⁻¹ para cada 1000 kg de grãos produzidos. Esta quantidade deveria ser fornecida via fertilizante caso não houvesse disponibilidade de estirpes de *Bradyrhizobium* nos solos brasileiros. Apesar desta bactéria não ser nativa, está disseminada em praticamente todo o território brasileiro onde se cultiva a soja. Na área do experimento, a semente da soja foi inoculada nos três anos de cultivo. Desta forma, calculou-se a fixação biológica com base na produtividade final obtida, de aproximadamente 3500 kg ha⁻¹, que foi de 280 kg de N ha⁻¹. A transformidade do nitrogênio corresponde a Tr = 4,60E+12 seJ Kg⁻¹ do elemento (ORTEGA et al., 2002b).

4. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 1.500 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 1500*0,025*5400*4186 = 8,48E+08 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002a).

5. Sementes (aveia preta e ervilhaca). Transformidade da semente produzida pelos agricultores ou fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+12 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

6. Sementes (soja). Transformidade da semente transgênica fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+13 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

7. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (A+E / soja) totalizando 67 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (A+E / soja), totalizando 138 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (A+E / soja), totalizando 69 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

10. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (A+E / soja), totalizando 12,25 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Fungicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com fungicidas realizadas no sistema (A+E / soja), totalizando $1,4 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a conversão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os fungicidas é $\text{Tr} = 1,48\text{E}+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

12. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (A+E / soja), totalizando $1,05 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a conversão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é $\text{Tr} = 1,48\text{E}+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

13. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (A+E / soja) somou de $27 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: $\text{Energia (J)} = 27 (\text{L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) * 1,14\text{E}+04 (\text{kcal L}^{-1}) * 4186 (\text{J kcal}^{-1}) = 1,29\text{E}+09 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade é $\text{Tr} = 1,86\text{E}+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2010).

14. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: $\text{Kg aço trabalhado ha}^{-1}$ (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: $3.000 \text{ kg (trator)} + 2.000 \text{ kg (semeadora)} + 300 \text{ kg (pulverizador)} = 5.300 \text{ kg}$. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em $\text{Kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se utilizou a seguinte fórmula: $5.300 (\text{peso total do maquinário convertido em aço}) / 10 \text{ anos (tempo de vida útil)} / 30 (\text{ha cultivados com grãos na propriedade}) = 17,65 \text{ kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade para o aço trabalhado é $\text{Tr} = 67\text{E}+11 \text{ seJ Kg}^{-1}$ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

15. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de soja na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2013-14 foi de R\$ 55,88 (IMEA). Estimou-se um custo de 50% deste valor, ou seja, R\$ 27,94 para a mão de obra da safra de inverno, totalizando R\$ 83,82 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sistema avaliado. Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2013, que era de R\$ 2,29/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ 36,60 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A emergência do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), para o ano de 2014 foi de $3,80\text{E}+12 \text{ seJ US}\$^{-1}$. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em $\text{seJ US}\$^{-1}$ deste trabalho.

16. Produto (soja). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal ou kJ. Para a composição centesimal dos grãos da soja, foi utilizado o valor médio encontrado em trabalho publicado pela EMBRAPA: Composição centesimal de grãos de soja de oito diferentes cultivares (ALVES, et al., 2011), sendo: proteínas ($420 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$), lipídios ($200 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$) e carboidratos ($260 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$). Para determinação do valor calórico, foram utilizados os valores referenciados no Manual de Cálculo Emergético (UNICAMP), expressos em Kcal Kg^{-1} , sendo: proteínas (4500), lipídios (9000) e carboidratos (5000). A conversão do produto em calorias deu-se através dos seguintes cálculos: **1) valor calórico do teor proteico:** $3606,54 (\text{kg ha}^{-1}) * 420 (\text{g Kg}^{-1}) / 1000\text{g} (1 \text{ Kg}) * 4500 (\text{kcal kg}^{-1}) = 6,82\text{E}+06 \text{ kcal}$; **2) valor calórico do teor de lipídeos:** $3606,54 (\text{kg ha}^{-1}) * 200 (\text{g Kg}^{-1}) / 1000\text{g} (1 \text{ kg}) * 9000 (\text{kcal kg}^{-1}) = 6,49\text{E}+06 \text{ kcal}$; **3) valor calórico do teor de carboidratos:** $3606,54 (\text{kg ha}^{-1}) * 260 (\text{g Kg}^{-1}) * 1000\text{g} (1 \text{ kg}) * 5000 (\text{kcal kg}^{-1}) = 4,69\text{E}+06$. O valor calórico total obtido por hectare, portanto, é: $6,82\text{E}+06 + 6,49\text{E}+06 + 4,69\text{E}+06 = 1,80\text{E}+07 \text{ Kcal}$ que, expresso em joules: $1,80\text{E}+07 * 4184 = 7,53\text{E}+10 \text{ J ha}^{-1}$. O valor da transformidade da soja para pequenas propriedades é $1,01\text{E}+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (CAVALETT, 2008).

APÊNDICE E

Notas da Tabela 10: T2 (ervilhaca/milho, 2013/2014).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 01/05/2014 a 30/04/2015 (365 dias), totalizando 6440,0 MJ m² ano⁻¹. Então: 6440,0 MJ m² ano⁻¹ x 10.000 m² (1 ha) = 6,44E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto, a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 6,44E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 01/05/2014 a 30/04/2015 (365 dias), totalizando 2255 mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 2255 (mm) * 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 1,13E+11 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+04 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. N Atmosférico. Segundo diversos estudos (DERPSCH e CALEGARI, 1992; CALEGARI et al., 1993; AITA et al., 1994; AITA et al., 2001), a fixação biológica de N pela cultura da ervilhaca fica entre 80 e 120 kg N ha⁻¹. Para fins deste trabalho, optamos por utilizar o valor da média citada nos referidos estudos, ou seja, 100 kg de N ha⁻¹. A transformidade do nitrogênio corresponde a Tr = 4,60E+12 seJ Kg⁻¹ do elemento (ORTEGA, 2002b).

4. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 1.500 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 1500*0,025*5400*4186 = 8,48E+08 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002b).

5. Sementes (ervilhaca). Transformidade da semente produzida pelos agricultores ou fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+12 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

6. Sementes (milho). Transformidade da semente transgênica fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+13 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

7. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (ervilhaca / milho) totalizando 152 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (ervilhaca / milho), totalizando 156 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (ervilhaca / milho), totalizando 108 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

10. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (ervilhaca / milho), totalizando 14,35 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (ervilhaca / milho), totalizando 0,7 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

12. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (ervilhaca / milho) somou de $26 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: Energia (J) = $26 (\text{L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) * 1,14\text{E}+04 (\text{kcal L}^{-1}) * 4186 (\text{J kcal}^{-1}) = 1,24\text{E}+09 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade é $\text{Tr} = 1,86\text{E}+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2010).

13. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: Kg aço trabalhado ha^{-1} (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: $3.000 \text{ kg (trator)} + 2.000 \text{ kg (semeadora)} + 300 \text{ kg (pulverizador)} = 5.300 \text{ kg}$. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em Kg aço $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se utilizou a seguinte fórmula: $5.300 (\text{peso total do maquinário convertido em aço}) / 10 \text{ anos (tempo de vida útil)} / 30 (\text{ha cultivados com grãos na propriedade}) = 17,65 \text{ kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade para o aço trabalhado é $\text{Tr} = 67\text{E}+11 \text{ seJ Kg}^{-1}$ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

14. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de soja na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2014-15 foi de R\$ 55,88 (IMEA). Estimou-se um custo de 50% deste valor, ou seja, R\$ 27,94 para a mão de obra da safra de inverno, totalizando R\$ 83,82 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sistema avaliado. Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2014, que era de R\$ 2,26/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ 37,08 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A energia do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), para o ano de 2014 foi de $3,80\text{E}+12 \text{ seJ US}\$^{-1}$. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em $\text{seJ US}\$^{-1}$ deste trabalho.

15. Produto (milho). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal ou kJ^{-1} . A composição centesimal do milho (grão cru), segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO, (BRASIL, 2011), é de 138 kcal^{-1} ou 578 kJ^{-1} por 100 g^{-1} de grãos. Portanto, 1 kg^{-1} de milho contém 5768 kJ^{-1} de energia. Desta forma, o valor calórico total do produto dá-se pela seguinte equação: $10414,44 \text{ kg ha}^{-1} (\text{produtividade obtida no experimento}) * 5768 \text{ kJ kg}^{-1} (\text{valor calórico por quilograma de milho}) * 1000 \text{ joules (1 kJ}^{-1}) = 6,01\text{E}+10 \text{ j ha}^{-1}$. O valor da transformidade do milho para pequenas propriedades é $\text{Tr} = 8,10\text{E}+04 \text{ seJ J}^{-1}$ de acordo com a Tabela de Transformidades / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002b).

APÊNDICE F

Notas da Tabela 11: T3 (aveia preta + nabo forrageiro/soja, 2015/2016).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 01/05/2015 a 30/04/2016 (365 dias), totalizando 5657,4 MJ m² ano⁻¹. Então: 5657,4 MJ m² ano⁻¹ x 10.000 m² (1 ha) = 5,66E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 5,66E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 01/05/2015 a 30/04/2016 (365 dias), totalizando 3072 mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 3072 (mm) * 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 1,54E+11 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+4 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. N Atmosférico. Segundo Circular Técnica da Embrapa Soja (HUNGRIA et al, 2001), a demanda de N na cultura da soja é de 80 kg ha⁻¹ para cada 1000 kg de grãos produzidos. Esta quantidade deveria ser fornecida via fertilizante, caso não houvesse disponibilidade de estirpes de *Bradyrhizobium* nos solos brasileiros. Apesar desta bactéria não ser nativa, está disseminada em praticamente todo o território brasileiro onde se cultiva a soja. Na área do experimento, a semente da soja foi inoculada nos três anos de cultivo. Desta forma, calculou-se a fixação biológica com base na produtividade final obtida, de aproximadamente 2800 kg ha⁻¹, que foi de 224 kg de N ha⁻¹. A transformidade do nitrogênio corresponde a Tr = 4,60E+12 seJ Kg⁻¹ do elemento (ORTEGA et al., 2002b).

4. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 1.500 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 1500*0,025*5400*4186 = 8,48E+08 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002a).

5. Sementes (aveia preta e nabo forrageiro). Transformidade da semente produzida pelos agricultores ou fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+12 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

6. Sementes (soja). Transformidade da semente transgênica fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+13 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

7. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (A+N / soja) totalizando 116 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (A+N / soja), totalizando 108 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (A+N / soja), totalizando 54 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

10. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (A+N / soja), totalizando 12,25 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Fungicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com fungicidas realizadas no sistema (A+N / soja), totalizando 1,4 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7

conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os fungicidas é $Tr = 1,48E+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

12. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (A+N / soja), totalizando $1,05 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a conversão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é $Tr = 1,48E+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

13. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (A+N / soja) somou de $27 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: $\text{Energia (J)} = 27 (\text{L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) * 1,14E+04 (\text{kcal L}^{-1}) * 4186 (\text{J kcal}^{-1}) = 1,29E+09 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade é $Tr = 1,86E+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2010).

14. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: $\text{Kg aço trabalhado ha}^{-1}$ (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: 3.000 kg (trator) + 2.000 kg (semeadora) + 300 kg (pulverizador) = 5.300 kg . Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em $\text{Kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se utilizou a seguinte fórmula: 5.300 (peso total do maquinário convertido em aço) / 10 anos (tempo de vida útil) / 30 (ha cultivados com grãos na propriedade) = $17,65 \text{ kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade para o aço trabalhado é $Tr = 67E+11 \text{ seJ Kg}^{-1}$ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

15. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de soja na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2015-16 foi de R\$ 86,18 (IMEA). Estimou-se um custo de 50% deste valor, ou seja, R\$ 43,09 para a mão de obra da safra de inverno, totalizando R\$ 129,27 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sistema avaliado. Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2015, que era de R\$ 3,44/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ 37,57 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A emergência do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), para o ano de 2014 foi de $3,80E+12 \text{ seJ US}\$^{-1}$. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em $\text{seJ US}\$^{-1}$ deste trabalho.

16. Produto (soja). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal ou kJ. Para a composição centesimal dos grãos da soja, foi utilizado o valor médio encontrado em trabalho publicado pela EMBRAPA: Composição centesimal de grãos de soja de oito diferentes cultivares (ALVES, et al., 2011), sendo: proteínas ($420 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$), lipídios ($200 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$) e carboidratos ($260 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$). Para determinação do valor calórico, foram utilizados os valores referenciados no Manual de Cálculo Emergético (UNICAMP), expressos em Kcal Kg^{-1} , sendo: proteínas (4500), lipídios (9000) e carboidratos (5000). A conversão do produto em calorias deu-se através dos seguintes cálculos: **1) valor calórico do teor protéico:** $2815,49 (\text{kg ha}^{-1}) * 420 (\text{g Kg}^{-1}) / 1000\text{g} (1 \text{ Kg}) * 4500 (\text{kcal kg}^{-1}) = 5,32E+06 \text{ kcal}$; **2) valor calórico do teor de lipídeos:** $2815,49 (\text{kg ha}^{-1}) * 200 (\text{g Kg}^{-1}) / 1000\text{g} (1 \text{ kg}) * 9000 (\text{kcal kg}^{-1}) = 5,07E+06 \text{ kcal}$; **3) valor calórico do teor de carboidratos:** $2815,49 (\text{kg ha}^{-1}) * 260 (\text{g Kg}^{-1}) * 1000\text{g} (1 \text{ kg}) * 5000 (\text{kcal kg}^{-1}) = 3,66E+06$. O valor calórico obtido por hectare, portanto, é: $5,32E+06 + 5,07E+06 + 3,66E+06 = 1,41E+07 \text{ Kcal}$ que, expresso em joules: $1,41E+07 * 4184 = 5,88E+10 \text{ J ha}^{-1}$. O valor da transformidade da soja para pequenas propriedades é $1,01E+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (CAVALETT, 2008).

APÊNDICE G

Notas da Tabela 12: T1 (pousio/feijão, 2013/2014).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 24/11/2013 a 16/02/2014 (da semeadura à colheita / ciclo completo da cultura), totalizando 2082,4 MJ m² ano⁻¹. Então: 2082,4 (MJ m² ano⁻¹) * 10.000 m² (1 ha) = 2,08E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto, a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 2,08E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 17/11/2013 a 09/02/2014 (sete dias antes da semeadura até sete dias antes da colheita / período de influência hídrica durante o ciclo da cultura), totalizando 790mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 790(mm)* 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 3,95E+10 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+4 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. N Atmosférico. A demanda média de N para a cultura do feijoeiro comum é de 120 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2014). É recomendado pela EMBRAPA a suplementação via fertilizante de, no máximo 60 kg de N ha⁻¹ em lavouras inoculadas, para não afetar a nodulação que supre o restante da demanda total de N durante o ciclo. No experimento as sementes foram inoculadas e a dosagem de N via fertilizante na cultura foi de 60 Kg de N ha⁻¹, sendo o restante da demanda (60 kg de N ha⁻¹) considerado proveniente de fixação biológica. Como se trata de feijão em sistema convencional sobre pousio de inverno (S3PC), visando equilibrar os fluxos de energia entre os sistemas comparados, desconta-se 55 kg N ha⁻¹ do valor de N fixado pelo feijão, equivalente à quantidade de N utilizado nas culturas de inverno dos sistemas em plantio direto (S1PD e S2PD), para um correto balanço do fluxo deste elemento entre os sistemas. Portanto: 60 (kg de N ha⁻¹ fixado) - 55 (kg de N ha⁻¹ / déficit em relação a S1PD e S2PD) = 5 kg N ha⁻¹ = valor que corresponde ao fluxo de energia de N em S3PC. A transformidade do nitrogênio corresponde a Tr = 4,60E+12 seJ Kg⁻¹ do elemento (ORTEGA et al., 2002b).

4. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 15000 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 15000*0,025*5400*4186 = 8,48E+09 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002a).

5. Sementes (feijão). Transformidade da semente produzida pelos agricultores ou fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+12 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

6. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (pousio / feijão) totalizando 60 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

7. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (pousio / feijão), totalizando 72 kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (pousio / feijão), totalizando 30 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (pousio / feijão), totalizando 6,65 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA, 2002b; 2002c).

10. Fungicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com fungicidas realizadas no sistema (pousio / feijão), totalizando $1,05 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a conversão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os fungicidas é $\text{Tr} = 1,48\text{E}+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (pousio / feijão), totalizando $0,7 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a conversão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é $\text{Tr} = 1,48\text{E}+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

12. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (pousio / feijão) somou de $50 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: $\text{Energia (J)} = 50 (\text{L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) * 1,14\text{E}+04 (\text{kcal L}^{-1}) * 4186 (\text{J kcal}^{-1}) = 2,39\text{E}+09 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade é $\text{Tr} = 1,86\text{E}+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2010).

13. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: $\text{Kg aço trabalhado ha}^{-1}$ (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: $3.000 \text{ kg (trator)} + 2.000 \text{ kg (semeadora)} + 300 \text{ kg (pulverizador)} + 1.000 \text{ kg (jumbo)} + 1.000 \text{ kg (arado)} + 1.000 \text{ kg (grade)} = 8.300 \text{ kg}$. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em $\text{Kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se utilizou a seguinte fórmula: $8.300 (\text{peso total do maquinário convertido em aço}) / 10 \text{ anos (tempo de vida útil)} / 30 (\text{ha cultivados com grãos na propriedade}) = 27,65 \text{ kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade para o aço trabalhado é $\text{Tr} = 67\text{E}+11 \text{ seJ Kg}^{-1}$ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

14. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de soja na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2013-14 foi de R\$ 55,88 (IMEA). Para fins do experimento, levando em consideração a tecnologia e metodologia utilizada, que demandou exatamente a mesma mão de obra gasta com a soja, considerou-se o mesmo valor. Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2013, que era de R\$ 2,29/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ 24,40 $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A energia do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), para o ano de 2014 foi de $3,80\text{E}+12 \text{ seJ US}\$^{-1}$. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em $\text{seJ US}\$^{-1}$ deste trabalho.

15. Produto (feijão). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal^{-1} ou kJ^{-1} . A composição centesimal do feijão preto (grão cru), segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO (BRASIL, 2011), é de 324 kcal^{-1} ou 1354 kJ^{-1} por 100 g^{-1} de grãos. Portanto, 1 kg^{-1} de feijão contém 13540 kJ^{-1} de energia. Desta forma, o valor calórico total do produto dá-se pela seguinte equação: $2700,43 \text{ kg ha}^{-1}$ (produtividade obtida no experimento) $\times 13540 \text{ kJ kg}^{-1}$ (valor calórico por quilograma de feijão) $\times 1000 \text{ joules (1 kJ}^{-1}) = 3,66\text{E}+10 \text{ J ha}^{-1}$. A transformidade calculada para grãos em sistema de produção familiar é de $6,80\text{E}+04 \text{ seJ j}^{-1}$ segundo a Tabela de transformidades da UNICAMP (ORTEGA et al., 2002b).

APÊNDICE H

Notas da Tabela 13: T2 (pousio/milho, 2014/2015).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 15/11/2014 a 23/04/2015 (da sementeira à colheita / ciclo completo da cultura), totalizando 3227,6 MJ m² ano⁻¹. Então: 3227,6 (MJ m² ano⁻¹) * 10.000 m² (1 ha) = 3,23E+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto, a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 3,23E+13. A transformidade da radiação solar é Tr = 1 seJ J⁻¹, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 07/11/2014 a 16/04/2015 (sete dias antes da sementeira até sete dias antes da colheita / período de influência hídrica durante o ciclo da cultura), totalizando 964 mm, através da equação: E (J ha⁻¹ ano⁻¹) = chuva (mm) x Energia livre de Gibbs (J kg⁻¹) x 10.000 (m²); portanto, E = 964 (mm) * 5000 (J kg⁻¹) * 10.000 (m²) = 4,82E+10 J ha⁻¹ ano⁻¹. Transformidade, Tr = 3,06E+04 seJ J⁻¹ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 15000 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: E = Perdas (kg ha⁻¹ ano⁻¹) * MOS (%) * 5.400 (kcal kg⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹); portanto, E = 15000*0,025*5400*4186 = 8,48E+09 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade para perda de solo (erosão) é Tr = 7,38E+04 (ORTEGA et al., 2002a).

4. Sementes (milho). Transformidade da semente transgênica fiscalizada pelas empresas. Tr = 1,0E+13 seJ kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

5. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (pousio / milho) totalizando 152 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é Tr = 3,80E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

6. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (pousio / milho), totalizando 96 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é Tr = 1,78E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

7. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (pousio / milho), totalizando 78 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é Tr = 1,74E+12 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (pousio / milho), totalizando 12,25 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

9. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (pousio / milho), totalizando 0,7 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é Tr = 1,48E+13 seJ Kg⁻¹ (ORTEGA et al., 2002b).

10. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (pousio / milho) somou de 50L ha⁻¹ ano⁻¹, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: Energia (J) = 50 (L ha⁻¹ ano⁻¹) * 1,14E+04 (kcal L⁻¹) * 4186 (J kcal⁻¹) = 2,39E+09 J ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade é Tr = 1,86E+05 seJ J⁻¹ (ORTEGA et al., 2010).

11. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: Kg aço trabalhado ha⁻¹ (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: 3.000 kg (trator) + 2.000 kg (semeadora) + 300 kg (pulverizador) + 1.000 kg (jumbo) + 1.000 kg (arado) + 1.000 kg (grade) = 8.300 kg. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de

depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em Kg aço $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ se utilizou a seguinte fórmula: 8.300 (peso total do maquinário convertido em aço) / 10 anos (tempo de vida útil) / 30 (ha cultivados com grãos na propriedade) = $27,65 \text{ kg aço ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. A transformidade para o aço trabalhado é $\text{Tr} = 67\text{E}+11 \text{ seJ Kg}^{-1}$ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

12. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de milho na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2014-15 foi de R\$ 55,88 (IMEA). Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2014, que era de R\$ 2,26/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ $24,72 \text{ ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. A energia do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), para o ano de 2014 foi de $3,80\text{E}+12 \text{ seJ US}\$^{-1}$. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em $\text{seJ US}\$^{-1}$ deste trabalho.

13. Produto (milho). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal ou kJ^{-1} . A composição centesimal do milho (grão cru), segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO, (BRASIL, 2011), é de 138 kcal^{-1} ou 578 kJ^{-1} por 100 g^{-1} de grãos. Portanto, 1 kg^{-1} de milho contém 5768 kJ^{-1} de energia. Desta forma, o valor calórico total do produto dá-se pela seguinte equação: $6189,55 \text{ kg ha}^{-1}$ (produtividade obtida no experimento) $\times 5768 \text{ kJ kg}^{-1}$ (valor calórico por quilograma de milho) $\times 1000 \text{ joules (1 kJ}^{-1}) = 3,75\text{E}+10 \text{ j ha}^{-1}$. O valor da transformidade do milho para pequenas propriedades é $\text{Tr} = 8,10\text{E}+04 \text{ seJ J}^{-1}$ de acordo com a Tabela de Transformidades / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002b).

APÊNDICE I

Notas da Tabela 13: T3 (pousio/soja, 2015/2016).

(memória das equações e cálculos realizados, valores de transformidades solares utilizados e referências buscadas na literatura).

1. Radiação solar. Dados obtidos da Estação Meteorológica do INMET em Erechim (23° UTC). Período: 15/11/2015 a 20/03/2016 (da sementeira à colheita / ciclo completo da cultura), totalizando 2410,4 MJ m² ano⁻¹. Então: 2410,4 (MJ m² ano⁻¹) * 10.000 m² (1 ha) = 2,41+07 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. 1 MJ = 1.000.000 J. Portanto a radiação em J ha⁻¹ ano⁻¹ é de 2,41E+13. A transformidade da radiação solar é $Tr = 1 \text{ seJ J}^{-1}$, por convenção (ODUM, 1996).

2. Precipitação. Dados coletados e medidos na área do experimento, através de pluviômetro manual. O valor da energia da chuva (E), em J ha⁻¹ ano⁻¹, foi calculado para a precipitação medida no período de 08/11/2015 a 13/03/2016 (sete dias antes da sementeira até sete dias antes da colheita / período de influência hídrica durante o ciclo da cultura), totalizando 1378 mm, através da equação: $E \text{ (J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) = \text{chuva (mm)} \times \text{Energia livre de Gibbs (J kg}^{-1}) \times 10.000 \text{ (m}^2)$; portanto, $E = 1378 \text{ (mm)} * 5000 \text{ (J kg}^{-1}) * 10.000 \text{ (m}^2) = 6,89E+10 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Transformidade, $Tr = 3,06E+4 \text{ seJ J}^{-1}$ (BROWN e ULGIATI, 2004).

3. N Atmosférico. Segundo Circular Técnica da Embrapa Soja (HUNGRIA et al, 2001), a demanda de N na cultura da soja é de 80 kg ha⁻¹ para cada 1000 kg de grãos produzidos. Esta quantidade deveria ser fornecida via fertilizante, caso não houvesse disponibilidade de estirpes de *Bradyrhizobium* nos solos brasileiros. Apesar desta bactéria não ser nativa, está disseminada em praticamente todo o território brasileiro onde se cultiva a soja. Na área do experimento, a semente da soja foi inoculada nos três anos de cultivo. Desta forma, calculou-se a fixação biológica com base na produtividade final obtida, de aproximadamente 2600 kg ha⁻¹, que foi de 208 kg de N ha⁻¹. Como se trata de soja em sistema convencional sobre pousio de inverno (S3PC), visando equilibrar os fluxos de energia entre os sistemas comparados, descontou-se 55 kg N ha⁻¹ do valor de N fixado pela soja, equivalente à quantidade de N utilizado nas culturas de inverno dos sistemas em plantio direto (S1PD e S2PD), correspondente ao N que não entrou no S3PC, para um correto balanço de fluxo deste elemento nos sistemas. Portanto: 208 (kg de N ha⁻¹ fixado) - 55 (kg de N ha⁻¹ / déficit em relação a S1PD e S2PD) - 6 (kg de N ha⁻¹ contidos na adubação de base) = 147 kg N ha⁻¹ = valor que corresponde ao fluxo de energia de N em S3PC. A transformidade do nitrogênio corresponde a $Tr = 4,60E+12 \text{ seJ Kg}^{-1}$ do elemento (ORTEGA et al., 2002b).

4. Erosão. Valor estimado para o sistema de plantio direto (ORTEGA, 2002b): 15000 Kg solo ha⁻¹ ano⁻¹. Percentual de matéria orgânica do solo (Análise Química de Solo): 2,5%. A equação do cálculo de perdas é: $E = \text{Perdas (kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) * \text{MOS (\%)} * 5.400 \text{ (kcal kg}^{-1}) * 4186 \text{ (J kcal}^{-1})$; portanto, $E = 15000 * 0,025 * 5400 * 4186 = 8,48E+09 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade para perda de solo (erosão) é $Tr = 7,38E+04$ (ORTEGA et al., 2002a).

5. Sementes (soja). Transformidade da semente transgênica fiscalizada pelas empresas. $Tr = 1,0E+13 \text{ seJ kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

6. Fertilizante (Nitrogênio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante nitrogenado realizada no sistema (pousio / soja) totalizando 6 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante nitrogenado é $Tr = 3,80E+12 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002a).

7. Fertilizante (Fósforo). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante fosfatado realizada no sistema (pousio / soja), totalizando 48 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante fosfatado é $Tr = 1,78E+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002a).

8. Fertilizante (Potássio). Foi contabilizada a adubação total com fertilizante potássico realizada no sistema (pousio / soja), totalizando 24 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. A transformidade do fertilizante potássico é $Tr = 1,74E+12 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002a).

9. Herbicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com herbicidas realizadas no sistema (pousio / soja), totalizando 10,15 Kg ha⁻¹ ano⁻¹. Para a conversão em Kg ha⁻¹ ano⁻¹ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os herbicidas é $Tr = 1,48E+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

10. Fungicidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com fungicidas realizadas no sistema (pousio / soja), totalizando $1,4 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a conversão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os fungicidas é $\text{Tr} = 1,48\text{E}+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2002b).

11. Inseticidas. Foram contabilizadas todas as aplicações com inseticidas realizadas no sistema (pousio / soja), totalizando $1,05 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a conversão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi multiplicado o número de litros por 0,7 conforme orientação do Manual de Cálculo Emergético da UNICAMP. A transformidade para os inseticidas é $\text{Tr} = 1,48\text{E}+13 \text{ seJ Kg}^{-1}$ (ORTEGA, 2002b; 2002c).

12. Combustível fóssil (diesel). O consumo anual de combustível (diesel) no sistema (pousio / soja) somou de $50 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, utilizado no trator para as operações de preparo, plantio e condução da lavoura e na colheitadeira. Para cálculo da energia foi utilizada a equação: $\text{Energia (J)} = 50 (\text{L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) * 1,14\text{E}+04 (\text{kcal L}^{-1}) * 4186 (\text{J kcal}^{-1}) = 2,39\text{E}+09 \text{ J ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade é $\text{Tr} = 1,86\text{E}+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (ORTEGA et al., 2010).

13. Depreciação de máquinas. Base de cálculo: $\text{Kg aço trabalhado ha}^{-1}$ (ODUM, 1996). Considerou-se o peso total do maquinário utilizado no experimento, nos tratamentos sob o sistema de plantio direto, sendo: $3.000 \text{ kg (trator)} + 2.000 \text{ kg (semeadora)} + 300 \text{ kg (pulverizador)} + 1.000 \text{ kg (jumbo)} + 1.000 \text{ kg (arado)} + 1.000 \text{ kg (grade)} = 8.300 \text{ kg}$. Considerou-se a área cultivada com grãos na propriedade, de 30 hectares. Para fins de depreciação, considerou-se o prazo de dez anos de vida útil para máquinas e implementos agrícolas, encontrado em diversas referências (CONAB, 2010). Para o cálculo da depreciação em $\text{Kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se utilizou a seguinte fórmula: $8.300 (\text{peso total do maquinário convertido em aço}) / 10 \text{ anos (tempo de vida útil)} / 30 (\text{ha cultivados com grãos na propriedade}) = 27,65 \text{ kg aço ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A transformidade para o aço trabalhado é $\text{Tr} = 67\text{E}+11 \text{ seJ Kg}^{-1}$ de aço conforme Manual de Cálculo Emergético / UNICAMP (ORTEGA et al., 2002a).

14. Trabalho humano (mão de obra). Segundo o Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada com base no relatório das propriedades modais em todo o território nacional, o custo de mão de obra por hectare de soja na região Centro-Sul do Brasil, para a safra de 2015-16 foi de R\$ 86,18 (IMEA). Assim, convertendo-se em dólares, com base no valor do câmbio em agosto de 2015, que era de R\$ 3,44/US\$ - com base em consulta no histórico de cotações do dólar no site do Banco Central do Brasil, o custo da mão de obra do sistema é de US\$ $25,05 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A emergência do dólar para o Brasil no ano de 2014, segundo a equação de Ortega e Agostinho (2001), para o ano de 2014 foi de $3,80\text{E}+12 \text{ seJ US}\$^{-1}$. Foi considerado este valor para todos os cálculos de conversão em $\text{seJ US}\$^{-1}$ deste trabalho.

15. Produto (soja). Na metodologia emergética devemos levar em conta a energia do produto, e, no caso de matérias primas agrícolas, a energia corresponde ao seu valor calórico, calculado com base na sua composição centesimal, expressa em kcal ou kJ. Para a composição centesimal dos grãos da soja, foi utilizado o valor médio encontrado em trabalho publicado pela EMBRAPA: Composição centesimal de grãos de soja de oito diferentes cultivares (ALVES, et al., 2011), sendo: proteínas ($420 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$), lipídios ($200 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$) e carboidratos ($260 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$). Para determinação do valor calórico, foram utilizados os valores referenciados no Manual de Cálculo Emergético (UNICAMP), expressos em Kcal Kg^{-1} , sendo: proteínas (4500), lipídios (9000) e carboidratos (5000). A conversão do produto em calorías deu-se através dos seguintes cálculos: **1) valor calórico do teor proteico:** $2584,77 (\text{kg ha}^{-1}) * 420 (\text{g Kg}^{-1}) / 1000\text{g} (1 \text{ kg}) * 4500 (\text{kcal kg}^{-1}) = 5,43\text{E}+06 \text{ kcal}$; **2) valor calórico do teor de lipídeos:** $2584,77 (\text{kg ha}^{-1}) * 200 (\text{g Kg}^{-1}) / 1000\text{g} (1 \text{ Kg}) * 9000 (\text{kcal kg}^{-1}) = 4,65\text{E}+06 \text{ kcal}$; **3) valor calórico do teor de carboidratos:** $2584,77 (\text{kg ha}^{-1}) * 260 (\text{g Kg}^{-1}) * 1000\text{g} (1 \text{ kg}) * 5000 (\text{kcal kg}^{-1}) = 3,36\text{E}+06$. O valor calórico obtido por hectare, portanto, é: $5,43\text{E}+06 + 4,65\text{E}+06 + 3,36\text{E}+06 = 1,34\text{E}+07 \text{ Kcal}$ que, expresso em joules: $1,41\text{E}+07 * 4184 = 5,63\text{E}+10 \text{ j ha}^{-1}$. O valor da transformidade da soja para pequenas propriedades é $1,01\text{E}+05 \text{ seJ J}^{-1}$ (CAVALETT, 2008).