Eficiência global dos sistemas rodoviário e ferroviário de transporte da soja Brasileira para exportação

RICHARD SILVA, T. [a, b, *], AGOSTINHO, F. [a]

a. Universidade Paulista, São Paulo, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Laboratório de Produção e Meio Ambiente

b. Fatec da Baixada Santista

**Corresponding author, thamessilva@hotmail.com*

Resumo

O eficiente escoamento da produção agropecuária e industrial brasileira aos portos exportadores é considerada como fundamental para garantir qualidade e competitividade aos produtos brasileiros. Atualmente o sistema rodoviário compreende 61% da matriz de transporte brasileira, seguida por ferroviário 21% e hidroviário 18%. Planos estratégicos do governo apontam no sentido de subsidiar o crescimento do modal ferroviário para alcançar 35% da matriz de transporte, porém, geralmente estas decisões estão baseadas exclusivamente em indicadores econômicos. Neste sentido, este trabalho objetiva avaliar a eficiência global em emergia (escrita com "m") dos modais rodoviário e ferroviário no Brasil. Devido à sua importância no PIB brasileiro, a commodity soja é considerada como estudo de caso (ano 2014/2015), e as fronteiras do sistema avaliado abrange desde sua produção em Mato Grosso até o Porto de Santos. Os resultados indicam uma demanda de emergia para o sistema rodoviário de 6,25 E5 sej/ton.km, enquanto o sistema ferroviário demanda 73,9E5 sej/ton.km. Estes valores representam uma eficiência global em emergia de aproximadamente 12 vezes superior para o sistema rodoviário, sendo, portanto, o modal que deveria ser promovido sob a ótica da emergia. De qualquer maneira, enfatiza-se a necessidade de considerar outros aspectos (econômico, social, logística, etc.) para subsidiar uma decisão melhor fundamentada.

Palavras-chave: Contabilidade Ambiental em Emergia; Porto de Santos; Soja; Transporte Rodoviário; Transporte Ferroviário.

1. Introdução

A matriz de transporte do Brasil é caracterizada como 61% rodoviário, 21% ferroviário e 18% hidroviário; como comparação, para os EUA estes percentuais são respectivamente 5%, 35% e 60% (IMEA, 2016). A maior parte da soja produzida no estado brasileiro de Mato Grosso (MT) é exportada pelos portos da região sudeste com destino principal à China. Dentre eles, o porto de Santos merece destaque, pois apresentou em 2015 o custo de frete mais baixo entre os portos brasileiros com destino ao porto de Shangai (23,81 USD/ton_{soja}). Segundo CODESP (2016), o porto de Santos embarcou em 2015 aproximadamente 13 milhões de toneladas de soja em grão, sendo transportados de MT ao porto por meio dos modais rodoviário e ferroviário.

Dentro do Estado do MT há duas rodovias principais, a BR 163, que atravessa o Estado de Norte a Sul e dá acesso ao Porto de Paranaguá no Estado do Paraná, e a BR 364, que atravessa o Estado de Leste a Oeste e dá acesso ao Portos de Santos (Leste) e de Rondônia (Oeste). Além destas rodovias, há duas de menor extensão dentro do Estado, mas de comparável importância para o transporte da soja, que são a BR 174 e a BR 070 (OJIMA, 2004). Em relação ao transporte ferroviário, ele inicia-se no terminal intermodal situado na cidade de Rondonópolis (em MT), e depois segue diretamente ao porto de Santos. A baixa capacidade de receber e enviar mercadoria dos pontos intermodais aliado ao déficit de 20 milhões de toneladas na capacidade de armazenamento dentro do Estado do Mato Grosso

intensifica a necessidade do uso do modal rodoviário, especialmente no período de colheita (IMEA, 2016). Reconhece-se que, entre outros fatores, o desafio de tornar a soja brasileira mais competitiva nos mercados internacional e nacional depende da melhora da eficiência no transporte entre os polos produtores e exportadores.

Em um estudo feito pelo Ministério dos Transportes, por meio do Plano Nacional de Logística e Transporte e apresentado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2012), mostra que o uso dos modais rodoviário e ferroviário no Brasil - que hoje ocupam 61% e 21% respectivamente - devem chegar a um equilíbrio de sua utilização até 2025. O Plano prevê um investimento na infraestrutura ferroviária de 50% do montante designado, sendo que a região centro sul receberá 28% do montante. Segundo USDA (2012), a previsão é que o transporte rodoviário passe a representar 30% da matriz de transporte, enquanto que ferroviário e marítimo passariam a representar 35 e 29% da matriz de transporte brasileira; outros tipos de modais assumiriam 6%. Neste contexto futuro, pode-se perceber que o transporte ferroviário terá um papel importante no escoamento de cargas no território brasileiro.

Embora potencialmente favorável ao desenvolvimento sustentável, a decisão em aumentar a malha ferroviária para o escoamento da soja produzida aos portos geralmente considera aspectos monetários onde incluem-se as variáveis tempo, risco, consumo energético, entre outros. Neste sentido, Federici et al. (2008) alertam que as decisões sobre o uso de um modal em relação a outro consideram somente aspectos monetários, desconsiderando todos os recursos utilizados na infraestrutura vistos sob uma ótica holística, isto é, considerando também aspectos ambientais como fornecedores de recursos. Uma vez que trens não podem se deslocar sem uma malha ferroviária e caminhões não podem se deslocar sem uma rodovia, as infraestruturas devem ser incluídas na contabilidade energética e ambiental dos sistemas de transporte, propiciando decisões cientificamente mais fundamentadas em busca à sustentabilidade. Na mesma linha de pensamento, Amiril et al. (2014) alertam que projetos de infraestrutura de transporte muitas vezes envolvem uso considerável de terras, investimento de longo prazo e demandam grande quantidade de outros recursos energéticos, ambientais e de mão-de-obra. Esses elementos podem causar sérios impactos ao meio ambiente e deslocamento social. Desta forma, decisões relacionadas à projetos de infraestrutura devem considerar uma visão holística para o desenvolvimento sustentável.

Dentre outros métodos científicos, a contabilidade ambiental em emergia (escrita com "m") pode ser considerada como uma alternativa em fornecer indicadores aos decisores. Este método está fortemente enraizado nos conceitos da termodinâmica e teoria dos sistemas, possui uma visão holística em grande escala (biosfera), e é capaz de contabilizar recursos da economia e da natureza. Diferentemente dos indicadores econômicos que consideram valores de mercado através de uma visão do recebedor (disposição a pagar que contempla subjetividade), a contabilidade ambiental em emergia considera indicadores biofísicos através do lado do doador de recursos (objetivos). Desta forma, a contabilidade ambiental em emergia pode ser considerada como um método científico capaz de fornecer subsídios em direção à sustentabilidade (Agostinho e Pereira, 2013; Giannetti et al., 2013).

Especificamente para o escoamento da soja brasileira produzida em MT até o porto de Santos, existem dúvidas sobre a real eficiência global em emergia que o sistema ferroviário possui: Transportar soja via ferrovia possui maior eficiência global que seu transporte via rodovia? Neste sentido, este trabalho objetiva utilizar a contabilidade ambiental em emergia para avaliar a eficiência global dos sistemas de transporte rodoviário e ferroviário de soja da região produtora até o porto de Santos.

2. Método

2.1. Estudo de caso: trajetos, equipamentos e infraestrutura

Segundo dados do IBGE (2013), os principais estados produtores de soja no Brasil são Mato Grosso (MT), Paraná e Rio Grande do Sul, que juntos respondem por 65% da produção nacional. Sozinho, MT responde por 30% da produção nacional, possuindo 14 dos 20 principais municípios produtores brasileiros. Desta forma, a soja produzida em MT é considerada neste trabalho.

O sistema de transporte analisado tem como origem os municípios produtores de soja no MT e como destino o porto da cidade de Santos, estado de São Paulo, onde estão localizados os terminais especializados no embarque da soja para exportação (Figura 1). Em relação ao transporte rodoviário, a soja é carregada em 14 municípios produtores e segue de caminhão direto até Santos, incluindo perdas, inspeções, carregamentos e armazenamentos. No transporte ferroviário, primeiramente ocorre o transporte rodoviário da soja destes municípios até o terminal de Rondonópolis (cidade localizada em

MT), havendo o transbordo da soja para vagões e seu posterior transporte ferroviário até o porto de Santos; isso pode ser visualizado na Figura 1 pelas setas correspondentes às etapas de transporte.

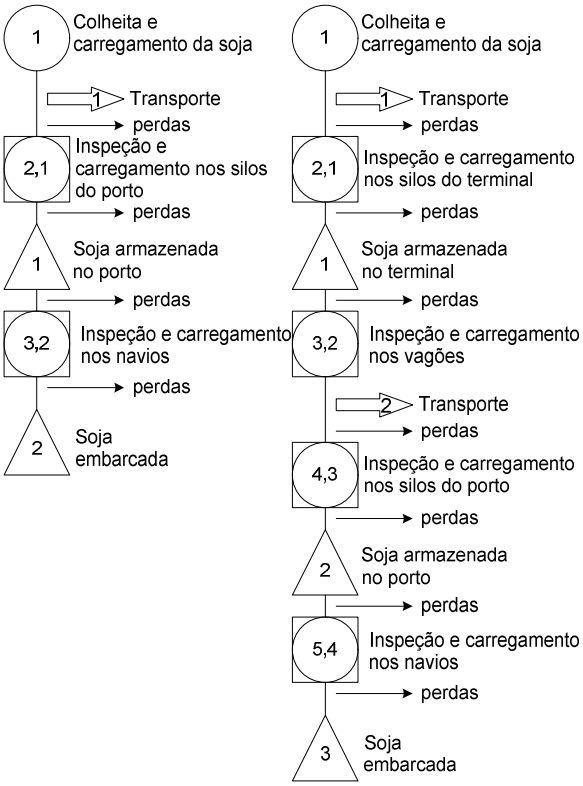

Fig. 1. Diagrama OTIDA do fluxo tecnológico do transporte da soja do Mato Grosso até o porto de Santos. O diagrama da direita representa o transporte rodoviário, enquanto o da esquerda o ferroviário.

A Tabela 1 apresenta os 14 principais municípios produtores de soja em MT, sua produção em toneladas, e suas distâncias ao porto de Santos e ao Terminal de Rondonópolis. Em relação ao transporte ferroviário, a soja tem como ponto de partida o terminal intermodal da empresa América Latina Logística, localizado na cidade de Rondonópolis. Segundo a ANTT (2016), a distância da malha ferroviária entre o terminal de Rondonópolis até o porto de Santos é de 1.446 km.

Tabela 1. Principais municípios produtores de soja no Estado do Mato Grosso em 2013.

Município	Produção (ton)	Distância até o terminal de Rondonópolis (km)	Distância até o porto de Santos (km)
Sorriso	1.926.930	614	2020
Nova Mutum	1.156.866	460	1861
Campo Novo do Parecis	1.125.720	622	2022
Sapezal	1.088.340	730	2130
Nova Ubiratã	928.020	699	2100
Diamantino	849.600	405	1805
Querência	840.000	823	1825
Primavera do Leste	753.940	126	1536
Lucas do Rio Verde	699.434	555	1955
Itiquira	630.000	150	1325
Campo Verde	595.500	144	1544
Campos de Júlio	528.673	785	2186
Brasnorte	514.440	807	2207
Santa Rita do Trivelato	513.443	565	1966

Obs.: Distâncias correspondem à distância rodoviária real. Fonte: IBGE (2013) e MAPEIA (2016).

2.2. Descrição do sistema rodoviário: equipamentos e infraestrutura

O transporte rodoviário é realizado por caminhões modelo MAN TGX 29440 com peso de 9,7 ton. Este é acoplado a um "bitrenzão" de duas caçambas com 7 eixos e 28 pneus, com peso de 55 kg/pneu

e peso total de 13 toneladas. A capacidade de transporte de soja deste conjunto cavalo e semirreboque é de 48 toneladas.

Em relação à infraestrutura, a análise da construção das rodovias utilizadas para escoamento da soja da região de mato grosso ao porto de Santos é contabilizada. A construção de uma estrada exige a execução de serviços de movimentação de terras para regularizar o terreno natural. A etapa inicial envolve os serviços de terraplanagem que englobam abertura de caminhos de serviço, escavação, carga, transporte, deposição do material extraído e consolidação dos aterros; estes custos são aqui considerados. De acordo com informações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem ligado ao Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT, 2016), considerou-se neste trabalho uma pista de classe I, com largura de 7,0 m e acostamentos de 3,0m de cada lado. As camadas utilizadas na pista incluem revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e regularização. É considerado o uso de pavimentos flexíveis granulares que utilizam por correção granulométrica os materiais solo brita, bica corrida, rachão e brita graduada além de macadame, hidráulico ou a seco. O tempo de vida considerado para a rodovia é de 70 anos. O asfalto utilizado é o B65, com uma camada de espessura de rolamento e nivelamento de 65 mm. Para 1 km de estrada adota-se 14 metros de largura com os acostamentos perfazendo 14.000 metros quadrados. Adotando a espessura de 6,5 cm, tem-se a utilização de 910 m^3 de asfalto/km. São consideradas as espessuras de 15 cm para uma camada de base em brita, 15 cm para uma camada de sub-base em calcário, e 18 cm para uma camada de areia para reforço do subleito e regularização. As quantidades obtidas são 2.100 m^3/km, 2.100 m^3/km e 2.520 m^3/km respectivamente para brita, calcário e areia. Finalmente, multiplicando-se pelos pesos específicos destes materiais, tem-se uma demanda de 1.456 ton/km, 3.780 ton/km, 4.200 ton/km e 4.284 ton/km respectivamente de asfalto, brita, calcário e areia.

2.3. Descrição do sistema ferroviário: equipamentos e infraestrutura

O sistema ferroviário contempla a locomotiva Diesel-Elétrica modelo GEAC44 com peso de 195 toneladas, e vagão modelo hopper fechado com tara de 30 toneladas e capacidade de carga de 90 toneladas de produto/vagão. A composição total é de 80 vagões. O tempo de vida do vagão e locomotiva é de 20 anos.

O terminal de Rondonópolis possui quatro armazéns, com uma área total de 12.118 m^2. Há 7 tombadores (de 7 toneladas cada um em aço) que trabalham simultaneamente, o que possibilita uma descarga de 70 caminhões por hora. A capacidade de armazenagem é de 60 mil toneladas de grãos, onde toda movimentação ocorre por meio de correias transportadoras (438 m de comprimento total). O terminal ainda possui um pátio asfaltado para caminhões com 40.415 m^2.

Para a estrada de ferro, a etapa inicial envolve os serviços de terraplanagem que englobam caminhos de serviço, escavação, carga, transporte, deposição do material extraído e consolidação dos aterros; estes custos monetários são contabilizados neste trabalho. De acordo com o DNIT (2016), para a dormente de madeira, tem-se a demanda de 0,11 m^3/dormente com 3 dormente/m^2, resultando em 0,34 m^3/m^2 (ou 342,72 m3/km). A demanda de brita é de 0,75 m^3/metro (ou 750 m^3/km), e considerando a densidade da brita tem-se 1.350 ton/km. Em relação à demanda de ferro, contabilizam-se os clips e os trilhos, resultando em aproximadamente 759 ton/km. O tempo de vida da ferrovia é de 50 anos.

2.4. Contabilidade ambiental em emergia

Emergia é a energia disponível de um tipo usada direta e indiretamente para fazer um serviço ou produto; sua unidade é o emjoule ou sej (Odum, 1996). Uma idéia comum entre as pessoas em todos os lugares é que algumas coisas necessitam de mais "esforço" do que outras para serem feitas, assim, muito antes da ciência física fazer uma apurada definição quantitativa, a palavra energia foi usada para se referir ao trabalho feito. Neste conceito científico, não é possível entender que diferentes tipos de energia representem diferentes níveis de "esforço". Desta forma, emergia surge como uma medida que analisa a origem dos recursos e considera a energia utilizada em todos os processos de transformação,m incluindo recursos da economia e da natureza. Segundo Tilley e Swank (2003), a contabilidade ambiental em emergia permite superar a diversidade de métricas utilizadas para quantificar diferentes tipos de energia através da normalização de todos os produtos e serviços a uma unidade que representa a quantidade e qualidade de trabalho gerado e mantido pelo sistema. Segundo Brown e Ulgiati (2004), as entradas de um sistema como a luz solar, combustível, eletricidade e serviços humanos podem ser colocadas numa base comum expressa em emjoules de energia solar requerida para produção de cada uma delas. De acordo com Odum (1996), se levarmos em conta o princípio da hierarquia universal de energia, válido em todo tempo e lugar, o trabalho, incluindo o que

se realiza na economia, pode ser comparado em uma base comum, expressando os produtos e os serviços em unidades de emergia (sej/unidade). O mesmo autor afirma que a humanidade e os sistemas da natureza fazem parte de uma hierarquia de energia universal, estando imersos em uma rede de transformação de energia que une os sistemas pequenos e grandes e estes a sistemas ainda maiores. Maiores detalhes sobre este método podem ser encontrados principalmente nas referências citadas.

A contabilidade ambiental em emergia fornece uma série de indicadores que podem ser utilizados pelos decisores em busca do desenvolvimento sustentável. Dentre todos os indicadores, um está fortemente relacionado à eficiência global na conversão de recursos em bens e serviços: Transformidade. O termo "global" é utilizado devido à escala espacial de avaliação considerada pelo método, a biosfera. A transformidade, medida em sej/J, avalia a demanda total de recursos globais (matéria e energia) quantificados em sej que foram necessários para disponibilizar 1 Joule de bens ou serviços. Trata-se de uma relação de eficiência de conversão entrada-saída, onde menores valores de transformidade indicam maior eficiência global. Quando a unidade considerada no denominador é diferente de Joule, então o indicador passa a ter o nome geral de Valor Unitário de Emergia (UEV, do inglês "Unit Emergy Value"). Como o objetivo deste trabalho é comparar a eficiência global no transporte de soja entre os sistemas rodoviário e ferroviário, a unidade funcional considerada é toneladas de soja por quilómetro percorrido, ou ton.km. Logo, o indicador calculado e considerado para tomar a decisão é o sej/ton.km.

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta o diagrama de energia do sistema avaliado, incluindo os subsistemas transporte ferroviário e rodoviário simbolizados pelos retângulos internos. Percebe-se que para escoar os 13.024.686 toneladas de soja ao porto de Santos no período da safra de 2014/2015 são necessários uma série de recursos simbolizados pelos círculos externos, incluindo materiais, energia e mão-de-obra; precisamente, aço, madeira, brita, areia, asfalto, calcário e eletricidade. A Figura 2 representa um modelo conceitual do funcionamento do sistema, onde a interpretação do analista sobre a realidade é representada de forma a fornecer o melhor entendimento possível do sistema, apresentando os principais *drivers*, suas interações, produtos e coprodutos.

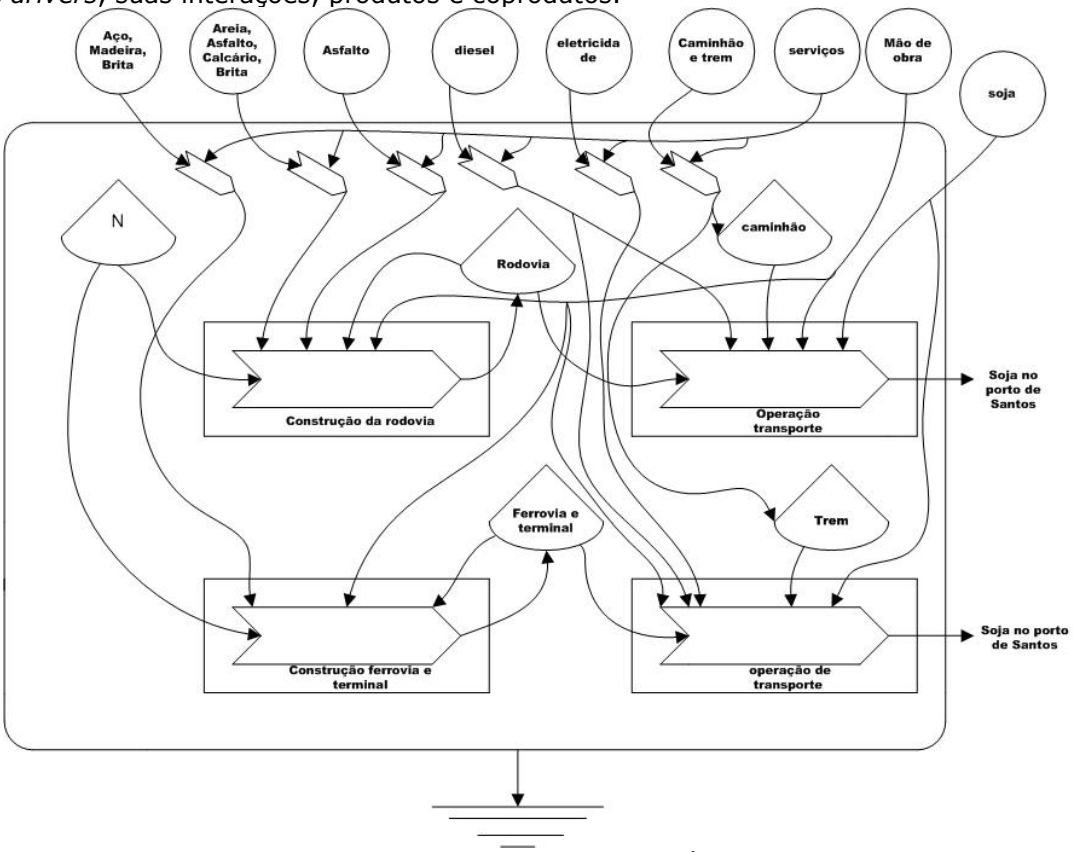

Fig. 2. Diagrama de energia do transporte de soja do Mato Grosso até o Porto de Santos considerando os modais rodoviário e ferroviário.

Os dois retângulos internos superiores representam o transporte da soja via rodovia, onde o retângulo da esquerda representa a fase de implementação da infraestrutura (rodovia) que, quando interagindo com o estoque de caminhões, possibilitam a fase de operação do transporte rodoviário representado pelo retângulo à direita; o produto é a soja transportada até o porto de Santos. Para o transporte ferroviário (representado pelos dois retângulos inferiores), a interpretação é a mesma, mas ele depende de diferentes quantidades e tipos de recursos para seu funcionamento. Devido à esta diferença, comparações como esta são importantes para fornecer subsídios aos decisores.

Percebe-se que este sistema de transporte, que muitas vezes considerado como de simples interpretação ou linear (como representado pelo diagrama de OTIDA da Figura 1), é um sistema complexo que depende de uma série de recursos e inter-relações para o seu bom funcionamento. Essa complexidade, muitas vezes é despercebida ou não considerada quando os aspectos técnico-econômicos são os únicos considerados para uma decisão. Neste sentido, a aplicação de métodos científicos baseados em unidades biofísicas como a contabilidade ambiental em emergia tornam-se importantes quando deseja-se planejar em direção ao desenvolvimento sustentável.

Após entender o sistema e elaborar seu modelo conceitual representativo, todos os fluxos de energia identificados podem ser quantificados. A Tabela 2 apresenta a tabela de emergia do transporte rodoviário de soja de MT ao porto de Santos. Os percentuais finais de representatividade sobre a emergia total demandada pelo sistema aponta que o diesel é o recurso mais utilizado com aproximadamente 34,45%, seguido pelo asfalto 12,1% , calcário com 11,9%, ,solo com 2,8%, areia com 2,3%, brita com 2% cada e aço com 1,7% e mão de obra com 1,5%; os outros recursos juntos totalizam menos que 2%. O item serviços corresponde, principalmente, ao custo do diesel utilizado durante a fase de operação, atingindo aproximadamente 29,3% da emergia total. Estes números podem ser úteis em uma potencial gestão de recursos, onde deve-se ter esta ordem de prioridade de ações para maximizar a redução da demanda total de emergia; por exemplo, primeiramente dever-se-ia reduzir o consumo de diesel utilizado na fase de operação do transporte de soja via rodovia.

Tabela 2. Avaliação em emergia do transporte rodoviário de soja dos municípios produtores até o porto de Santos. Memorial de cálculo é apresentado no Apêndice A.

Nota	Item	Quantidade	Unid./ano	UEV (sej/Unid.)	Emergia (sej/ano)	Emergia (%)
Infra-estrutura: Caminhão						
1	Aço	1,76E+10	g	7,81E+09	1,37E+20	1,7
2	Alumínio	1,51E+09	g	2,13E+10	3,22E+19	<1
3	Borracha	1,49E+09	g	7,22E+09	1,08E+19	<1
4	Plástico	2,01E+09	g	5,51E+09	1,11E+19	<1
5	Vidro	7,56E+08	g	1,32E+10	9,98E+18	<1
6	Cobre	3,65E+08	g	9,80E+10	3,58E+19	<1
7	Zinco	1,30E+08	g	7,20E+10	9,36E+18	<1
8	Serviços	1,89E+08	USD	4,24E+12	8,01E+20	9,7
Infra-estrutura: Rodovia						
9	Asfalto	3.93E+10	g	2,55E+10	1,00E+21	12,1
10	Brita	9,73E+10	g	1,68E+09	1,63E+20	2,0
11	Calcário	1,03E+11	g	9,59E+09	9,88E+20	11,9
12	Areia	1,15E+11	g	1,68E+09	1,93E+20	2,3
13	Solo	1,36E+11	g	1,68E+09	2,28E+20	2,8
14	Serviços	1,62E+07	USD	4,24E+12	6,87E+19	<1
Operação						
15	Diesel	1,58E+16	J	1,81E+05	2,86E+21	34,45
16	Mão-de-obra	9.76E+12	J	1,24E+07	1,21E+20	1,5
17	Serviços	3,84E+08	USD	4,24E+12	1,63E+21	19,6
				Total =	8,30E+21	100,0

Com procedimento semelhante, a Tabela 3 apresenta a tabela em emergia do transporte de soja do terminal em Rondonópolis até o Porto de Santos. Os resultados mostram que a representatividade sobre o total de emergia demandado pelo sistema de transporte ferroviário possui a seguinte hierarquia: serviços com 65,6%, ferro com 18,8%, brita 9,7%, aço 1,7%, e todos os outros recursos com 4,2% no total. Assim como para o sistema rodoviário, o sistema ferroviário depende fortemente do item "serviços" que são aqui representados pelo custo de mercado (em R$) de todos os recursos utilizados, principalmente pelo custo da locomotivas e vagões que correspondem a 55,5% da emergia total. Alguns analistas em emergia argumentam que o item serviços não deveria ser considerado nas avaliações devido à todas as incertezas e subjetividades oriundas do valor de mercado dos recursos,

que englobam basicamente a disposição a pagar pelo bem ou serviço. De qualquer forma, este presente trabalho considera a abordagem sugerida por Brown e Ulgiati (2010), que buscam evitar o uso incorreto de uma UEV para um item através da contabilização do item como sua unidade física (energia e material|) e como seu valor monetário ($).

Tabela 3. Avaliação em emergia do transporte ferroviário de soja do terminal de Rondonópolis em Mato Grosso até o porto de Santos. Memorial de cálculo é apresentado no Apêndice B.

Nota	Item	Quantidade	Unid./ano	UEV (sej/Unid.)	Emergia (sej/ano)	Emergia (%)
Infra-estrutura: Locomotiva e vagões						
1	Aço	1,47E+09	g	7,81E+09	1,15E+19	1,7
2	Ferro	7,71E+07	g	5,78E+09	4,46E+17	<1
3	Serviços	8,56E+07	USD	4,24E+12	3,63E+20	53,8
Infra-estrutura: Ferrovia						
4	Brita	3,90E+10	g	1,68E+09	6,55E+19	9,7
5	Ferro	2,19E+10	g	5,78E+09	1,27E+20	18,8
6	Madeira	7,23E+09	g	8,80E+08	6,36E+18	<1
7	Solo	3,12E+07	g	1,68E+09	5,24E+16	<1
8	Serviços	1,41E+07	USD	4,24E+12	5,98E+19	8,9
Infra-estrutura: Terminal ferroviário						
9	Aço	4,40E+06	g	7,81E+09	3,44E+16	<1
10	Concreto	6,68E+06	g	2,42E+09	1,62E+16	<1
11	Fibrocimento	1,78E+06	g	2,07E+09	3,68E+15	<1
12	Asfalto	1,21E+08	g	2,55E+10	3,09E+18	<1
13	Borracha	3,61E+06	g	7,22E+09	2,61E+16	<1
14	Alumínio	7,10E+04	g	2,13E+10	1,51E+15	<1
15	Serviços	2,06E+06	USD	4,24E+12	8,73E+18	1,3
Operação						
16	Diesel	8,04E+13	J	1,85E+05	1,46E+19	2,2
17	Mão-de-obra	1,23E+11	J	1,24E+07	1,53E+18	<1
18	Eletricidade	1,74E+13	J	1,45E+05	2,56E+18	<1
19	Serviços	2,47E+06	USD	4,24E+12	1,05E+19	1,6
				Total =	6,74E+20	100,0

De acordo com a Tabelas 2 e 3, o transporte ferroviário demanda anualmente menor quantidade de emergia para transportar 13 milhões de toneladas de soja em 7 meses comparado ao sistema rodoviário (6,74E20 sej/ano contra 8,30E21 sej/ano). Porém, este número pouco indica uma vez que os percursos realizados (distâncias) ainda não foram considerados. Isso é importante porque as comparações devem ser realizadas considerando a mesma unidade funcional que é distância transportada (em km). De qualquer forma, esta etapa de cálculo em sej/ano é necessária, pois enquanto alguns recursos dependem da quantidade de soja transportada como número de caminhões, trens e vagões, outros itens não dependem da quantidade de soja transportada como rodovias e trilhos. Assim, após obter a emergia total em sej/ano para os dois sistemas rodoviário e ferroviário, estes valores agora precisam ser convertidos nas unidades de sej/ton.km para permitir a comparação entre ambos. O Apêndice C apresenta estes cálculos detalhados, o que resulta nos seguintes indicadores: 6,25E+5 sej/ton.km para o sistema rodoviário e 9,89E+6 sej/ton.km para o sistema ferroviário. Acrescentando-se, ainda, a média dos trajetos de caminhão dos polos produtores ao Terminal de Rondonópolis chega-se ao valor de 7,39E6 sej/ton.km para sistema ferroviário[1].

Estes indicadores mostram que, enquanto o sistema ferroviário demanda 73,9 E5 sej para transportar 1 tonelada de soja por 1 quilômetro, o sistema rodoviário demanda 6,25E5 E5 sej para realizar o mesmo trabalho, um valor aproximadamente 12 vezes inferior. Isso indica a melhor eficiência global em emergia para o sistema rodoviário em relação ao ferroviário.

Para efeito de comparação, Federici et al. (2003) aplicaram quatro diferentes métodos científicos (incluindo a contabilidade ambiental em emergia) para avaliar o desempenho de sistemas de transporte rodoviário e ferroviário de passageiros na Itália. Focando nos resultados em emergia, o sistema rodoviário obteve uma demanda de 2,37E11 sej/ton.km enquanto o ferroviário 4,17E11 sej/ton.km, indicando melhor eficiência global em emergia para o sistema rodoviário; neste caso, o rodoviário superou o ferroviário em aproximadamente 1,7 vezes. Em 2006, os mesmos autores

[1] Eficiência global do sistema ferroviário = $((9{,}89E6\ sej/ton.km)_{trem} * 1446\ km_{terminal\text{-}santos}) + (6{,}25E5\ sej/ton.km)_{rodovia} * 535\ km_{produtor\text{-}terminal})) / (535+1446)\ km_{produtor\text{-}santos} = 7{,}39E6\ sej/ton.km$

(Federici et al., 2006) realizaram estudo similar na Itália para avaliar os aspectos energético-ambientais do transporte de passageiros entre as cidades de Milão e Napoli via rodoviário e ferroviário. Uma abordagem multimétrica foi considerada pelos autores, mas focando nos resultados obtidos pela contabilidade ambiental em emergia, os números indicam melhor eficiência global para o sistema de transporte rodoviário (1,1E11 sej/ton.km) em relação ao ferroviário (14,3E11 sej/ton.km) em aproximadamente 13 vezes.

Sabe-se que a decisão sobre a escolha de um sistema de transporte sobre outro deve, obrigatoriamente, considerar outros importantes aspectos como econômico, logística, tempo de transporte, técnicos, etc. Além disso, mesmo que os resultados obtidos neste trabalho estejam alinhados aos resultados encontrados pelas duas referências citadas (Federici et al., 2003; 2006), as diferenças entre os sistemas estudos devem ser consideradas, principalmente relacionadas às caraterísticas geográficas que influenciam fortemente no tipo e quantidade de recursos necessários para implementação e operação dos sistema de transporte. De qualquer forma, os resultados encontrados neste trabalho indicam que transportar a soja de MT até o porto de Santos deveria ser realizada via modal rodoviário para garantir maior eficiência global em emergia. Se o planejamento de uma sociedade deve estar sempre alinhado aos objetivos do desenvolvimento sustentável, então o indicador de eficiência aqui calculado deveria ser reconhecido como importante e considerado nas tomadas de decisão.

4. Conclusões

Considerando os métodos e dados primários utilizados neste trabalho, os resultados mostram uma demanda de emergia para o sistema rodoviário de 6,25 E5 sej/ton.km, enquanto o sistema ferroviário demanda 73,9 E5 sej/ton.km para transportar a soja do Estado do Mato Grosso até o Porto de Santos. Esta diferença indica uma eficiência global em emergia de aproximadamente 12 vezes superior para o sistema rodoviário, sugerindo que este modal deveria ser promovido em relação ao ferroviário. Por outro lado, reconhece-se que outros aspectos (por exemplo, econômicos, técnicos, sociais, logística e tempo) deveriam ser considerados simultaneamente ao indicar de eficiência global calculado neste trabalho para auxiliar em uma decisão melhor fundamentada sobre um tema tão importante para a economia brasileira – o escoamento da *commodity* soja para exportação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Vice-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Paulista (UNIP), à Fatec da Baixada Santista, e ao CNPq Brasil (proc. 307422/2015-1).

Referências

Agostinho, F., Pereira, L., 2013. Support area as an indicator of environmental load: Comparison between Embodied Energy, Ecological Footprint, and Emergy Accounting methods. Ecological Indicators 24, 494-503.

Amiril A., Nawawi A.H., Takim R., Latif S.N.F.A, 2014. Transportation Infrastructure Project Sustainability Factors and Performance. Procedia - Social and Behavioral Sciences 153, 90-98.

Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT). Disponível em http://www.antt.gov.br. Acesso em 5 de agosto de 2016.

Brandt-Williams SL., 2002. Handbook of emergy evaluation: a Compendium of data for emergy Computation Issued in a series of Folios. Folio no. 4; 2002. Disponível em http://www.emergysystems.org/folios.php. Acesso em 05 de Janeiro de 2017.

Brown, M.T., Protano, G., Ulgiati, S., 2011. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. Ecol. Model. 222, 879-887.

Brown, M.T. and S. Ulgiati. 2010. Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: A review and refinement of the emergy baseline. *Ecological Modelling* 221(20): 2501-2508.

Brown, M.T., Ulgiati, U., 2004. Emergy analysis and environmental accounting. Encycl. Energy 2, 329-354.

Brown, M.T., Buranakarn, V., 2003. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle option. Resources, Conservation and Recycling 38, 1-22.

Buranakarn, V., 1998. Evaluation of recycle and reuse of building materials using the emergy analysis method. Ph.D. Dissertation. University of Florida, FL.

Companhia Docas do Estado de São Paulo, CODESP, 2015. Disponível em http://www.portodesantos.com.br/estatisticas.php. Acesso em10 de novembro de 2016.

Cohen, M.J., Sweeney, S., Brown, M.T., 2007. Computing the unit emergy value of crustal elements. Emergy Synthesis 4, Theory and Applications of the Emergy Methodology. Proceeding of the 4th Biennial Emergy Research Conference, Gainesville, University of Florida.

Christopher D. De Vilbiss, Mark T. Brown, 2015. New method to compute the emergy of crustal minerals. Ecological Modelling 315, 108-115.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), 2016. Disponível em www.dnit.gov.br. Acesso em 10 de novembro de 2016.

Federici, M., Ulgiati, S., Basosi, R., 2008. Air versus terrestrial transport modalities: An energy and environmental comparison. Energy 34, 1493-1503.

Federici, M., Ulgiati, S., Verdesca, D., Basosi, R., 2003. Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems. The case of Siena, Italy. Ecological Indicators 3, 155-169.

Federici, M., Ulgiati, S., Basosi, R., 2006. A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems. Energy 33, 760-775.

Giannetti, B.F., Almeida, C.M.V.B., Agostinho, F., Bonilla, S.H., Ulgiati, S., 2013. Primary evidences on the robustness of environmental accounting from emergy. Journal of Environmental Accounting and Management 1, 203-212.

Giannetti, B.F., Agostinho, F., Moraes, L.C., Almeida, C.M.V.B., Ulgiati, S., 2015. Multicriteria cost-benefit assessment of tannery production: the need for breakthrough process alternatives beyond conventional technology optimization. Environmental Impact Assessment Review 54, 22-38.

IGBE, 2013. Produção agrícola municipal. Culturas temporárias e permanentes. Disponível em http://ftp.ibge.gov.br/produção_agricola/producao_agricola_municipal_[anual]/2013/pam2013.pdf. Acesso em 19 de outubro de 2016.

IMEA, 2016. Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária. Entendendo o Mercado da Soja. Cuiabá: IMEA, 2016. Disponível em http:www.imea.com.br. Acesso em 20 de dezembro de 2016.

MAPEIA, 2016. Disponível em http:www.mapeia.com.br. Acesso em 15 novembro de 2016.

Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. Wiley, New York, NJ.

Odum, H.T., 2000. Emergy of Global Processes. Folio #2, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville. Disponível em http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/documents/folios/Folio_02.pdf. Acesso em 02 de fevereiro de 2017.

Ojima, A.L.R.O., 2004. Análise da movimentação logística e competitividade da soja brasileira: uma aplicação de um modelo de equilíbrio espacial de programação quadrática. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas.

Tilley, D.R., Swank, W.T., 2003. Emergy based environmental system assessment of a multipurpose temperate mixed forest watershed of the southern Appalachian Mountains USA. J. Environmental Management 69, 213–227.

USDA, UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soybean transportation Guide: Brazil 2012, 2013a. Disponível em https://www.ams.usda.gov/?dDocName=STELPRDC5103745. Acesso em 10 de novembro de 2016.

Apêndice A. Memorial de cálculo do sistema de transporte rodoviário (Tabela 2)

Estimativa da distância total percorrida pelo caminhão durante sua vida útil transportando soja do Mato Grosso até o Porto de Santos. Tempo de carga e descarga por viagem = $5h_{carga}$/viagem; Velocidade média do caminhão nas rodovias = 55 km/h; Horas de trabalho = 8 h/dia, 21 dias/mês, 12 meses/ano, 2.016 h/ano; Distância entre os produtores de soja ao porto de Santos, ida e volta (distância estimada no corpo do texto principal deste trabalho) = 3.782 km/viagem; Vida útil do caminhão = 15 anos, 180 meses; Conversão = [(dias/mês) (h/dia)] / [((km/viagem)/(km/h)) + (h_{carga}/viagem)]; Quantidade = 2,28 viagem/mês; Conversão = (viagem/mês) (km/viagem) ($mês_{vida\ útil}$); Quantidade = 1.552.133 km; Total de toneladas de soja = 13.024.686 ton; período de transporte = 7 meses/ano; Conversão = (ton)/(meses) = 1.860.669,43 ton/mês; total de toneladas transportadas por caminhão = 48 ton; Conversão = (viagem/mês).(ton/viagem) = 109,44 ton/mês; Conversão para a quantidade de caminhões = (ton/mês)/(ton/mês.caminhão) = 17.001 caminhões.

Algumas das UEVs utilizadas abaixo estão na linha base 15,2E24 sej/ano (Brown e Ulgiati, 2010), enquanto outras 15,83E24 sej/ano (Odum, 2000). Desde que a diferença é de apenas 4% entre ambas, considera-se que as mudanças estão dentro das incertezas dos números obtidos. Todas as UEVs não incluem Mão-de-obra e Serviços.

***** Caminhão

Nota #1 (Aço) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de aço = 67,5%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 1,76E10 g/ano; UEV do aço = 7,81E9 sej/g (Brown e Ulgiati, 2004).

Nota #2 (Alumínio) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de alumínio = 5,8%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 1,51E9 g/ano; UEV do alumínio = 2,13E10 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #3 (Borracha) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de borracha = 5,7%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 1,49E9 g/ano; UEV da borracha = 7,22E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #4 (Plástico) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de plástico = 7,7%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 2,01E9 g/ano; UEV do plástico = 5,51E9 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #5 (Vidro) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de vidro = 2,9%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 7,56E8 g/ano; UEV do vidro = 1,32E10 sej/g (Buranakarn, 1998; glass fiber).

Nota #6 (Cobre) -veículos necessários = 17.001 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de cobre = 1,4%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 3,65E8 g/ano; UEV do cobre = 9,80E10 sej/g (Cohen et al., 2007).

Nota #7 (Zinco) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Peso do veículo = 2,3E7 g/caminhão; Porcentagem em peso de zinco = 0,5%; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (caminhões) (g/caminhão) (%) / (ano); Quantidade = 1,30E8 g/ano; UEV do zinco = 7,20E10 sej/g (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota #8 (Serviços) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Preço de mercado do caminhão = 535.541,00 R$; Preço total dos 17001 caminhões = 9.104.732.541,00 R$; Vida útil do caminhão = 15 anos; Conversão = (R$) / (ano); Quantidade = 6,08E8 R$/ano ou 1,89E8 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Rodovia

Nota #9 (Asfalto) – Demanda = 910 m3/km; Densidade do asfalto = 1.600.000 g/m3; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 3,93E10 g/ano; UEV do asfalto = 2,55E10 sej/g (Brown e Buranakarn,2003).

Nota #10 (Brita) – Demanda = 2.000 m3/km; Densidade da brita = 1.800.000 g/m3; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 9,73E10 g/ano; UEV da brita = 1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #11 (Calcário) – Demanda = 2.000 m3/km; Densidade do calcário = 1.900.000 g/m3; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 1,03E11 g/ano; UEV do calcário = 9,59E9 sej/g (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota #12 (Areia) – Demanda = 2.500 m3/km; Densidade do asfalto = 1.700.000 g/m3; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 1,15E11 g/ano; UEV da areia =1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #13 (Solo) – Largura da rodovia = 14 m; Comprimento = 1.000 m; Profundidade fértil do solo = 0,2 m; Volume de solo apropriado = 2.800 m3/km; Densidade média do solo = 1.800.000 g/m3; Vida útil da rodovia = 70 anos; Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 1,36E11 g/ano; UEV do solo = 1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #14 (Serviços) – Custo de implantação da rodovia = 1.926.000,00 R$/km (implantação e pavimentação de pista simples); Distância do produtor em MT até o porto de Santos = 1.891 km; Vida útil da rodovia = 70 anos; Conversão = (R$/km) (km) / (ano); Quantidade = 5,20E7 R$/ano ou 1,62E7 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Operação

Nota #15 (Diesel) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Consumo = 2,5 km/L ou 0,4 L/km; Densidade do diesel = 838,78 kg/m3; Poder calorífico superior do diesel = 45.832.000 J/kg; Distância anual percorrida = 60.360 km/ano; Conversão = (caminhões) (L/km) (kg/m3) (J/kg) (1/1000 m3/L) (km/ano); Quantidade = 1,58E16 J/ano; UEV do diesel = 1,81E5 sej/J (Brown et al., 2011).

Nota #16 (Mão de obra) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Motorista do caminhão, 1 pessoa; Velocidade média do caminhão = 55 km/h; Demanda média calórica do motorista (metabolismo) = 125 kcal/pessoa.h; Distância anual percorrida = 60.360 km/ano; Conversão = (caminhões) (pessoa) (kcal/pessoa.h) (4186 J/kcal) (km/ano) / (km/h); Quantidade = 9,76E12 J/ano; UEV da mão-de-obra = 1,24E7 sej/J (Brandt-Williams, 2002).

Nota #17 (Serviços) – veículos necessários = 17.001 caminhões; Custo do diesel = 3,00 R$/L; Consumo = 2,5 km/L ou 0,4 L/km; Distância anual percorrida = 60.360 km/ano; Conversão = (caminhões) (R$/L) (L/km) (km/ano); Quantidade = 1,23E9 R$/ano ou 3.84E8 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

Observação: 2,28 viagem/mês*3782km/viagem*7meses=60360km;

Apêndice B. Memorial de cálculo do sistema de transporte ferroviário (Tabela 3)

Estimativa da distância total percorrida pela locomotiva durante sua vida útil transportando soja do terminal em Rondonópolis até o Porto de Santos. Tempo de carga e descarga por viagem = $5h_{carga}$/viagem; Velocidade média da locomotiva = 30 km/h; Horas de trabalho = 8 h/dia, 21 dias/mês, 12 meses/ano, 2.016 h/ano; Distância entre o terminal em Rondonópolis ao porto de Santos, ida e volta (distância estimada no corpo do texto principal deste trabalho) = 2.892 km/viagem; Vida útil da locomotiva e vagões = 20 anos, 240 meses; Conversão = [(dias/mês) (h/dia)] / [((km/viagem)/(km/h)) + (h_{carga}/viagem)]; Quantidade = 1,65 viagem/mês; Conversão = (viagem/mês) (km/viagem) ($mês_{vida\ útil}$); Quantidade = 1.145.232 km em sua vida útil. Total de toneladas de soja = 13.024.686 ton; período de transporte = 7 meses; Conversão = (ton)/(meses) = 1.860.669,43 ton/mês; total de toneladas transportada por uma composição de 80 vagões = 7200 ton; Conversão = (viagem/mês).(ton/viagem) = 11.880 ton/mês; Conversão para a quantidade de número de composições (locomotiva + 80 vagões) = (ton/mês)/(ton/mês.composição) = 156,62 composições.

Algumas das UEVs utilizadas abaixo estão na linha base 15,2E24 sej/ano (Brown e Ulgiati, 2010), enquanto outras 15,83E24 sej/ano (Odum, 2000). Desde que a diferença é de apenas 4% entre ambas, considera-se que as mudanças estão dentro das incertezas dos números obtidos. Todas as UEVs não incluem Mão-de-obra e Serviços.

***** Locomotiva e vagões

Nota #1 (Aço) – veículos necessários = 156,62 composições; Peso do veículo = 19,7E7 g/composição; Porcentagem em peso de aço = 95%; Vida útil da locomotiva + vagões = 20 anos; Conversão = (composições) (g/composição) (%) / (anos); Quantidade = 1,47E9 g/ano; UEV do aço = 7,81E9 sej/g (Brown e Ulgiati, 2004).

Nota #2 (Ferro) – veículos necessários = 156,62 composições; Peso do veículo = 19,7E7 g/composição; Porcentagem em peso de aço = 5%; Vida útil da locomotiva + vagões = 20 anos; Conversão = (composições) (g/composição) (%) / (anos); Quantidade = 7,71E7 g/ano; UEV do ferro = 5,78E9 sej/g (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota #3 (Serviços) – Preço da locomotiva = 7.000.000,00 R$; Preço de cada vagão = 350.000,00 R$/vagão; Total de vagões = 80 vagões; Preço locomotiva + vagões = 35.000.000,00 R$; veículos necessários = 156,62 composições; preço total = R$ 5.481.700.000,00 ; Vida útil da locomotiva + vagões = 20 anos; Conversão = (R$) / (ano); Quantidade = 274.085.000,00 R$/ano ou 85.651.562,50 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Ferrovia

Nota #4 (Brita) – Demanda = 750 m3/km; Densidade da brita = 1.800.000 g/m3; Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos ***= 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 3,90E10 g/ano; UEV brita = 1,68E9 sej/ano (Odum, 1996).

Nota #5 (Ferro) – Peso do trilho = 135,12 ton/km (2 trilhos); Demanda de clips = 24.000 clips/km, 13 kg/clip, 2 trilhos = 624 ton/km (2 trilhos); Total de ferro = 759 ton/km; Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos ***= 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (ton/km) (km) (1E6 g/ton) / (ano); Quantidade = 2,19E10 g/ano; UEV ferro = 5,78E9 sej/g (De Vilbiss e Brown, 2015).

Nota # 6 (Madeira) – Demanda = 342,72 m3/km; Densidade = 730.000 g/m3; Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos ***= 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 7,23E9 g/ano; UEV = 8,80E8sej/g (Buranakarn, 1998)

Nota #7 (Solo) – Largura da ferrovia = 3 m; Profundidade fértil do solo = 0,2 m; Volume de solo apropriado = 0,6 m3/km; Densidade média do solo = 1.800.000 g/m3; Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos ***= 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (m3/km) (g/m3) (km) / (ano); Quantidade = 3,12E7 g/ano; UEV do solo = 1,68E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #8 (Serviços) – Custo da ferrovia = 1.556.637,18 R$/km (www.epl.gov.br); Distância do produtor em MT até o porto de Santos *** usar a distância do terminal de Rondonópolis até Santos ***= 1.446 km; Vida útil da ferrovia = 50 anos; Conversão = (R$/km) (km) / (ano); Quantidade = 4,50E7 R$/ano ou 1,41E7 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Terminal Rondonópolis

Nota #9 (Aço) – Pórtico = 12118 m2, 25 kg/m2 = 303 ton; Tombadores = 7 unidades, 19.500 kg/unidades = 137 ton; Total de aço = 440 ton; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (ton) (1E6 g/ton) / (ano); Quantidade = 4,4E6 g/ano; UEV do aço = 7,81E9 sej/g (Brown e Ulgiati, 2004).

Nota #10 (Blocos de concreto) – Demanda de blocos = 446 m (comprimento) * 10 m (pé direito) * 13 blocos/m2 * 16,7 kg/blocos * 1000 g/kg = 9,68E8 g; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (g) / (ano); Quantidade = 6,68E6 g/ano; UEV = 2,42E9 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #11 (Fibrocimento) – Área coberta com fibrocimento = 7.136 m2; Peso específico do fibrocimento = 25 kg/m2; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (m2) (kg/m2) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 1,78E6 g/ano; UEV = 2.07E9sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #12 (Asfalto) – Área coberta com asfalto = 40.415 m2; Espessura do asfalto = 0,15 m; Densidade do asfalto = 2.000 kg/m3; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (m2) (m) (kg/m3) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 1,21E8 g/ano; UEV = 2,55E10 sej/g (Brown e Buranakarn,2003).

Nota #13 (Borracha) – Comprimento das correias = 438 m; Largura das correias = 1,5 m; Densidade específica da borracha = 22 kg/m2; Vida útil da correia = 4 anos; Conversão = (m) (m) (kg/m2) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 3,61E6 g/ano; UEV da borracha = 7,22E9 sej/g (Odum, 1996).

Nota #14 (Alumínio) – Área coberta com alumínio = 2.628 m2; Densidade específica do alumínio = 2,7 kg/m2; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (m2) (kg/m2) (1.000 g/kg) / (ano); Quantidade = 7,10E4 g/ano; UEV do alumínio = 2,13E10 sej/g (Buranakarn, 1998).

Nota #15 (Serviços) – Custo do terminal = (230000 m2) (3043,47 R$/m2) = 700.000.000,00 R$; Vida útil do terminal = 100 anos; Conversão = (R$) / (ano); Quantidade = 7,00E6 R$/ano ou 2,06E6 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

***** Operação

Nota #16 (Diesel) – veículos necessários = 156,62 composições; Consumo = 2,5 km/L ou 0,4 L/km; Densidade do diesel = 838,78 kg/m3; Poder calorífico superior do diesel = 45.832.000 J/kg; Distância anual percorrida = 33.402,6 km/ano; Conversão = (composições) (L/km) (kg/m3) (J/kg) (1/1000 m3/L) (km/ano); Quantidade = 8,04E13 J/ano; UEV do diesel = 1,81E5 sej/J (Brown et al., 2011).

***1,65 viagens/mês.composição * (2 * 1446) km/viagem * 7 meses/ano = 33.402,6 km/composição.ano ***

Nota #17 (Mão de obra) – Número de trabalhadores = 30 pessoas; Demanda média calórica do motorista (metabolismo) = 125 kcal/pessoa.h; Horas de trabalho anual = 2.016 h/ano; Conversão = (pessoa) (kcal/pessoa.h) (h/ano) (4186 J/kcal); Quantidade = 3,16E10 J/ano; UEV da mão-de-obra = 1,24E7 sej/J (Brandt-Williams, 2002). veículos necessários = 156,62 composições; Maquinista da composição, 1 pessoa; Velocidade média do composição = 30 km/h; Demanda média calórica do motorista (metabolismo) = 125kcal/pessoa.h; Distância anual percorrida = 33.402,6 km/ano; Conversão = (composições) (pessoa)(kcal/pessoa.h) (4186 J/kcal) (km/ano) / (km/h); Quantidade = 9,02E10 J/ano; UEV da mão-de-obra =1,24E7 sej/J (Brandt-Williams, 2002). Quantidade total = 3,16E10 + 9,12E10 = 1.23E11 J/ano.

Nota #18 (Eletricidade) – Demanda média = 400 kWh/m2.ano; Área dos armazéns = 12118 m2; Conversão = (kWh/m2.ano) (m2) (1.000 W/kW) (3.600 s/h); Quantidade = 1,74E13 J/ano; UEV da eletricidade = 1,47E5sej/J (Giannetti et al., 2015).

Nota #19 (Serviços) – veículos necessários = 156,62 composições; Custo do diesel = 3,00 R$/L; Consumo = 2,5km/L ou 0,4 L/km; Distância anual percorrida = 33.402,6 km/ano; Custo da eletricidade = 0,3373 R$/kWh; Demanda média de eletricidade = 400 kWh/m2.ano; Área dos armazéns = 12.118 m2; Conversão = [(composições)(R$/L) (L/km) (km/ano)] + [(R$/kWh) (kWh/m2.ano) (m2)]; Quantidade = 7,91E6 R$/ano ou 2,47E6 USD/ano; UEV = 4,24E12 sej/USD (Giannetti et al., 2015; EMR do Brasil para 2013).

Apêndice C. Conversão da emergia de sej/ano para sej/ton.km

***** Modal rodoviário

Cálculo do total de toneladas por caminhão por ano:

(2,28 viagens/caminhão.mes) (7meses/ano) = 15.96 viagens/caminhão.ano
[15,96 viagens/caminhão.ano]. (3782 km/viagem) = 60.360,72 km/caminhão.ano
(15,96 viagens/caminhão.ano) (48 ton/viagem) = 766,08 ton/caminhão.ano

Cálculo do número total de caminhões e total de km para transportar o total de toneladas de soja por ano:

(13.024.686 ton/ano) / (766,08 ton/caminhão.ano) = 17.001 caminhões
(60.360,72 km/caminhão.ano) (17.001 caminhões) = 1,02E+09 km/ano

Cálculo em emergia do sistema rodoviário para o total de toneladas de soja por quilometro:

(sej/ano)/[(km/ano).(ton)]
(8,30E+21sej/ano) / [(1,02E+09km/ano).(13.024.686 ton)] = **6,25E+05 sej/ton.km**

***** Modal ferroviário

Cálculo do total de toneladas por composição por ano:

(1,65 viagens/composição.mes) (7 meses/ano) = 11,55 viagens/composição.ano
(11,55 viagens/composição.ano) (2860 km/viagem) = 33.402,6 km/composição.ano

Cálculo do número total de composições e total de km para transportar o total de toneladas de soja por ano:

(13.024.868 ton/ano) / (83.160 ton/ composição.ano) = 156,62 composições
(33.402,6 km/composição.ano) (156,62 composições) = 5,23 E+06 km/ano

Cálculo em emergia do sistema ferroviário para o total de toneladas de soja por quilometro:

(sej/ano)/[(km/ano).(ton)]
(6,74 E+20) / (5.231.515,21 km/ano) (13.024.686 ton) = **9,89+E6 sej/ton.km**