

EMERGÉTICA DE ESTUFA AGRÍCOLA CONSTRUÍDA COM BASE DE EUCALIPTO E ARCOS DE BAMBU

CÉSAR CLARO TREVELIN¹, LEONARDO DE BARROS PINTO²

*Artigo extraído da dissertação do primeiro autor

¹ Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia – DERS, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil, cesartrevelin@yahoo.com.br

² Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia – DERS, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil, leonardo.pinto@unesp.br

RESUMO: Agricultura sustentável é vital para produção de alimentos saudáveis. Emergia é uma ferramenta biofísica que avalia sustentabilidade, que mensura, em uma única métrica, o trabalho da natureza e do ser humano na geração de seus produtos e serviços. O presente estudo analisou emergeticamente a construção e manutenção de estufa agrícola artesanal em Botucatu-SP; por meio da mensuração da quantidade de recursos renováveis, não renováveis, provenientes da economia e o fluxo emergético nos sistemas de produção, que possibilitaram o cálculo dos seguintes Índices Emergéticos: Rendimento emergético (EYR = 2,44), Investimento emergético (EIR = 0,70), Carga ambiental/Impacto ambiental (ELR = 1,82), Índice de sustentabilidade (ESI = 1,34) e Renovabilidade (%R = 35,48). A estufa analisada se mostrou sustentável a médio prazo (ESI = 1,34), mesmo tendo em sua composição dois materiais classificados como não sustentáveis, o bambu tratado (ESI = 0,72) e o eucalipto tratado (ESI = 0,23). O item que tem maior contribuição para a emergia da estufa ($8,68E+12$ seJ m⁻² ano⁻¹) é a mão de obra (45,14%) por se tratar de um processo construtivo artesanal. Os resultados também indicam que esse modelo de estufa tem uma contribuição moderada para o desenvolvimento econômico local, com baixíssimo impacto ambiental.

Palavras-chaves: emergia, sustentabilidade, cultivo protegido.

EMERGETIC OF AN AGRICULTURAL GREENHOUSE BUILT WITH EUCALYPTUS BASE AND BAMBOO ARCHÉS

ABSTRACT: Sustainable agriculture is vital for the production of healthy food. Emergy is a biophysical tool for sustainability assessment that measures, as a single metric, the work of nature and human beings in the generation of their products and services. The present study analyzed, through emergy, the construction and maintenance of an artisanal agricultural greenhouse in the city of Botucatu, SP, by measuring the amount of renewable, nonrenewable, and economic resources and the emergy flow in production systems, which made it possible to calculate the following emergy indices: the emergy yield (EYR = 2.44), the emergy investment (EIR = 0.70), the environmental load/environmental impact (ELR = 1.82), the sustainability index (ESI = 1.34) and the renewability (%R = 35.48). The greenhouse analyzed proved to be sustainable in the medium term (ESI = 1.34), even having two materials classified as unsustainable: treated bamboo (ESI = 0.72) and treated eucalyptus (ESI = 0.23). The item that has the greatest contribution to the emergy of the greenhouse ($8.68E+12$ seJ m⁻² yr⁻¹) is labor (45.14%) because it is a handcrafted construction process. The results also indicate that this greenhouse model makes a moderate contribution to local economic development, with very low environmental impact.

Keywords: emergy, sustainability, protected cultivation.

1 INTRODUÇÃO

As estufas são estruturas que permitem o controle da temperatura em seu interior, de tal modo que possa ser maior do que a temperatura em um ambiente externo. Ademais, contribuem para a proteção da planta em relação ao ataque de pragas, reduz o risco de intempéries climáticas e protegem do vento, da chuva, radiação solar, de modo a proporcionar um ambiente controlado ao melhor desenvolvimento da planta.

As estruturas das estufas podem ser construídas com diferentes materiais: alumínio, aço, madeira ou bambu. O alumínio possui maior durabilidade devido a sua alta resistência a corrosão, por outro lado é um material mais caro, sendo mais indicado para estufas com cobertura de vidro ou plástico rígido. O aço é indicado tanto para coberturas rígidas, quanto para coberturas com filme plástico, tem alta longevidade (décadas), alto custo para aquisição e um custo médio de manutenção relacionados a proteção anticorrosiva. As de madeira e bambu tem a matéria prima mais acessível, são adequados para cobertura com filme plástico e tem a menor vida útil, comparando-se com as metálicas (BUCKLIN, 2020).

O uso do bambu na construção da estrutura das estufas ou cultivos em bioconstruções é muito interessante sob o ponto de vista econômico, porque os insumos utilizados nas estufas convencionais podem atingir um valor inacessível para a maioria dos agricultores familiares (SILVA; LIMA; OLIVEIRA, 2011).

Um sistema produtivo é analisado economicamente baseando-se inicialmente nos custos fixos, custos variados, observação do mercado para, posteriormente, aplicar uma margem de lucro que se queira, com a intenção de se obter competitividade, por meio do preço final. Geralmente, a contribuição dos recursos naturais e dos ecossistemas não é medido na produção de determinado produto ou serviço (ORTEGA, 2005).

A análise de sistemas baseada em emergia, proposta por Odum (1996), é uma ferramenta de análise que consegue medir essas contribuições ambientais que

convencionalmente não são consideradas. Tal metodologia reúne em uma única métrica o trabalho da natureza e do ser humano na geração dos serviços e dos produtos.

O desenvolvimento da agricultura e do abastecimento nacional depende diretamente de informação e conhecimento, sendo que, essas duas variáveis são condições essenciais para o aprimoramento das políticas públicas, em sua formulação, execução e avaliação; com isso, amplia-se a criação de oportunidades de investimentos produtivos e o estudo de pesquisadores, fortalecendo a democracia (CONAB, 2010).

O estudo de uma estrutura produtiva agrícola, neste caso de materiais como eucalipto e bambu, bem como a análise da sustentabilidade destas estruturas por meio da análise emergética, são fundamentais ao desenvolvimento de sistemas produtivos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido no município de Botucatu, entre os meses de janeiro à março de 2021, na região centro-oeste do Estado de São Paulo, distante 224,8 km da capital paulista, com acesso facilitado pelas rodovias Marechal Rondon e Castelo Branco. Pelo método de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa, caracterizado como clima temperado quente (mesotérmico) úmido (CUNHA; MARTINS, 2009). A altitude do município varia de 756m à 920m. A média anual de chuvas é de 1.501,4 mm, sendo o primeiro trimestre o mais chuvoso, com cerca de 652,6mm, o que corresponde a 43,5% do total; o trimestre menos chuvoso é o que compreende os meses entre julho e setembro, com a precipitação de 166,8 mm, 11,1% da chuva anual. A temperatura média anual do município é de 20,3°C e a umidade relativa média anual é de 73,9%.

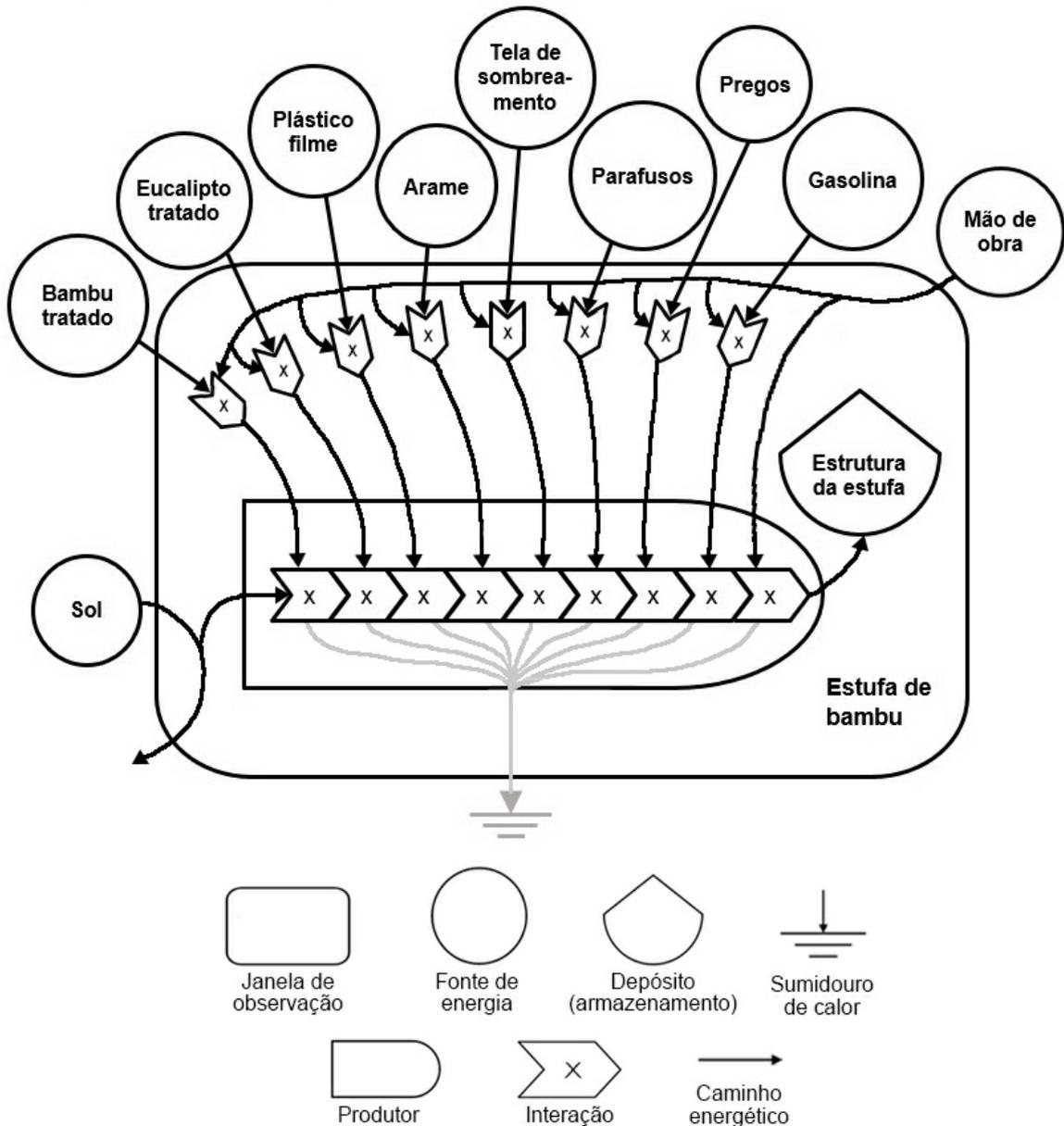
A radiação solar que incide sobre o município é de 5,05 kWh m⁻² dia⁻¹ (média dos últimos 22 anos) e a velocidade médio do vento ao longo do ano é de 1,07 m s⁻¹ (média dos últimos 30 anos). Os dados meteorológicos de longo prazo (1971 à 2006) foram obtidos da Estação Meteorológica do Departamento de Ciência de Solos e Recursos Ambientais –

FCA/UNESP, Botucatu, SP. Já os dados de radiação solar e velocidade do vento foram obtidos do programa da NASA “Prediction of World Energy Resources”.

Esse trabalho analisou emergeticamente um modelo específico de estufa agrícola desenvolvido no município de Botucatu-SP, tendo o bambu e o eucalipto tratados como material básico à construção da mesma.

A realização de um inventário crítico de processos, estoques e fluxos importantes que atravessam as fronteiras do sistema e as variações dos estoques internos de energia, podem ser obtidos por meio de modelagem matemática (ODUM, 1996). Para tanto, a construção de um diagrama permite entender a lógica do sistema. A Figura 1 contém o diagrama utilizado como para a mensuração da energia da estufa.

Figura 1. Diagrama de fluxo energético para construção e manutenção da estufa de bambu.



Fonte: elaborado pelos autores.

O fluxo de energia de entrada para o sistema foi estimado para as instalações estruturais e materiais usados nesses sistemas de acordo com sua vida útil (ASGHARIPOUR

et al., 2020). O tempo de vida da cobertura plástica da estufa, bambu tratado e base de eucalipto tratado foi estimado em 3 anos, 6 anos e 12 anos, respectivamente.

Todos os materiais e serviços considerados significativos para os sistemas analisados presentes nas “Tabelas de Cálculo Emergético” foram convertidas em fluxos de energia por meio da multiplicação de suas quantidades pelas UEVs apropriadas, adaptadas para as condições de Botucatu.

Porém, sempre que o insumo adquirido que compõe o sistema produtivo não possui uma UEV adequada na literatura para a quantificar sua energia, utiliza-se a energia contida no valor monetária gasto para adquirir o insumo. Para calcular a energia contida na unidade monetária Real (R\$), utilizou-se como base os dados da Energia Total (Y) do Brasil,

$$\begin{aligned} \text{Energia da Moeda Real (seJ R\$}^{-1}) &= \\ (\text{EMR do Brasil, } 6,50\text{E}+12 \text{ seJ US\$}^{-1}) \div (\text{câmbio, } 5,16 \text{ R\$ US\$}^{-1}) &= 1,26\text{E}+12 \text{ seJ R\$}^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Emdólar (EMR) brasileiro (seJ US\$}^{-1}) &= \\ (\text{energia total, } 2,19\text{E}+25 \text{ seJ}) \div (\text{PIB, } 3,37\text{E}+12 \text{ US\$}) &= 6,50\text{E}+12 \text{ seJ US\$}^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

Para o cálculo da energia do vento, inicialmente, foi necessário ter conhecimento de algumas informações como altitude da localidade e temperatura. Com esses dois dados, pode-se inferir a densidade do vento; neste caso, tem-se a altitude de 825 m e a temperatura média no município de Botucatu-SP de 20,03°C, o que resulta em uma densidade de 1,466 kg/m³. A partir dessa informação, juntamente com o valor da velocidade do vento,

$$\begin{aligned} \text{Energia cinética do vento (seJ s}^{-1}) &= \\ (\text{energia, } 3,59 \text{ E-3 J s}^{-1}) \times (\text{transformidade, } 1,50 \text{ E}+03 \text{ seJ J}^{-1}) &= 5,34\text{E}+0 \text{ seJ s}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Energia cinética do vento (J s}^{-1}) &= \\ (\text{densidade do ar, } 1,466 \text{ kg m}^{-3}) \times (\text{coeficiente de arrasto, } 0,002) \times (\text{velocidade do vento, } 1,07 \text{ m s}^{-1})^3 &= 3,59 \text{ E-3 J s}^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

Sendo:

Transformidade do vento, cinético: 1,50 E+03 seJ J⁻¹ (ODUM, 1996)

Densidade do ar = 1,466 kg m⁻³

Coefficiente de arrasto: 0,002 (ASGHARIPOUR *et al.*, 2020)

No caso da mão de obra, a Transformidade usada foi de 1,15E+07 seJ J⁻¹ que é um valor específico calculado por Bonilla *et al.* (2010) para o trabalho humano no Brasil. Esse cuidado com o contexto nacional também

que foi de 2,19E+25 seJ em 2018 (dado mais recente encontrado) e o PIB (produto interno bruto) brasileiro foi de 3,37 trilhões de dólares (3,37E+12 US\$) no mesmo ano. A divisão da Energia total usada do país por seu PIB resulta no Emdólar (EMR) do país que no caso é igual de 6,50E+12 seJ US\$⁻¹. Em seguida, para obtenção da energia por unidade de real dividiu-se o EMR pelo valor médio do dólar para o ano de 2020 sendo R\$ 5,16, dado extraído do site do Banco Central do Brasil na página de Cotações e Boletins. O valor resultante foi de 1,26E+12 seJ R\$⁻¹.

Equações para o cálculo da energia da Moeda Real:

é possível calcular a energia cinética e em seguida o valor da energia, por meio da multiplicação do valor da energia cinética pelo valor da transformidade do vento (1,50 E+03 seJ J⁻¹), descrita por Odum (1996). Dessa forma encontramos, para o contexto da localidade onde o trabalho foi desenvolvido, que a energia do vento é de 5,34E+0 seJ s⁻¹.

Equações para o cálculo da energia do vento:

foi levado em conta para a porcentagem da renovabilidade desse item que no caso do Brasil é de 50%. Diferentes de outros países, como a Austrália (49%) e a China (26%) (BONILLA *et al.*, 2010). Como o presente estudo é voltado

para o agricultor de hortas comunitárias e/ou familiar se considera o valor de mão de obra como um recurso local, por se tratar de um trabalho que é prioritariamente desenvolvido por membros de família. A Tr convertida para

UEV por hora de trabalho é igual a $6,02E+12$ seJ h⁻¹.

Equação para o cálculo da UEV da mão de obra:

$$\text{UEV da mão de obra (seJ h}^{-1}\text{)} = (\text{energia, } 523250 \text{ J h}^{-1}\text{)} \times (\text{Tr, } 1,15E+07 \text{ seJ J}^{-1}\text{)} = 6,02E+12 \text{ seJ h}^{-1} \quad (5)$$

$$\text{Energia do indivíduo por hora trabalhada (J h}^{-1}\text{)} = [(3000 \text{ kcal dia}^{-1}) / (24 \text{ horas dia}^{-1})] \times (\text{conversão, } 4186 \text{ J/kcal}) = 523250 \text{ J h}^{-1} \text{ (ODUM, 1996)} \quad (6)$$

Para os cálculos referentes à água tratada proveniente da Sabesp, a Transformidade usada foi o valor de $1,19E+9$ seJ L⁻¹. A renovabilidade foi de 59,00%, pois no processo de tratamento são utilizados muitos produtos químicos, uma grande infraestrutura de alvenaria e maquinários.

2.1 O Cálculo dos Índices Emergéticos

Os indicadores do desempenho termodinâmico são calculados por meio de

relações algébricas da energia presente nas diferentes naturezas dos recursos (R, N ou F) que compõem o sistema estudado.

Nesse estudo os Índices Emergéticos calculados foram os seguintes: Rendimento emergético (EYR), Investimento emergético (EIR), Carga ambiental/Impacto ambiental (ELR), Índice de sustentabilidade (ESI) e Renovabilidade (%R). Os índices foram calculados em consonância com as formas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Indicadores emergéticos e suas fórmulas

Indicadores	Expressão	Significado
Rendimento emergético (EYR)	$EYR = \frac{Y}{F} = \frac{R + N + F}{F}$	Razão entre a energia total e os recursos da economia
Investimento emergético (EIR)	$EIR = \frac{F}{N + R}$	Razão entre os recursos da economia e dos recursos renováveis mais os não renováveis
Impacto ambiental (ELR)	$ELR = \frac{N + FN}{R + FR}$	Razão entre os recursos não-renováveis (locais e adquiridos) e dos recursos renováveis (locais e adquiridos)
Índice de sustentabilidade (ESI)	$ESI = \frac{EYR}{ELR}$	Razão entre o rendimento emergético e o impacto ambiental
Renovabilidade emergética (%R)	$\%R = \frac{(R + FR) * 100}{Y}$	Razão entre os recursos renováveis e a energia total

Fonte: Odum (1996) e Brown e Ulgiati (2004).

2.2 Estufa de bambu

A estufa (Figura 2) utilizada possui uma estrutura de três metros e meio de comprimento por três metros de largura, totalizando 10,5 m² de área, base de eucalipto roliço com 8 a 10 cm de diâmetro e 2,1 m de comprimento, travados

com pregos (24 x 60 mm); arcos confeccionados com ripas de bambu (*Bambusa tuldoides*) e intertravados com o mesmo material cruzando os arcos; filme plástico de polietileno com espessura de 150 microns e dimensões de 8 x 4 m; tela de sombreamento com trama que filtra 50% da radiação solar. A

fixação do bambu no eucalipto foi feita com parafusos (4,0 x 40 mm) e as amarrações com arame galvanizado número 20 (0,89 mm). Tal modelo foi desenvolvido por um artesão do município, Carlos Lira, formado por materiais facilmente encontrados na região (bambu coletado e demais materiais adquiridos no comércio), suas dimensões podem ser adaptadas para diferentes contextos, a largura pode variar de 3 a 4 m, devido às características

morfológicas da espécie de bambu utilizada. O método construtivo é simples, nesse caso a construção foi executada por uma única pessoa. O método construtivo vem sendo difundido no município nos últimos anos por meio de cursos e oficinas. Em novembro de 2019, em um desses cursos com 12 horas de carga horária, o autor aprendeu a técnica construtiva dessa estufa.

Figura 2. Construção da estufa de bambu.



Fonte: elaborada pelos autores.

Bambusa tuldoides, popularmente chamado de bambu comum, é amplamente cultivada em clima subtropical, pode atingir um tamanho de 15 m de altura, comprimento útil de 10 m, interno de 35 a 45 cm e diâmetro do colmo em média 6 cm espessura de 0,7 a 1,5 cm. Possui resistência média a carunchos. Utilizado em construções leves, cercas, para tutoramento de algumas culturas agrícolas,

artesanatos, instrumentos musicais (SILVA; LIMA; OLIVEIRA, 2011).

Para garantir maior durabilidade no emprego do bambu em construções permanentes, é essencial que haja tratamento de seu colmo pela introdução de substâncias preservativas em sua estrutura celular (AZZINI; BERALDO, 2001).

O bambu foi tratado na mesma propriedade em que foi construído, com a técnica de substituição de seiva, em barril contendo uma solução com 100 L de água, 900g de dicromato de potássio ou de sódio, 850 g de sulfato de cobre, 620 g de ácido bórico. Para que o processo ocorresse de forma mais eficiente, as varas de bambu foram colocadas num intervalo de tempo de até 6 horas após a coleta, além de permanecerem por 3 semanas na posição de crescimento natural. Na quarta semana, houve a inversão da orientação das varas (nesse momento, as pontas foram colocadas em contato com a solução). Antes do uso, as varas permaneceram por 30 dias secando. Esse método foi realizado de acordo com as instruções do artesão autor desse modelo de estufa; o processo de substituição de seiva ou transporte radial é bem difundido no tratamento para preservação em madeiras roliças (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004). Essa técnica de substituição é recomendada para que se obtenha um bom nível de resistência do bambu (TIBURTINO *et al.*, 2016).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise emergética do tratamento do bambu

Antes de iniciar a construção da estufa, foi realizado o tratamento do bambu coletado com o objetivo de aumentar a vida útil do material. Como o tratamento ocorreu totalmente em local sombreado a radiação solar foi considerada nula.

A Bombona Plástica de 200 litros onde as varas de bambu foram acomodadas para o tratamento, tem uma massa de 8,40 kg e é feita de polietileno de alta densidade (PEAD). Esse material tem uma vida útil estimada em 50 anos e uma densidade de 0,96 g cm⁻³.

A evaporação da água presente na solução foi considerada nula por ter sido adicionada uma camada de óleo de motor sobre a solução para impedir esse processo.

A transpiração das varas de bambu é baseada na redução de massa que a espécie tem entre o material úmido e seco. A massa do fuste úmido da espécie *B. tuldooides*, recém-colhido, foi de 126,8 kg para 67,7 kg após tratamento e secagem. Uma redução de massa de 53,39%. Logo, a quantidade de água transpirada ao longo do processo foi de 59,10 kg.

Foram coletadas e tratadas 20 varas com 6,45 metros de *B. tuldooides*, totalizando 129 metros. Os fluxos emergéticos desse processo estão apresentados na Tabela 2. A energia total obtida foi de 2,36E+14 seJ e a Energia por metro linear de bambu tratado é de 1,83E+12 seJ m⁻¹; considerando-se a vida útil do bambu tratado de 6 anos, a energia por metro linear a cada ano é de 3,05E+11 seJ m⁻¹ ano⁻¹. Por se tratar de uma touceira não manejada com mais de 10 anos de vida, a renovabilidade (%R) do bambu *in natura* foi considerada de 100%; após o tratamento, este índice passou a ser de 30,77% e a energia total do material aumentou 4,27 vezes (Tabela 3).

Equações relacionadas aos cálculos da energia do bambu tratado:

$$\text{Energia por metro linear de bambu tratado (seJ m}^{-1}\text{)} = (\text{energia total, } 2,36\text{E}+14 \text{ seJ}) \div (\text{metros de bambu tratados, } 129 \text{ m}) = 1,83\text{E}+12 \text{ seJ m}^{-1} \quad (7)$$

$$\text{Energia por metro linear de bambu tratado a cada ano (seJ m}^{-1} \text{ ano}^{-1}\text{)} = (\text{energia total, } 2,36\text{E}+14 \text{ seJ}) \div (\text{metros de bambu tratados, } 129 \text{ m}) \div (\text{vida útil, } 6 \text{ anos}) = 3,05\text{E}+11 \text{ seJ m}^{-1} \text{ ano}^{-1} \quad (8)$$

$$\%R: \text{Renovabilidade do bambu tratado (\%)} = [(R, 7,25\text{E}+13 \text{ seJ}) + (FN, 7,02\text{E}+10 \text{ seJ})] \times 100 \div (2,36\text{E}+14 \text{ seJ}) = 30,77\% \quad (9)$$

$$\text{Energia do bambu tratado em relação ao bambu não tratado} = (2,36\text{E}+14 \text{ seJ}) \div (5,53\text{E}+13 \text{ seJ}) = 4,27 \quad (10)$$

Tabela 2. Fluxos emergéticos envolvidos no tratamento do bambu (fluxos em 6 anos)

Nº	Item	%R	Valor	Un	UEV	Fluxo de energia	Ref. (UEV)	%
Recursos renováveis locais (R)								
1	Vento	100,00	2,44E+07	J	1,50E+03	3,66E+10	4	0,02
2	Transpiração	100,00	2,80E+05	J	4,81E+04	1,35E+10	4	0,01
3	Bambu	100,00	1,28E+09	J	4,32E+04	5,53E+13	4	23,45
4	Mão de obra (50,00%)	50,00	2,85E+00	h	6,02E+12	1,71E+13	1	7,27
Recurso não renovável local (N)								
5	Mão de obra (50,00%)	50,00	2,85E+00	h	6,02E+12	1,71E+13	1	7,27
Recursos da economia renováveis (FR)								
6	Água tratada (59,00%)	59,00	5,90E+01	L	1,19E+09	7,02E+10		0,03
Recursos da economia não renováveis (FN)								
7	Água tratada (41,00%)	59,00	4,10E+01	L	1,19E+09	4,88E+10		0,02
8	Bombona PEAD	0,00	1,28E+06	J	2,72E+05	3,48E+11		0,15
9	Gasolina	0,00	1,24E+08	J	1,94E+05	2,41E+13	2	10,21
10	Óleo de motor	0,00	2,00E-01	L	2,49E+12	4,98E+11	4	0,21
11	Sulfato de cobre	0,00	8,50E+02	g	8,64E+10	7,34E+13		31,15
12	Ácido bórico	0,00	6,20E+02	g	3,80E+08	2,36E+11	3	0,10
13	Dicromato de sódio	0,00	3,76E+01	R\$	1,26E+12	4,74E+13		20,11
	Total (R)					7,25E+13		30,74
	Total (N)					1,71E+13		7,27
	Total (F)					1,46E+14		61,98
	Total (FR)					7,02E+10		0,03
	Total (FN)					1,46E+14		61,95
Energia Total (Y)		30,77	1,29E+02	m	1,83E+12	2,36E+14	5	
Energia Total por ano (Y/ano)		30,77	1,29E+02	m	3,05E+11	3,93E+13	5	

Fonte: ¹Bonilla et al. (2010), ²Brown; Protano.; Ulgiati, (2011), ³Cuadra e Rydberg (2000), ⁴Odum (1996), ⁵calculado neste estudo, e, elaborada pelos autores.

Tabela 3. Índices emergéticos envolvidos no tratamento do bambu (fluxos em 6 anos)

Índices emergéticos	Valor	Interpretação do valor do índice baseada em Brown e Ulgiati (2004)
EYR	1,61	(1<EYR<2) Contribuição pequena para o desenvolvimento econômico.
EIR	1,63	Quanto menor o EIR, maior a competitividade do sistema.
ELR	2,25	(2<ELR<3) Sistema de produção com baixa carga (impacto) ambiental.
ESI	0,72	(ESI<1) O sistema analisado não é sustentável.
%R	30,77	Quanto maior o %R, maior a renovabilidade do sistema analisado.

UEV: Valor Unitário de Emergia; EYR: Rendimento emergético; EIR: Investimento emergético; ELR: Impacto ambiental; ESI: Índice de sustentabilidade; %R: Renovabilidade emergética.

Fonte: Brown e Ulgiati (2004), e, elaborada pelos autores.

O Rendimento emergético (EYR) foi de 1,61, valores entre (1<EYR<2) indicam que a contribuição é pequena para o desenvolvimento da economia; o Investimento emergético (EIR) foi 1,63, esse índice é adimensional e indica que quanto menor o EIR, maior será a competitividade; o Impacto ambiental (ELR), com valor de 2,25 é considerado um sistema com produção com baixa carga (impacto) ambiental; o Índice de sustentabilidade (ESI) foi de 0,72, apontando que o sistema não é sustentável, isso se deu porque no tratamento do bambu foi utilizado sulfato de cobre e dicromato de sódio (componentes com maiores valores emergéticos do processo, correspondendo juntos a 51,26% da emergia total) que são recursos da economia não renováveis.

3.2 Análise emergética do tratamento do eucalipto

Com relação ao eucalipto tratado, não foram encontrados estudos emergéticos com esse material, então, utilizou-se como base o estudo da emergia em cultivo intensivo de eucalipto no estado de São Paulo (ROMANELLI *et al.*, 2008) que mostrou uma transformidade de $9,50E+03 \text{ seJ J}^{-1}$ e uma renovabilidade de 58,00%, e o tratamento de substituição de seiva semelhante ao empregado no bambu, que é um método apropriado para

preservação de madeiras roliças (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

Para determinar a perda de água por transpiração ao longo do tratamento, baseou-se em MONTEIRO *et al.* (2021), que indica que a redução de peso do eucalipto é de 15 a 20% pela secagem, consideramos 18% para este estudo, logo 157,2 kg de eucalipto tratado perderam 34,50 litros de água por transpiração ao longo do processo.

Os fluxos emergéticos desse processo de tratamento do eucalipto estão apresentados na Tabela 4. A emergia total contida em 157,2 kg de eucalipto tratado foi de $2,10E+14 \text{ seJ}$; considerando-se a vida útil do eucalipto tratado de 12 anos, temos uma transformidade de $5,69E+03 \text{ seJ J}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Após o tratamento, o eucalipto que possuía inicialmente uma renovabilidade (%R) de 58% passou a ter 16,29% desse índice, o que representa uma redução de 3,56 vezes (Tabela 5). Assim como ocorreu com o bambu tratado, essa redução se deve principalmente a grande contribuição emergética que os produtos químicos utilizados como agentes de preservação e classificados como FN tiveram para o processo, sulfato de cobre com 35,04% e o dicromato de sódio com 22,62%. O índice de Impacto ambiental (ELR) teve um valor de 5,14 é considerado um sistema com produção com moderada carga (impacto) ambiental; o Índice de sustentabilidade (ESI) foi de 0,23, apontando que o sistema não é sustentável.

Tabela 4. Fluxos emergéticos envolvidos no tratamento do eucalipto (fluxos em 12 anos)

Nº	Item	%R	Valor	Un	UEV	Fluxo de emergia	Ref. (UEV)	%
Recursos renováveis locais (R)								
1	Vento	100,00	1,86E+04	J	1,50E+03	2,79E+07	⁴	0,00
2	Transpiração	100,00	1,64E+05	J	4,81E+04	7,89E+09	⁴	0,00
3	Mão de obra (50,00%)	50,00	2,85E+00	h	6,02E+12	1,71E+13	¹	8,18
Recurso não renovável local (N)								
4	Mão de obra (50,00%)	50,00	2,85E+00	h	6,02E+12	1,71E+13	¹	8,18
Recursos da economia renováveis (FR)								
5	Eucalipto (58,00%)	58,00	1,78E+09	J	9,50E+03	1,69E+13	⁵	8,07
6	Água tratada (59,00%)	59,00	5,90E+01	L	1,19E+09	7,02E+10		0,03
Recursos da economia não renováveis (FN)								
7	Eucalipto (42,00%)	58,00	1,29E+09	J	9,50E+03	1,22E+13	⁵	5,84
8	Água tratada (41,00%)	59,00	4,10E+01	L	1,19E+09	4,88E+10		0,02
9	Bombona PEAD	00,00	1,28E+06	J	2,72E+05	3,48E+11		0,17
10	Gasolina	00,00	1,24E+08	J	1,94E+05	2,41E+13	²	11,48
11	Óleo de motor	00,00	2,00E-01	L	2,49E+12	4,98E+11	⁴	0,24
12	Sulfato de cobre	00,00	8,50E+02	g	8,64E+10	7,34E+13		35,04
13	Ácido bórico	00,00	6,20E+02	g	3,80E+08	2,36E+11	³	0,11
14	Dicromato de sódio	00,00	3,76E+01	R\$	1,26E+12	4,74E+13		22,62
Total (R)						1,72E+13		8,19
Total (N)						1,71E+13		8,18
Total (F)						1,75E+14		83,63
Total (FR)						1,70E+13		8,10
Total (FN)						1,58E+14		75,53
Emergia (Y)	Total	16,29	3,07E+09	J	6,83E+04	2,10E+14	⁶	
Emergia por ano (Y/ano)	Total	16,29	3,07E+09	J	5,69E+03	1,75E+13	⁶	

Fonte: ¹Bonilla et al. (2010), ²Brown et al. (2011), ³Cuadra e Rydberg (2000), ⁴Odum (1996), ⁵Romanelli et al. (2008), ⁶calculado neste estudo, e, elaborada pelos autores.

Tabela 5. Índices emergéticos envolvidos no tratamento do eucalipto (fluxos em 12 anos)

Índices emergéticos	Valor	Interpretação do valor do índice baseada em Brown e Ulgiati (2004)
EYR	1,20	(1<EYR<2) Contribuição pequena para o desenvolvimento econômico.
EIR	5,11	Quanto menor o EIR, maior a competitividade do sistema.
ELR	5,14	(3<ELR<10) Sistema de produção com carga (impacto) ambiental moderada.
ESI	0,23	(ESI<1) O sistema analisado não é sustentável.
%R	6,29	Quanto maior o %R, maior a renovabilidade do sistema analisado.

UEV: Valor Unitário de Emergia; EYR: Rendimento emergético; EIR: Investimento emergético; ELR: Impacto ambiental; ESI: Índice de sustentabilidade; %R: Renovabilidade emergética.

Fonte: Brown e Ulgiati (2004), e, elaborada pelos autores.

3.3 Análise emergética da estufa (construção e manutenção)

Após obtenção da emergia desses elementos fundamentais para a construção da estufa (eucalipto e bambu tratados), foram contabilizados os principais fluxos de energia e materiais envolvidos na fabricação e manutenção dessa estufa.

Para elaboração dessas tabelas de cálculo emergético (Tabela 6 e 7) foi considerado a vida útil de 12 anos para a estufa, pois este tempo representa a durabilidade estimada do item mais durável empregado com construção, que é a base de toda a estrutura, o eucalipto tratado. A análise resultou na emergia total de $1,04E+14$ seJ m^{-2} , o que corresponde a emergia anual para construção e manutenção da

estufa de $8,68E+12$ seJ m^{-2} ano^{-1} e renovabilidade %R de 35,48. Ao comparar com a emergia de $3,07E+12$ seJ m^{-2} ano^{-1} e %R de 7,98% encontrada por Asgharipour *et al.* (2020) em estufas de grande porte (tamanho médio de 1685 m^2) construídas com arcos metálicos e vida útil estimada em 40 anos para produção de hortaliças em Jiroft no Irã, observa-se que uma é 2,83 vezes maior que a outra. Já a %R da estufa de bambu é 4,45 vezes maior. O índice de impacto ambiental também chama atenção por ser 7,13 vezes maior na estufa metálica (ELR = 9,77). Já o Investimento emergético é o mais discrepante, sendo 282421,58 vezes maior na estufa metálica (ELR = 196488,34) por se tratar de uma estufa na qual 99,99% da emergia envolvida em sua construção ser proveniente de recursos da economia (F).

Tabela 6. Fluxos emergéticos na construção e manutenção da estufa de bambu (fluxos em 12 anos)

Nº	Item	%R	Valor	Un	UEV	Fluxo de energia	Ref. (UEV)	%
Recursos renováveis locais (R)								
1	Radiação solar	100,0	8,07E+08	J	1,00E+00	8,07E+08		0,00
2	Bambu tratado (30,74%) (x2)	30,76	5,16E+01	m	1,83E+12	9,45E+13	⁷	8,65
3	Eucalipto tratado (8,19%)	16,29	2,51E+08	J	6,83E+04	1,72E+13	⁷	1,57
4	Mão de obra (50,00%)	50,00	4,10E+01	h	6,02E+12	2,47E+14	²	22,57
Recursos não renováveis locais (N)								
5	Bambu tratado (7,28%) (x2)	30,76	1,22E+01	m	1,83E+12	2,24E+13	⁷	2,05
6	Eucalipto tratado (8,78%)	16,29	2,51E+08	J	6,83E+04	1,72E+13	⁷	1,57
7	Mão de obra (50,00%)	50,00	4,10E+01	h	6,02E+12	2,47E+14	²	22,57
Recursos da economia renováveis (FR)								
8	Bambu tratado (0,03%) (x2)	30,76	5,04E-01	m	1,83E+12	9,22E+11	⁷	0,08
9	Eucalipto tratado (8,10%)	16,29	2,49E+08	J	6,83E+04	1,70E+13	⁷	1,55
10	Arame (79,90%) (x2)	79,90	6,20E+02	g	1,47E+10	9,11E+12	⁶	0,83
11	Parafuso de aço (97,90%)	79,90	1,76E+02	g	1,36E+10	2,39E+12	¹	0,22
Recursos da economia não renováveis (FN)								
12	Bambu tratado (61,96%) (x2)	30,76	1,04E+02	m	1,83E+12	1,91E+14	⁷	17,43
13	Eucalipto tratado (75,53%)	16,29	2,32E+09	J	6,83E+04	1,58E+14	⁷	14,49
14	Arame (20,10%) (x2)	79,90	1,56E+02	g	1,47E+10	2,29E+12	⁶	0,21
15	Parafuso de aço (20,10%)	79,90	4,42E+01	g	1,36E+10	6,01E+11	¹	0,06
16	Tela de sombreamento (x2)	0,00	2,78E+03	g	2,16E+09	6,00E+12	³	0,55
17	Pregos de aço carbono	0,00	8,80E+02	g	2,77E+09	2,44E+12		0,22
18	Filme plástico (x4)	0,00	1,28E+04	g	3,72E+08	4,76E+12	⁴	0,44
19	Gasolina (x4)	0,00	4,87E+08	J	1,11E+05	5,40E+13	⁵	4,94
Total (R)						3,58E+14		32,79
Total (N)						2,86E+14		26,19
Total (F)						4,48E+14		41,03
Total (FR)						2,94E+13		2,69
Total (FN)						4,19E+14		38,34
Emergia Total (Y)		35,48	1,05E+01	m ²	1,04E+14	1,09E+15	⁷	
Emergia Total por ano (Y/ano)		35,48	1,05E+01	m ²	8,68E+12	9,11E+13	⁷	

Fonte: ¹Asgharipour et al. (2020), ²Bonilla et al. (2010), ³Mu; Feng; Chu (2012), ⁴Odum (1996), ⁵Odum (2000), ⁶Pulselli; Simoncini; Marchettini 2009), ⁷calculado neste estudo, e, elaborada pelos autores.

Tabela 7. Índices emergéticos na construção e manutenção da estufa de bambu (fluxos em 12 anos)

Índices emergéticos	Valor	Interpretação do valor do índice baseada em Brown e Ulgiati (2004)
EYR	2,44	($2 < \text{EYR} < 5$) Contribuição moderada para o desenvolvimento econômico.
EIR	0,70	Quanto menor o EIR, maior a competitividade do sistema.
ELR	1,82	($\text{ELR} < 2$) Sistema de produção com baixíssima carga ambiental.
ESI	1,34	($1 < \text{ESI} < 5$) Sistema sustentável a médio prazo.
%R	35,48	Quanto maior o %R, maior a renovabilidade do sistema analisado.

UEV: Valor Unitário de Energia; EYR: Rendimento emergético; EIR: Investimento emergético; ELR: Impacto ambiental; ESI: Índice de sustentabilidade; %R: Renovabilidade emergética.

Fonte: Brown e Ulgiati (2004), e, elaborada pelos autores.

4 CONCLUSÕES

O número de estudo utilizando a energia como ferramenta para diagnóstico e comparação de sistemas produtivos vem aumentando. Essa ferramenta mostrou-se útil para análise e tomada de decisão em processos produtivos, possibilitando a escolha e a descoberta do potencial de materiais e processos que geram menor impacto ambiental e que sejam sustentáveis por longos prazos; além de pôr em xeque o uso do critério da vida útil para a escolha de materiais, ou seja, nem sempre um material com maior tempo de duração é a escolha mais adequada pela ótica da energia.

A mão de obra, de modo geral, teve um grande peso nos resultados das análises, devido a construção e manutenção da estrutura estudada ser artesanal. O contexto é um aspecto fundamental para esse tipo de análise, pois um único item, no caso a mão de obra, pode alterar significativamente os resultados dos índices emergéticos.

Ainda existem desafios no uso da energia para análise de sistemas pouco estudados, por exemplo, a disponibilidade para encontrar dados de UEVs na literatura e fazer as adaptações necessárias para as condições do sistema analisado. Muitas vezes, as referências e/ou ajustes feitos em outros estudos não estão claros, dificultando o estabelecimento das relações necessárias. As tabelas contendo os fluxos emergéticos presentes neste trabalho

(Tabelas 2, 4 e 6) expõem a importância dos itens do sistema analisado serem decompostos e terem suas reais porcentagens alocadas nas categorias de recursos a que pertencem (R, N, FR e FN). Dessa forma, os índices calculados através desses dados são mais fiéis a realidades do sistema. Tal prática, porém, muitas vezes não é utilizada nos trabalhos de análise emergética, sendo comum alocar o item na categoria de recurso a qual ele tem a maior porcentagem de energia, esse modo gera um erro nos resultados que vai escalando conforme é replicado.

Este estudo trouxe contribuições para esse universo das estruturas de cultivo protegido, porém são necessários mais estudos e maior padronização no método, visando o alcance da sustentabilidade e do desenvolvimento para diversos setores, independentemente da escala; pois a análise emergética tem potencial para trazer mais contribuições para a humanidade em busca por uma relação mais harmoniosa com o planeta.

5 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de Mestrado.

6 REFERÊNCIAS

ASGHARIPOUR, M. R.; AMIRI, Z.; CAMPBELL, D. E. Evaluation of the

sustainability of four greenhouse vegetable production ecosystems based on an analysis of energy and social characteristics. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 424, article 109021, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380020300934>. Acesso em: 3 fev. 2022.

AZZINI, A.; BERALDO, A. L. **Métodos práticos para utilização do bambu**. Campinas: UNICAMP, 2001.

BONILLA, S. H.; GUARNETTI, R. L.; ALMEIDA, C. M.; GIANNETTI, B. F. Sustainability assessment of a giant bamboo plantation in Brazil: exploring the influence of labour, time and space. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 18, n. 1, p. 83-91, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.07.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652609002224?via%3Dihub>. Acesso em: 3 fev. 2022.

BROWN, M. T.; PROTANO, G.; ULGIATI, S. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. **Ecological Modelling**. Amsterdam, v. 222, n. 3, p. 879-887, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380010006113?via%3Dihub>. Acesso em: 03 fev. 2022.

BROWN, M. T.; ULGIATI S. Emergy Analysis and Environmental Accounting. In: CLEVELAND, C. J. **Encyclopedia of Energy**. Oxford: Elsevier, 2004. p. 329-354.

BUCKLIN, R. A. **Physical Greenhouse Design Considerations** - Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook. Gainesville: University of Florida, 2020. v. 2, n. 6. DOI: <https://doi.org/10.32473/edis-cv254-1999>. Disponível em:

<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/CV254>. Acesso em: 03 fev. 2022.

CONAB. **Custos de Produção Agrícola: A metodologia da Conab**. Brasília, DF: Conab, 2010. 60 p. Disponível em: https://www.conab.gov.br/images/arquivos/informacoes_agricolas/metodologia_custo_producao.pdf. Acesso em: 03 fev. 2022.

CUADRA, M.; RYDBERG, T. Emergy evaluation of the environment and economy of Nicaragua. In: BIENNIAL EMERGY ANALYSIS RESEARCH CONFERENCE, 1., 2000, Gainesville. **Proceedings** [...]. Gainesville: University of Florida, 2000.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2009v14n1p1-11>. Disponível em: <http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3393>. Acesso em: 03 fev. 2022.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. **Processos práticos para preservar a madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. (Documentos, 96).

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. D.; TRUGILHO, P. F.; ANDRADE, H. B. Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de Eucalyptus e Corymbia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 493-505, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n115.07>. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr115/cap07.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2022.

MU, H.; FENG, X.; CHU, K. H. Calculation of emergy flows within complex chemical production systems. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 44, p. 88-93, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/>

abs/pii/S0925857412001358?via%3Dihub.
Acesso em: 03 fev. 2022.

ODUM, H. T. **Emergy Accounting**:
Environmental Engineering Sciences.
Gainesville: University of Florida, 2000.

ODUM, H. T. **Enviromenmental
Accounting**: Emergy and Environmental
decision making. New York: John Wiley &
Sons Inc., 1996.

ORTEGA, E. O conceito de emergia e a
certificação agroecológica com visão
sistêmica. *In: Agroecologia, princípios e
técnicas para uma agricultura orgânica
sustentável*. Brasília, DF: Embrapa, 2005. p.
257-271.

PULSELLI, R. M.; SIMONCINI, E.;
MARCHETTINI, N. Energy and emergy
based cost–benefit evaluation of building
envelopes relative to geographical location and
climate. **Building and Environment**, Oxford,
v. 44, n. 5, p. 920-928, 2009. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.009>
. Disponível em:
[https://www.sciencedirect.com/science/article/
abs/pii/S0360132308001571?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132308001571?via%3Dihub).
Acesso em: 03 fev. 2022.

ROMANELLI, T. L.; COHEN, M. J.;
MILAN, M.; BROWN, M. T. Emergy
synthesis of intensive eucalyptus cultivation in
São Paulo, Brazil. **Forest Science**, Bethesda,
v. 54, n. 2, p. 228-241, 2008. DOI:
<https://doi.org/10.1093/forestscience/54.2.228>.
Disponível em:
[https://academic.oup.com/forestscience/article/
54/2/228/4604109?login=false](https://academic.oup.com/forestscience/article/54/2/228/4604109?login=false). Acesso em: 03
fev. 2022.

SILVA, J. C. B. V.; LIMA, N.; OLIVEIRA,
V. **Estufa ecológica**. Uso do bambu em
bioconstruções. Curitiba: Centro Paranaense
de Referência em Agroecologia, 2011.

TIBURTINO, R. F.; PAES, J. B.;
VIDAURRE, G. B.; ARANTES, M. D. C.;
ROSA, R. A. Influência do diafragma no
tratamento preservativo de duas espécies de

bambu por substituição de seiva. **Ciência
Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 925-938,
2016. DOI:
<https://doi.org/10.5902/1980509824221>.
Disponível em:
[https://www.scielo.br/j/cflo/a/63mwnbF5XGh
MVvPKFFvbzmz/?lang=pt](https://www.scielo.br/j/cflo/a/63mwnbF5XGhMVvPKFFvbzmz/?lang=pt). Acesso em: 03
fev. 2022.