

REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ PELA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS A PARTIR DE ÓLEO DE DENDÊ NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Henrique Luis Godinho Cassol^{1*}, Lara Clímaco de Melo², Fernanda da Silva Mendes³, Rogério Fonseca⁴, Carlos Roberto Sanquetta⁵

^{1*}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil – hlcassol@hotmail.com

²AgroParisTech – LERFOB, Nancy, Lorraine, França - laracmelo@gmail.com

³Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, Paraná, Brasil - mendes.fsm@gmail.com

⁴Universidade Federal do Amazonas, Campus Universitário Coroado I, Manaus, Amazonas, Brasil - rogeriofonseca@ufam.edu.br

⁵Universidade Federal do Paraná, Departamento de Ciências Florestais, Curitiba, Paraná, Brasil - carlos_sanquetta@hotmail.com

Recebido para publicação: 25/05/2015 – Aceito para publicação: 13/11/2015

Resumo

O estudo pretende estimar a redução de CO₂ proporcionada pela produção de biocombustíveis a partir do óleo de dendê nas áreas aptas ao cultivo, segundo o ZAE-Dendê da Amazônia Brasileira. Essas estimativas, ainda escassas na literatura, são parte das diretrizes governamentais frente às mudanças climáticas. Tais diretrizes envolvem a mensuração de dois reservatórios de carbono potenciais: i) a fixação de CO₂ atmosférico proveniente do acúmulo na biomassa nos plantios; e ii) a redução de emissões de CO₂ oriundas da substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis (menos poluentes), gerados a partir de óleo de dendê. Os resultados demonstram que, ao longo do período de cultivo, 151,85 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ podem ser estocados na biomassa acima do solo. Em um cenário de aproveitamento potencial para a produção de óleo de palma de 35 milhões de hectares de áreas desmatadas da Amazônia brasileira, 5,3 bilhões Mg.CO₂eq poderiam ser absorvidas com o plantio. Entretanto, aproximadamente 90% do CO₂ absorvido retorna à atmosfera durante o processo de produção, devido à baixa tecnologia aplicada, tornando imprescindível o reaproveitamento dos resíduos da produção para aumentar a eficiência da redução de CO₂.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Estoque de carbono; Palmeiras; Alometria.

Abstract

Decreasing CO₂ emissions by biofuels production from palm oil in the Brazilian Amazon. The study aims to estimate the reduction of CO₂ provided by the production of biofuels from palm oil in suitable areas, according to the “land use plan-Palm Oil” of the Brazilian Amazon. These estimates, still lacking in the literature, are part of the government guidelines to climate change. Such guidelines involve the measurement of two potential carbon pools: i) the fixation of atmospheric CO₂ from the accumulation of biomass through croplands and; ii) the reduction of CO₂ emissions arising from the replacement of fossil fuels by biofuels (less polluting), generated from palm oil. The results show that over the cultivation period, 151.85 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ can be stocked in above-ground biomass. In 35 million hectares scenario of potential use for the production of palm oil in deforested areas of Brazilian Amazon 5.3 billion Mg.CO₂eq could be absorbed with the plantation. However, approximately 90% of the CO₂ absorbed returns to the atmosphere during the production process due to low technology applied, making essential the reuse of waste production to increase the efficiency of CO₂ reduction.

Keywords: Climate change; Carbon sink; Palm Tree; Allometry.

INTRODUÇÃO

A bioenergia é derivada da conversão de biomassa em combustível sólido ou do processamento de líquidos e gases oriundos de fontes renováveis. Atualmente, a bioenergia corresponde a 10% da energia primária mundial (RODRIGUES *et al.*, 2014) e é uma das principais fontes de energia de alguns países, como Brasil, China e Índia (FAO, 2007). Segundo a Agência Internacional de Energia, a demanda mundial atual de bioenergia é da ordem de 2,9% ao ano, mas poderá alcançar 24% até o ano de 2050 (IEA, 2013). Por isso, diversos países têm desenvolvido tecnologias alternativas ao uso de combustíveis fósseis, a exemplo do Brasil e dos EUA, que correspondem, juntos, a 80% da produção de biocombustíveis (RODRIGUES *et al.*, 2014).

No Brasil, o bioetanol e o biodiesel são os dois principais biocombustíveis produzidos, gerados exclusivamente a partir de processamento de cana e de óleo derivado de soja, respectivamente (ANP, 2015). A

dependência da cadeia produtiva de soja para produção de biodiesel permaneceu inalterada até 2005, quando foi lançado o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), fomentando a produção de biodiesel proveniente de outras fontes oleaginosas.

Um dos objetivos desse programa é estabelecer a obrigatoriedade da adição de 5% de biodiesel ao óleo diesel, criando uma demanda de mais de 2,4 bilhões de litros anuais de biocombustíveis, segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2015). Posteriormente, em 2010, foi lançado o Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma no Brasil, que conta com investimento de R\$ 60 milhões e visa ao suprimento da demanda brasileira por biocombustíveis, justamente com a criação de um zoneamento de aptidão para a dendeicultura na Amazônia brasileira (MAPA, 2010).

Segundo esse Zoneamento Agroecológico (ZAE-Dendê), o potencial de produção de óleo de dendê no Brasil é de cerca de 30 milhões de hectares (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA), 2010). As áreas consideradas aptas à dendeicultura correspondem apenas aquelas já degradadas, que, além de não serem produtivas, possuem baixa assimilação de carbono atmosférico por área (SOUZA *et al.*, 2010).

Sendo assim, a dendeicultura no Brasil tem potencial para desempenhar um papel importante frente às mudanças climáticas globais, pois contribui para a absorção de CO₂ durante o crescimento da cultura, por ser uma espécie perene de longa vida, ao mesmo tempo em que contribui com a redução de emissões de CO₂, pela substituição do uso de combustíveis fósseis por biocombustíveis (AHOLOUKPÈ *et al.*, 2013; RODRIGUES *et al.*, 2014).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial da dendeicultura para a redução de emissões de CO₂ em decorrência da substituição do uso de óleo combustível por biocombustível nas áreas desmatadas da Amazônia Legal previstas pelo ZAE-Dendê.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o potencial de redução de emissões de CO₂, foram empregadas duas metodologias de análise: a primeira envolve a análise da fixação de CO₂ atmosférico proveniente do acúmulo na biomassa dos plantios; a segunda refere-se à análise da redução de emissões de CO₂ oriundas da substituição de combustíveis fósseis para biocombustíveis (menos poluentes), gerados a partir de óleo de dendê.

No primeiro caso, o potencial de fixação de CO₂ nos plantios é calculado pelo produto da área potencial de cultivo pelo valor médio de carbono estocado nos plantios por hectare. A área de cultivo potencial foi obtida do ZAE-Dendê, enquanto o valor médio de carbono estocado por hectare foi obtido a partir da soma dos valores individuais por planta.

No segundo caso, a redução de emissões de CO₂ pela substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis pode ser obtida pelo produto da produção média de óleo de dendê pelo potencial de produção. A produção média de óleo de dendê por hectare foi obtida da literatura, enquanto a área potencial de cultivo corresponde à do ZAE-Dendê.

O potencial de redução de emissões de CO₂ pela dendeicultura, portanto, envolve a soma das duas metodologias e será dado em megagramas (Mg) de dióxido de carbono equivalente (Mg.CO₂eq). Foram desconsideradas da análise outras fontes potenciais de emissões, como aquelas provenientes da decomposição de biomassa e as decorrentes do uso de combustíveis durante os processos de cultivo e de processamento do óleo na indústria, por serem de difícil mensuração.

Potencial de fixação de CO₂ nos plantios de dendê

Estimativa de carbono nos plantios por hectare

Os valores médios de carbono por hectare foram calculados a partir da seleção de equações de biomassa seca e posterior conversão da biomassa em carbono orgânico (C). O ajuste das equações alométricas de biomassa seca foi realizado em 41 indivíduos com idades entre 3 e 36 anos, localizados em três fazendas produtivas em Ilhéus/BA. O critério de seleção dos indivíduos foi a sua representatividade no povoamento, que, por sua vez, está relacionada à altura, à idade e às características fitossanitárias. Durante o inventário foram coletadas as seguintes variáveis dendrométricas: diâmetro a 50 cm (D), diâmetro de copa (Dc), altura total (Ht) e altura do estipe (He).

A biomassa arbórea acima e abaixo do solo foi quantificada pela pesagem dos indivíduos pelo método da simples separação (SANQUETTA *et al.*, 2004). Cada indivíduo teve seu peso verde determinado por compartimento (folhagem, estipe e raízes) em campo através de um dinamômetro de precisão de 50 g. Em seguida, retiraram-se amostras de cada compartimento para secagem em estufa até atingir peso constante, com posterior determinação da biomassa seca (Bs). O teor de carbono médio utilizado para a Bs foi de 43%, conforme proposto por Silva *et al.* (2012).

Nove modelos matemáticos obtidos da literatura foram testados para realizar o ajuste das equações alométricas de biomassa. Esses modelos estão descritos na tabela 1, juntamente com outros três modelos propostos. Para a seleção do melhor modelo, as estatísticas utilizadas foram o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), o erro padrão relativo ($Sy_x\%$) e a análise gráfica dos resíduos. O teste de White foi realizado para testar a hipótese de homocedasticidade dos resíduos (WHITE, 1980). Nos modelos logarítmicos, as equações foram corrigidas mediante o coeficiente de ajuste logarítmico de Meyer.

De posse das equações alométricas ajustadas, foi estimado o valor médio individual de Bs por idade. O estoque médio de carbono por hectare foi obtido pelo produto do carbono estocado em uma árvore individual média aos 25 anos (período econômico do cultivo) pelo número médio de indivíduos por hectare ($N = 143 \text{ ind. ha}^{-1}$) (MÜLLER, 1980). O potencial de fixação de CO_2 por hectare foi calculado a partir da conversão de C orgânico para CO_2eq mediante a multiplicação por 3,667 (equivalência molecular).

Tabela 1. Modelos matemáticos empregados na estimativa de biomassa seca do dendê.

Table 1. Mathematical models employed in the estimation of palm oil dry biomass.

| Modelos matemáticos | Referência |
|---|--------------------------------------|
| (1) $Bs = \beta_0 + \beta_1 * Ht$ | Proposto |
| (2) $Bs = \beta_0 + \beta_1 * D + \beta_2 * Ht$ | Ratuchne (2010) |
| (3) $Bs = \beta_0 + \beta_1 * Ht + \beta_2 * He$ | Proposto |
| (4) $\ln Bs = \beta_0 + \beta_1 * \ln I$ | Proposto |
| (5) $Bs = \beta_0 + \beta_1 * He$ | Goodman <i>et al.</i> (2013) |
| (6) $Bs = \beta_0 + \beta_1 * I + D + \beta_2 * Ht$ | Proposto |
| (7) $\ln Bs = \beta_0 + \beta_1 * \ln D$ | Adaptado de Caldeira (1998) |
| (8) $Bs = \beta_0 + \beta_1 * Dc^2 * Ht$ | Adaptado de Mello e Gonçalves (2008) |
| (9) $\ln Bs = \beta_0 + \beta_1 * \ln D^2 * He$ | Goodman <i>et al.</i> (2013) |

Ht = altura total, em m; D = diâmetro a 50 cm, em cm; I = idade, em anos; He = altura do estipe, em m; Dc = diâmetro médio de copa, em m; ln = logaritmo neperiano; Bs = biomassa seca, em kg (biomassatotal).

Estimativa da área cultivada potencial

A tabela 2 apresenta o resultado das áreas aptas ao cultivo do dendê, conforme as classes de aptidão nas áreas degradadas da Amazônia Legal (EMBRAPA, 2010). Conforme o ZAE-Dendê, o potencial de cultivo de dendê estende-se por cerca de 60 milhões de hectares somente nas áreas já desmatadas e degradadas da Amazônia Legal, divididos entre áreas de manejo B (29,6 mi ha), consideradas por uma aplicação média de capital e modesto uso de insumos e tecnologia, e C (29 mi ha), com alto aporte de insumos e tecnologia (EMBRAPA, 2010). As áreas marginais (M) e inaptas (I) foram desconsideradas do cálculo, devido à baixa viabilidade econômica da cultura nesses locais.

Tabela 2. Resumo das áreas das classes do Zoneamento Agroecológico da Palma de Óleo nas áreas desmatadas da Amazônia Legal (AML), com adoção dos níveis de manejo B e C.

Table 2. Summary of areas of classes of Zoning subsidizes of Palm Oil in deforested areas of the Legal Amazon Region (MLA) with the adoption of the levels of management B and C.

| Nível de Manejo B | | | Nível de Manejo C | | |
|------------------------------|-------------|----------|------------------------------|-------------|----------|
| Classe | Hectare | % da AML | Classe | Hectare | % da AML |
| Preferencial - P | 7.337.426 | 1,45% | Preferencial - P | 7.296.279 | 1,44% |
| Regular - R | 22.317.707 | 4,42% | Regular - R | 21.627.101 | 4,28% |
| Marginal - M | 2.020.879 | 0,40% | Marginal - M | 2.299.816 | 0,46% |
| Inapta - IN | 38.730.565 | 7,67% | Inapta - IN | 39.173.381 | 7,76% |
| Subtotal ⁽¹⁾ | 70.406.577 | 13,94% | Subtotal ⁽¹⁾ | 70.406.577 | 13,94% |
| Área Excluída ⁽²⁾ | 434.565.157 | 86,06% | Área Excluída ⁽²⁾ | 434.565.157 | 86,06% |
| Total - AML | 504.971.734 | 100,00% | Total - AML | 504.971.734 | 100,00% |

⁽¹⁾ Total da área do zoneamento, após os recortes: 704.066 km², aproximadamente 13,94% da Amazônia Legal. ⁽²⁾ Área de Proteção Ambiental, Terras Indígenas e Áreas Não Desmatadas (EMBRAPA, 2010).

Nota-se que a área potencial da dendeicultura, somando-se as áreas de manejo B e C, pode chegar a 11,59% da área da Amazônia Legal, fixada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Desse montante, excluem-se as restrições legais, como reserva legal e áreas de preservação permanente, bem como a

atual utilização das áreas desmatadas, sejam elas para pastagens ou áreas agrícolas. As reduções, conforme os próprios autores do ZAE-Dendê, giram em torno de 50 a 60% das áreas aptas (EMBRAPA, 2010). Portanto, a área de cultivo potencial considerada neste trabalho foi de 35 milhões de hectares.

Redução de emissão de CO₂ pela produção de biocombustíveis

O inventário das emissões de CO₂ evitadas pela produção de biocombustíveis foi determinado pela multiplicação da produção média de óleo por hectare pela área potencial de produção de biocombustível obtida com o ZAE-Dendê (EMBRAPA, 2010).

A produção média de óleo de palma brasileira por hectare é de 3,05 toneladas métricas de óleo por hectare por ano (OILWORLD, 2010; FAO, 2012). Os fatores de emissão de CO₂eq estão disponíveis pelo Programa Brasileiro GHG Protocol e representam 2,4991 kg de CO₂eq por litro de biodiesel consumido (FGV, 2013).

RESULTADOS

Biomassa seca nos plantios comerciais de dendê

A maior quantidade da Bs total encontra-se no estipe (61% do total), seguida pela biomassa das folhas, (27%) e raízes (12%) (Figura 1).

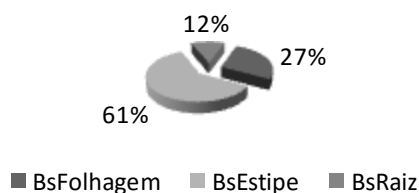


Figura 1. Biomassa seca por compartimento arbóreo do óleo de palma.
Figure 1. Dry biomass per tree compartment of palm oil.

A média de Bs individual foi de 476,10 kg, mas pode chegar a 771,99 kg, em indivíduos com mais de 30 anos. A Bs por hectare nos plantios comerciais variou de 7,37 Mg.ha⁻¹ aos 5 anos a 110 Mg.ha⁻¹ aos 36 anos (Figuras 2a e 2b). O crescimento do plantio, entretanto, não é constante. Observa-se, pela figura 2b, que o dendê apresenta rápido incremento (acúmulo de Bs) nos 10 anos iniciais, com incremento de mais de 10 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, com uma posterior queda de crescimento nos anos seguintes. O incremento médio anual em Bs, porém, situa-se em torno de 4 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹.

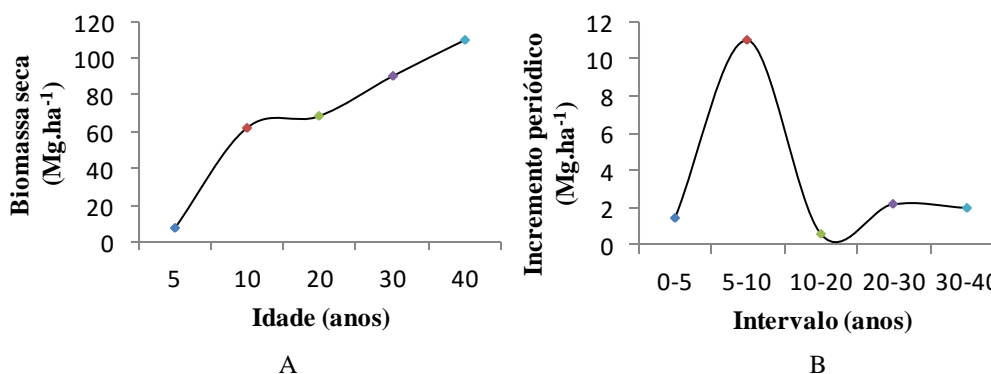


Figura 2. A) Biomassa seca arbórea média por idade de *E. guineensis*. B) Incremento periódico de biomassa seca de *E. guineensis*.

Figure 2. A) Average dry biomass by age of *E. guineensis*. B) Periodic increment of dry biomass of *E. guineensis*.

Ajuste das equações alométricas de biomassa seca

Na tabela 3 estão destacadas em negrito as equações com os melhores resultados estatísticos. A maioria das equações testadas apresenta coeficiente de determinação superior a $R^2 = 0,8$ e baixo erro padrão relativo da estimativa ($S_{yx}\% < 20\%$).

Tabela 3. Equações alométricas ajustadas para a biomassa seca de dendê, com destaque para as de melhor desempenho.

Table 3. Allometric equations adjusted for the dry biomass of palm oil, with an emphasis on the best performance.

| Equação alométrica | R ² aj | Syx% |
|--|-------------------|--------------|
| (1) Bs = -220,634 + 61,331 * Ht | 0,88 | 18,24 |
| (2) Bs = -310,419 + 1,4248 * D + 0,0001 * C + 50,02397 * Ht | 0,91 | 16,27 |
| (3) Bs = -136,97 + 44,0401 * Ht + 21,0607 * He | 0,88 | 18,13 |
| (4) LnBs = 2,3167 + 1,2871 * ln I | 0,77 | 17,05 |
| (5) Bs = 93,0215 + 71,45678 * He | 0,86 | 19,90 |
| (6) Bs = -287,69 + 3,5228 * I + 4,8230 * D + 40,556 * Ht | 0,91 | 16,30 |
| (7) LnBs = -4,7793 + 2,7657 * ln D | 0,19 | 17,80 |
| (8) Bs = 65,0639 + 0,2930 * Dc ² * Ht | 0,75 | 25,95 |
| (9) LnBs = 0,6446 + 0,5809 * ln D² * He | 0,89 | 2,68 |

A equação que apresentou o melhor resultado foi a proposta por Goodman *et al.* (2013), que considera o estipe um cilindro (D².He) e o seu incremento como sendo uma função não linear desse cilindro (Eq. (9), Tabela 3). Essa equação apresentou o mais baixo erro padrão relativo Syx% = 2,68% e alto coeficiente de determinação ajustado R² = 0,89. Além disso, esse modelo tem como variáveis independentes aquelas de fácil obtenção, como a altura do estipe e o diâmetro, ao contrário dos modelos 2 e 6 que, embora tenham tido melhor R², utilizam a altura total da palmeira ou a sua idade como preditoras, os quais apresentam maior incerteza na medição. Na figura 3 pode ser observada a dispersão dos resíduos para as equações em negrito descritas na tabela 3. Pode-se notar, entretanto, que os resíduos não estão bem distribuídos e que há uma tendência em todos os modelos de apresentar maiores erros ao estimar a Bs das palmeiras jovens, com até 300 kg.

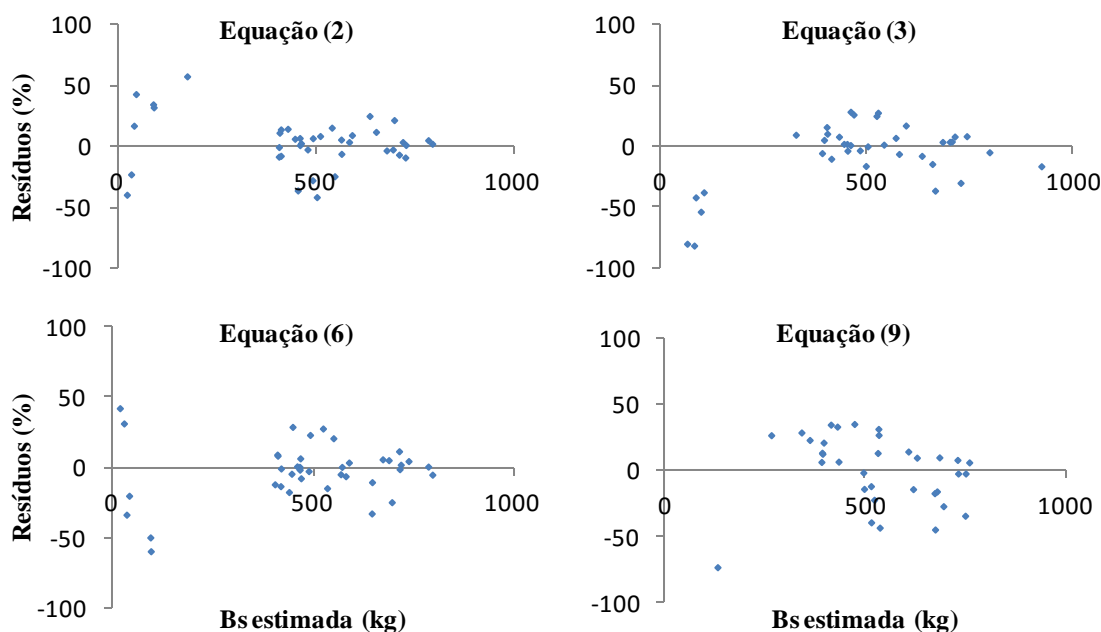


Figura 3. Análise residual das melhores equações ajustadas para estimativa da biomassa seca.

Figure 3. Residual analysis of the best adjusted equations to estimate the total dry biomass of palm oil.

Pelo teste de White (1980) de homocedasticidade, ficou comprovada a heterocedasticidade dos resíduos para todas as equações ($n.R^2 > \chi_c^2$; $\alpha = 0,05$). Esse resultado está em conformidade com a literatura, a qual descreve a natureza heterocedástica da variável biomassa (PARRESOL, 1999; CHAVE *et al.*, 2005), e torna-se mais evidente no presente trabalho, tendo em vista o número limitado de indivíduos amostrados.

De forma a contornar a natureza heterocedástica, procedeu-se à utilização de uma regressão ponderada (*weighted regression*) e ajuste de equações distintas para as palmeiras jovens e adultas, conforme proposto por Gehring *et al.* (2011). Porém, nenhuma das referidas técnicas foi eficaz em ajustar o comportamento dos dados. Sanquetta *et al.* (2015) afirmam que, particularmente para espécies nativas de regiões tropicais e subtropicais, a

biomassa de árvores individuais apresenta ampla variabilidade natural. O ajuste e avaliação de modelos alométricos não foi o objetivo central do presente estudo, haja vista a limitação do número de amostras para validar as equações. Mesmo assim, com amparo na literatura e desconsiderando-se peremptoriamente a heterocedasticidade dos resíduos, a equação (9) foi utilizada para estimar o valor médio de biomassa seca dos indivíduos de dendê.

Aplicando-se a equação ajustada para a biomassa seca (9) ($B_s = 0,6446 + 0,5809 \cdot \ln D^2 \cdot He$) aos dados (Tabela 3), a B_s individual calculada aos 25 anos foi de 673,48 kg. Sendo assim, em um plantio comercial de 143 ind.ha⁻¹, a biomassa média por hectare ao fim do ciclo é de 96,31 Mg.ha⁻¹, com fixação de 151,85 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ em média e incrementos anuais de até 1,8 Mg.CO₂eq.ha⁻¹.ano⁻¹.

Potencial de redução de CO₂ pela produção de biocombustível

Os valores estimados da produção atual e potencial de biocombustíveis, bem como o potencial de redução de CO₂ pela dendeicultura na Amazônia brasileira encontram-se na tabela 4. Se considerada apenas a área de cultivo atual de óleo de palma de 109.080 hectares (FAO, 2012) e a fixação média de 151,85 Mg.CO₂eq.ha⁻¹, cerca de 16 milhões de toneladas de CO₂eq são estocadas somente nos plantios. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2012), a produção de óleo de palma no Brasil é de 310 mil toneladas métricas ($\approx 352,27 \times 10^3$ litros de biocombustível), correspondendo a uma redução de emissão de 880 Mg.CO₂eq.

O potencial de redução de CO₂ pela produção de biocombustível na Amazônia brasileira, por outro lado, pode passar de 5,3 bilhões Mg.CO₂eq, considerando toda a área de cultivo potencial definida pelo ZAE-Dendê (EMBRAPA, 2010). A parcela de contribuição de redução de CO₂ pela substituição de combustíveis fósseis, contudo, é baixa, representando menos de 0,01% do total (Tabela 4).

Tabela 4. Redução de emissões de CO₂ atual e potencial com a dendeicultura.

Table 4. Current and potential reduction of CO₂ emissions with the palm oil culture.

| | Produção | | Redução de emissões (Mg.CO ₂ eq) | |
|----------------|------------|---------------|---|---------------|
| | Atual | Potencial | Atual | Potencial |
| Área cultivo | 109.080 ha | 35.000.000 ha | 16.563.798 | 5.314.750.000 |
| Biocombustível | 352.270 t | 121.306.818 t | 880 | 1.049.304 |
| Total | | | 16.566.480 | 5.315.799.304 |

DISCUSSÃO

A proporção de B_s no estipe representa 60% da B_s total. Conforme Syahrudin (2005), a proporção de B_s no estipe aumenta à medida que a planta envelhece. Em plantas com idade superiores a 20 anos, a biomassa do estipe pode alcançar de 59% a 63% do total (SYAHRUDIN, 2005; SILVA *et al.*, 2012). Aos 25 anos, aproximadamente, o ciclo produtivo da dendeicultura se encerra (a produção de óleo inicia-se a partir do terceiro ano), pois as plantas apresentam altura que as torna inviáveis economicamente, sendo refeito o plantio da cultura (RODRIGUES *et al.*, 2014).

As palmeiras pertencem ao grupo das plantas monocotiledôneas, o que implica dizer que o crescimento em altura nesse grupo seja superior ao crescimento em diâmetro (GOODMAN *et al.*, 2013). Por essa mesma razão, as monocotiledôneas apresentam baixa ou nenhuma relação entre o diâmetro e a altura se comparadas às espécies arbóreas dicotiledôneas (GOODMAN *et al.*, 2013).

As equações alométricas de B_s ajustadas para as palmeiras envolvem quase sempre a seleção das alturas como variáveis independentes (Tabela 1). Por isso, de acordo com Goodman *et al.* (2013), os modelos alométricos concebidos a estimar a B_s de plantas arbóreas dicotiledôneas tendem a superestimar a B_s quando aplicados às palmáceas.

Além disso, modelos lineares de crescimento e acúmulo de biomassa, como preconizado pelo Guia de Boas Práticas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2003) tendem a subestimar a biomassa das palmeiras em até 23% (SYAHRUDIN, 2005). Isso porque os modelos de crescimento e de acúmulo de biomassa de palmeiras são ainda escassos e, quando muito, cobrem apenas uma ou poucas espécies (THENKABAIL *et al.*, 2004; MOREL *et al.*, 2011; AHOLOUKPÈ *et al.*, 2013).

Modelos não lineares, como os logarítmicos, são citados na literatura por apresentar melhores resultados, porque as palmeiras apresentam rápido crescimento nos primeiros anos de vida. Após isso, o ritmo diminui e a biomassa atinge seu máximo valor (SYAHRUDIN, 2005; GOODMAN *et al.*, 2013).

O valor de B_s de 96,31 Mg.ha⁻¹, em média, estocado no fim do ciclo é semelhante ao descrito por Morel *et al.* (2011). Esses autores afirmam que a B_s do óleo de palma decresce rapidamente a partir dos 20 anos, por

consequência da abscisão das folhagens mais velhas na base do estipe, motivo pelo qual os valores máximos situam-se em torno de 100 Mg.ha⁻¹.

Em trabalho de mitigação potencial de emissões de CO₂ a partir da dendeicultura no estado do Pará, Silva *et al.* (2003) observaram estoque de CO₂ bem superior ao deste trabalho, que foi de 203,34 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ aos 25 anos, usando um fator de conversão de 0,4 de Bs para carbono orgânico. No entanto, esses autores empregaram um percentual de raízes de 47,6% da Bs total, valor superior aos 35% na média, para um conjunto de palmáceas (GOODMAN *et al.*, 2013) e bem superior aos 12% observados neste trabalho.

Germer e Sauerborn (2008) relataram que os valores fixados pela cultura em 25 anos são da ordem de 129,3 ± 40,3 Mg.CO₂eq.ha⁻¹, somando a biomassa acima e abaixo do solo, além da biomassa de sub-bosque, esta última desconsiderada nesta análise. Syahrudin (2005), por outro lado, observou valores superiores a 230 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ em Sumatra, na Indonésia, em plantios comerciais com mais de 20 anos, sendo que, desse total, 152 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ estavam retidas apenas no estipe.

Em termos comparativos, as 151,85 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ estocadas nos plantios comerciais de óleo de palma no Brasil se assemelham ao carbono estocado pelas florestas tropicais do sudeste asiático, conforme relatado por Saatchi *et al.* (2011). Porém, ao fim do ciclo, boa parte desse CO₂ retorna à atmosfera pela decomposição natural. Segundo Rodrigues *et al.* (2014), a prática de corte e replantio de novos cultivos de dendê tende a reenviar à atmosfera até 36% do que foi absorvido com o crescimento da cultura, devido à decomposição da biomassa, apesar do seu potencial de uso para reaproveitamento.

As emissões de CO₂eq durante o processo produtivo estão assim divididas: 48,1% na extração de óleo pela queima dos resíduos da biomassa; 47% na fase de cultivo pela decomposição da biomassa e uso de combustíveis fósseis na mecanização agrícola e transporte de matéria prima; 4,6% no processo de produção de fertilizantes; 0,3% na produção de biodiesel; e 0,1% com a geração e uso de energia elétrica (RODRIGUES *et al.*, 2014).

A cultura de dendê é altamente exportadora de nutrientes, sendo necessária a reposição em grandes quantidades de alguns elementos, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg), que são considerados fontes de emissão de GEE (RODRIGUES *et al.*, 2014). Segundo Botelho *et al.* (1998), desde a fase de viveiro até o fim de ciclo (25 anos), são necessários, em média, 68,93 kg de NPK e Mg 12:17:10:3 por planta, ou 9.857 kg.ha⁻¹ de fertilizantes, liberando aproximadamente 8,6 Mg.CO₂eq.ha⁻¹. Os resíduos gerados pelas usinas de óleo de palma, contudo, poderiam substituir aproximadamente 43% do potássio, 9% do fósforo, 85% do nitrogênio e 100% do magnésio requerido pela cultura (FERREIRA *et al.*, 1998).

Segundo Rodrigues *et al.* (2014), o balanço entre as emissões e reduções é levemente positivo, uma vez que a fixação de CO₂ sequestrado pelo crescimento das palmeiras propicia uma redução de emissões apenas 1,1 vezes maior do que a quantidade emitida no ciclo de 25 anos de cultivo. O saldo é negativo nos primeiros anos de ciclo, mas as emissões são compensadas principalmente pelo caráter perene da plantação (RODRIGUES *et al.*, 2014). Nesse escopo, das 5,3 bilhões de Mg.CO₂eq potencialmente reduzidas, aproximadamente 4,8 bilhões de Mg.CO₂eq seriam liberadas pelo processo produtivo.

Por enquanto, a tecnologia disponível pela cadeia produtiva do óleo de palma não propicia grandes reduções de emissões de CO₂, podendo até mesmo ser prejudicial, dependendo da superfície vegetal anteriormente coberta (GIBBS *et al.*, 2008). Ainda, Gibbs *et al.* (2008) reportam que o aumento da demanda de biocombustíveis pode ser pernicioso, na medida em que ocasiona um aumento nas emissões de CO₂ pela conversão de ecossistemas tropicais em plantios comerciais. Searchinger *et al.* (2008) são mais enfáticos ao destacarem que o cultivo de oleaginosas com o propósito de produção de biocombustíveis aumenta os impactos decorrentes do “vazamento”, ao deslocarem o sistema produtivo para as áreas sob proteção.

Assim, dependendo da cobertura vegetal substituída, o plantio comercial de oleaginosas pode liberar de 17 a 420 vezes mais CO₂ do que a redução ilusória proporcionada pela produção de biocombustíveis, em comparação com o uso de combustíveis fósseis (FARGIONE *et al.*, 2008). Mesmo que o Programa Brasileiro de Produção Sustentável de Óleo de Palma restrinja o plantio de palmeiras oleaginosas a áreas degradadas, a extensão amazônica pode inviabilizar sistemas eficazes de fiscalização.

Há que se considerar que, apesar do potencial de uso da biomassa do dendê como redução de emissões de CO₂, os tratos silviculturais tradicionais e a quantidade de nutrientes demandados por essa cultura são considerados fontes de emissão. Por isso, surge a necessidade de que ocorra um manejo sustentável de toda a cadeia produtiva de biocombustível, de forma a promover estratégias para a redução das fontes de emissões, tais como a utilização de resíduos da indústria para fertilização natural ou produção de biocombustíveis de segunda geração, seleção de melhores progênies que propiciem um aumento da produtividade do óleo e aporte de biomassa, entre outras.

É importante ressaltar os demais serviços proporcionados pela cultura do dendê, ponderando-se as vantagens e desvantagens na tomada de decisões, aproximando-se assim de uma estratégia de manejo mais

eficiente e precisa. Conforme Bastos *et al.* (2001) afirmam, o cultivo do dendezeiro é importante, para além da sua produção e fixação de carbono, na proteção dos solos contra erosão e como eficiente alternativa na ocupação de áreas desmatadas. Considerando o aspecto social, Becker (2010) analisa que a necessidade de intensiva mão de obra pode constituir um caminho para a estabilidade de trabalhadores, formando uma classe de produtores dentro da agricultura familiar, o que poderia instituir avanços no processo de reforma agrária. Ainda, segundo Becker (2010), as pesquisas avançadas com essa cultura sinalizam a aplicação de um sistema de cultivos intercalares entre o dendê e outras espécies de interesse econômico, contribuindo para a redução de doenças relacionadas ao estresse hídrico, como também para a conservação do solo.

CONCLUSÕES

- A porcentagem de biomassa seca total no dendezeiro está localizada no estipe (61%), seguido das folhas (27%) e raízes (12%). A média de biomassa individual foi de 476,10 kg.
- O modelo que apresentou o melhor ajuste considerou a biomassa um modelo não linear do estipe: $\ln(ps) = 0,6446 + 0,5809 \cdot \ln D^2 \cdot He$.
- A biomassa seca arbórea individual ao final de ciclo de cultivo de 25 anos foi calculada em 673,48 kg, em média. Por hectare, a biomassa estimada para o mesmo período foi de 96,31 Mg.ha⁻¹, com 151,85 Mg.CO₂eq.ha⁻¹ fixados na biomassa pelo plantio.
- Em um cenário de aproveitamento potencial para a produção de óleo de palma de 35 milhões de hectares, 5,3 bilhões Mg.CO₂eq poderiam ser absorvidas com o plantio.
- Do potencial de redução de emissões pela dendeicultura, cerca de 90% do total retorna à atmosfera pela decomposição da biomassa durante o replantio. Sendo assim, o reaproveitamento desse resíduo é imprescindível para que a produção de biocombustível a partir de óleo de palma torne-se sustentável e potencialmente mitigadora dos efeitos do CO₂ em face das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AHOLOUKPÈ, H.; DUBOS, B.; FLORI, A.; DELEPORTE, P.; AMADJI, G.; CHOTTE, J. L.; BLAVET, D. Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 122 - 129, 2013.

ANP. Boletim mensal de biodiesel. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis; Abril de 2015. 13 p. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 10 de maio de 2015.

BASTOS, T. X.; MÜLLER, A. A.; PACHECO, N. A.; SAMPAIO, S. M. N.; ASSAD, E. D.; MARQUES, A. F. S. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura do dendezeiro no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 564 - 570, 2001.

BECKER, B. K. Recuperação de áreas desflorestadas da Amazônia: será pertinente o cultivo da palma de óleo (Dendê)? **Confins**, n. 10, p. 2 - 17, 2010.

CALDEIRA, M. V. W. **Quantificação de biomassa e do conteúdo de nutrientes em diferentes procedências de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.)**. 1998, 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FOLSTER, H.; FROMALD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forest. **Oecologia**, n. 145, p. 87 - 89, 2005.

CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. **The oil palm**. 4. ed. Iowa: Wiley-Blackwell Science, 2003. 592 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Zoneamento Agroecológico, Produção e Manejo para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia**. Rio de Janeiro: Embrapa Sols, 2010. 216 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). Food and Agriculture Organization of the United Nations. A review of the current state of bioenergy development in g8 +5 countries. Disponível em: <<http://www.fao.org/newsroom/common/ecg/1000702/en/GBEPReport.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2015.

_____. Food and Agriculture Organization of the United Nations Faostat. Palm oil countries by commodity – Production (MT) Faostat. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, v. 319, p. 1235 - 1238, 2008.

FERREIRA, W. D. A.; BOTELHO, S. M.; VILAR, R. R. L. **Resíduos da agroindústria do dendê**: caracterização e equivalência em fertilizantes. Belém, PA: EMBRAPA, 1998. 22 p.

GEHRING, C.; ZELARA YÁN, M. L. C.; ALMEIDA, R. B.; MORAES, F. H. R. Allometry of the babassu palm growing on a slash-and-burn agroecosystem of the eastern periphery of Amazonia. **Acta Amazonica**, v. 41, n. 1, p. 127 - 134, 2011.

GERMER, J.; SAUERBORN, J. Estimation of the impact of oil palm plantation establishment on greenhouse gas balance. **Environment Development and Sustainability**, v. 10, p. 697 - 716, 2008.

GIBBS, H. K.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J. A.; HOLLOWAY, T.; MONFREDA, C.; RAMANKUTTY, N.; ZAKS, D. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. **Environmental Research Letters**, v. 3, p. 1 - 10, 2008.

GOODMAN, R. C.; PHILIPS, O. L.; TORRES, D. C.; FREITAS, L.; CORTESE, S. T.; MONTEAGUDO, A.; BAKER, T. R. Amazon palm biomass and allometry. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 994 - 1004, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World energy outlook*. 2013. International Energy Agency; 2013. *Technology roadmap: bioenergy for heat and power*. 2013. International Energy Agency; 2013. 68 p. Disponível em: <<http://www.iea.org/>>. Acesso em: 03 fev. 2014.

MAPA. Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

MELLO, S. L. M.; GOLÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, v. 32, n. 1, p. 101 - 111, 2008.

MOREL, A. C.; SAATCHI, S. S.; MALHI, Y.; BERRY, N. J.; BANIN, L.; BURSLEM, D.; NILUS, R.; ONG, R. C. Estimating aboveground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah, Malaysian Borneo using ALOS PALSAR data. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 1786 - 1798, 2011.

MÜLLER, A. A. **A cultura do dendê**. Belém-PA: Embrapa-CPATU, 1980. 25 p.

OIL WORLD ANNUAL, 2010. *The Independent Forecasting Service for Oilseeds, Oils and Meals*. ISTA Mielke GmbH, Hamburg, Germany. Disponível em: <<http://www.oilworld.biz/app.php>>. Acesso em: 03 fev. 2014.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, n. 4, p. 573 - 593, 1999.

RATUCHNE, L. C. **Equações alométricas para estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista**. 2010, 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2010.

RODRIGUES, T. O.; CALDEIRA-PIRES, A.; LUZ, S.; FRATE, C. A. GHG balance of crude palm oil for biodiesel production in the northern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 62, p. 516 - 521, 2014.

SAATCHI, S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E.; SALAS, W.; ZUTTA, B.; BUERMAN, W.; LEWIS, S.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 24, p. 9899 - 9904, 2011.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; BALBINOT, R.; ZILLIOTTO, M. A. B. Proposta metodológica para quantificação e monitoramento do carbono estocado em florestas plantadas. In: SANQUETTA, C. R.; ZILLIOTTO, M. A. (Org.). **Mercado de carbono: mercado e ciência**. Curitiba: Imprensa Universitária – UFPR, v. 1, p. 120 - 150, 2004.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; WOJCIECHOWSKI, J.; BEHLING, A.; PÉLLICO-NETTO, S.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Comparison of data mining and allometric model in estimation of tree biomass. **BMC Bioinformatics**, v. 16, n. 247, 2015.

SEARCHINGER, T.; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R. A.; DONG, F. X.; ELOBEID, A.; FABIOSA, J.;

FLORESTA, Curitiba, PR, v. 46, n. 1, p. 135 - 144, jan. / mar. 2016.

Cassol, H. L. G. *et al.*

ISSN eletrônico 1982-4688

DOI: 10.5380/rev.v46il.41516

TOKGOZ, S.; HAYES, D.; YU, T. H. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. **Science**, v. 319, p. 1238 - 1240, 2008.

SILVA, O. C. D.; STELLA, O.; VARKULYA, J. R. A. Potencial de mitigação de gases estufa pela indústria de óleo de palma visando a captação de recursos do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). Campinas. In: NIPE UNICAMP (Ed.). *Encontro de Energia no Meio Rural*, p. 1 - 8, 2003.

SILVA, P. H. B. M.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Quantificação de biomassa e carbono em plantios de dendê na região de Ilhéus – Bahia. Curitiba, 2012: Revista da XX Jornadas de Jovens Pesquisadores da AUGM. **Anais... AUGM**, Curitiba. 423 - 429 p. 2012.

SOUZA, S. P.; PACCA, S.; ÁVILA, M. T.; BORGES, J. L. B. Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. **Renewable Energy**, v. 35 p. 2552 - 2561, 2010.

SYAHRINUDIN. **The potential of oil palm and forest plantations for carbon sequestration on degraded land in Indonesia**. 2005. 112 f. Thesis (Faculty of Agriculture) – University of Bonn, Bonn, 2005.

THENKABAIL, P. S.; STUCKY, N.; GRISCOM, B. W.; ASHTON, M. S.; DIELS, J.; VAN DER MEER, B.; ENCLONA, E. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 23, p. 5447 - 5472, 2004.

WHITE, H. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. **Econometrica**, v. 48, n. 4, p. 817 - 838, 1980.