

## Eficiência de serrarias na Amazônia: uma análise por envoltória de dados

## Sawmill efficiency in the Brazilian Amazon: a DEA analysis

Alexander J. Macpherson<sup>1</sup>, Marco W. Lentini<sup>2</sup>, Douglas R. Carter<sup>3</sup> e Wandreia N. Baitz<sup>4</sup>**Resumo**

A eficiência técnica das serrarias é uma importante questão de desenvolvimento sustentável (social, ambiental e econômico), uma vez que os níveis de eficiência influenciam a área florestal explorada para satisfazer à demanda de madeira. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a eficiência técnica das serrarias localizadas em diferentes fronteiras madeireiras da Amazônia Brasileira utilizando Análise por Envoltória de Dados (DEA). Usando dados coletados em 291 serrarias na Amazônia, investigou-se as variações na eficiência técnica das serrarias (i.e., sua capacidade de produzir um certo volume de produtos a partir de um conjunto de insumos), comparando os níveis de eficiência de quatro fronteiras madeireiras (antigas, intermediárias, recentes e estuarina). Testes estatísticos foram utilizados para comparar as eficiências médias das empresas localizadas nestas fronteiras, bem como foi utilizada regressão linear para estudar os fatores relacionados aos níveis de eficiência. Os resultados indicam que os níveis de eficiência variam enormemente entre as empresas, sendo que há uma tendência de que firmas com maior escala de produção apresentem maior eficiência. Adicionalmente, encontrou-se que as empresas localizadas nas velhas e novas fronteiras são, estatisticamente, mais eficientes do que as serrarias localizadas no estuário e fronteiras intermediárias. A análise de regressão demonstrou que a localização das empresas nas fronteiras antigas e recentes, em comparação às fronteiras estuarina e intermediária, além do volume de madeira processada, são fatores positivamente relacionados à eficiência técnica. Os preços do produto têm uma relação negativa com a eficiência, sugerindo que o mercado de exportação, que oferece melhores preços, influencia negativamente na eficiência. Este fato pode ser verdadeiro apenas no contexto específico das serrarias da Amazônia, que historicamente ignoraram a necessidade de realizarem investimentos tecnológicos para melhor utilizar a madeira de florestas naturais. Os resultados também sugerem que os ganhos industriais nas fronteiras madeireiras mais antigas podem estar sendo transmitidas às fronteiras mais recentes quando as empresas migram para novas áreas, principalmente em busca de novos estoques de matéria-prima, especialmente de madeiras de alto valor.

**Palavras-Chave:** Análise por envoltória de dados, Serraria, Amazônia, Fronteiras de exploração madeireira

**Abstract**

The technical efficiency of sawmills is an important issue for sustainable development (social, environmental and economic dimensions), since efficiency levels may influence the area logged to meet timber demand. The objective of this work is to characterize the technical efficiency of sawmills located in different logging frontiers in the Brazilian Amazon using Data Envelopment Analysis (DEA). Drawing upon data collected in 291 sawmills in the Amazon, this work investigated variations in the technical efficiency of sawmills, comparing efficiency levels on four different logging frontiers (old, intermediate, new, and estuarine). Statistical tests were used to compare the average efficiency levels of these frontiers, and linear regression analysis was used to assess factors correlated with efficiency levels. Results indicate that efficiency levels vary enormously among companies, including evidence that larger companies are generally more efficient. Moreover, it was found that companies located in older and newer logging frontiers are statistically more efficient than sawmills located in the estuary and on intermediate frontiers. Regression analysis revealed that the location of the mills on the older and newer frontiers, in comparison to the estuarine and intermediate frontiers, and the volume of timber processed by the mill, are positively correlated to technical efficiency. Prices for wood products are negatively correlated with efficiency levels, suggesting that supplying export

<sup>1</sup>Pesquisador Visitante no IMAZON - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia; Graduate at School of Forest Resources and Conservation - University of Florida; Pesquisador da U.S. Environmental Protection Agency - 109 T.W. Alexander Drive (E243-05) - Research Triangle Park - NC 27711 - USA - E-mail: [macpherson.alex@epa.gov](mailto:macpherson.alex@epa.gov)

<sup>2</sup>Diretor Adjunto do IFT - Instituto Floresta Tropical - Rua dos Mundurucus, 1613 - Jurunas - Belém, PA - 66025-660 - E-mail: [lentini@ift.org.br](mailto:lentini@ift.org.br)

<sup>3</sup>Professor da School of Forest Resources and Conservation da University of Florida - PO Box 110410 - Gainesville, FL 32611-0410 - USA - E-mail: [drcart@ufl.edu](mailto:drcart@ufl.edu)

<sup>4</sup>Pesquisadora Assistente do IMAZON - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia - Rua Domingos Marreiros, 2020 - Belém, PA - 66060-160 - E-mail: [wandreianms@hotmail.com](mailto:wandreianms@hotmail.com)

markets, which offer better prices, has a negative influence on efficiency. This fact might be valid only in the specific context of sawmills in the Amazon Area, which historically ignored the need to make technological investments focused on better utilizing timber from natural forests. Results suggest that the technical gains achieved on older logging frontiers might have been transmitted to more recent frontiers when companies migrated to new areas, mainly seeking for new stocks of raw material, and especially for high value timber.

**Keywords:** Data Envelopment Analysis, Sawmills, Amazon Area, Logging frontiers

## INTRODUÇÃO

A exploração madeireira em florestas naturais ocorre no estuário amazônico desde o século XVII (RANKIN, 1985), estando geralmente restrita, até o século XX, às florestas de várzea (BARROS e UHL, 1995; ZARIN *et al.*, 2001). Mas, nas décadas de 1960 e 1970, vários investimentos governamentais, como a construção de estradas, propiciaram o acesso a extensas porções de florestas de terra firme no interior da Amazônia. Tais incentivos à ocupação desordenada da Amazônia promoveram o surgimento de uma indústria madeireira altamente predatória, extensiva e migratória (UHL *et al.*, 1997; STONE, 1998a; STONE, 1998b; VERÍSSIMO *et al.*, 1998; VERÍSSIMO *et al.*, 2002b).

Hoje, a exploração madeireira é vital para a economia da Amazônia Brasileira, que por sua vez representa apenas 7% do PIB (Produto Interno Bruto) do Brasil (IPEA, 2002). Em 2004, a indústria madeireira na Amazônia gerou quase 400.000 empregos diretos e indiretos e uma receita bruta de US\$ 2,3 bilhões (LENTINI *et al.*, 2005).

Além disso, a participação amazônica no mercado internacional de madeira tropical tende a aumentar em função do esgotamento dos estoques de madeira oriunda de florestas naturais na Malásia e Indonésia (UHL *et al.*, 1997). Paradoxalmente, a degradação de florestas amazônicas tem sido acelerada devido a incertezas sobre a posse da terra e dos recursos florestais, falhas nos sistemas de comando e controle, práticas inadequadas de manejo florestal e incentivos perversos para a conversão de florestas a agropecuária (SABOGAL *et al.*, 2006; UHL *et al.*, 1997). Devido a este fato, a indústria madeireira continua migrando das fronteiras antigas, nas quais os estoques de matéria-prima estão se exaurindo, para as fronteiras mais recentes, onde há maiores estoques de madeiras de alto valor e os custos de transação (fiscalização e controle) são menores (LENTINI *et al.*, 2005).

Comumente, após duas décadas de exploração predatória e desmatamento desenfreado, as cidades localizadas nas fronteiras mais antigas sofrem um colapso em sua economia local, devido à queda na geração de renda e empregos da

indústria madeireira, provocada pela exaustão das florestas locais (SCHNEIDER *et al.*, 2000).

Neste contexto, uma questão chave para o planejamento público e para a própria sustentabilidade da indústria madeireira amazônica é como a eficiência técnica das empresas se comporta entre diferentes fronteiras e em função de diferentes fatores. Por isso, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as serrarias localizadas em diferentes fronteiras madeireiras da Amazônia Brasileira pela avaliação da eficiência técnica utilizando Análises por Envoltória de Dados (DEA). Primeiramente, determinou-se se as serrarias de fronteiras madeireiras mais recentes são mais ou menos eficientes do que as serrarias localizadas em áreas de exploração mais antigas. Em seguida, avaliaram-se os fatores que influem na eficiência técnica entre diferentes serrarias.

## Histórico das fronteiras de exploração madeireira

A exploração madeireira na Amazônia iniciou-se no estuário, há mais de 300 anos. Ainda hoje, existem 9 polos madeireiros, formados majoritariamente por micro-serrarias rudimentares, nesta região (Tabela 1). Em seguida, os polos madeireiros localizados ao longo das principais estradas construídas nas décadas de 1960 e 1970 formam hoje as antigas fronteiras madeireiras (VERÍSSIMO *et al.* 2002b). Trinta e sete dos 82 polos madeireiros existentes na Amazônia em 2004 ainda estavam localizados nas fronteiras mais antigas que, por sua vez, somam 51% da produção e 49% da receita bruta da indústria madeireira (LENTINI *et al.*, 2005) (Tabela 1).

Devido à crescente escassez de matéria-prima e ao aumento da pressão dos órgãos fiscalizadores, as empresas localizadas em alguns polos madeireiros antigos – tais como Paragominas, Tailândia e Sinop – estão investindo em tecnologia para agregar valor à produção madeireira. Grandes fábricas de laminados, compensados e indústrias de produtos engenheirados de madeira foram instaladas nos últimos anos nestas regiões (LENTINI *et al.*, 2005).

Enquanto isto, serrarias comuns equipadas com antigas serras-de-fita (i.e., o tipo mais co-

num de equipamento para desdobro de toras na Amazônia) pelos mesmos fatores foram obrigadas a cessar operações ou migrar para fronteiras mais recentes. Em 2004, havia dez polos madeireiros recém-estabelecidos nas fronteiras recentes (LENTINI *et al.*, 2005) (Tabela 1).

Como consequência da migração de empresas madeireiras e a derrubada de florestas para a pecuária e a agricultura, a produção de madeira nas fronteiras recentes cresceu em mais de 80% entre 1998 e 2004 (LENTINI *et al.*, 2005). Devido à abundância de madeiras de alto valor nas florestas nas novas fronteiras, a receita bruta média gerada por metro cúbico produzido nestas fronteiras (US\$ 106 m<sup>3</sup>) é mais alto do que o valor constatado nas fronteiras antigas (US\$ 89 m<sup>3</sup>) (LENTINI *et al.*, 2005).

Entre estes extremos, 26 polos madeireiros estão localizados nas fronteiras intermediárias (LENTINI *et al.*, 2005) (Tabela 1), em áreas colonizadas há algumas décadas, como a região da rodovia Transamazônica (BR 230). Apesar disso, o estabelecimento de empresas madeireiras nesta região se intensificou apenas nas últimas duas décadas (VERÍSSIMO *et al.* 2002b), atraídas pela melhoria nas condições de infra-estrutura nos municípios ao longo da rodovia e pela escassez de madeiras valiosas em fronteiras antigas.

### Tipos de serrarias e tecnologia utilizada

Em 2004, mais de 80% da produção madeireira da Amazônia era constituída por madeira serrada e, em menor proporção, por produtos acabados de madeira (LENTINI *et al.*, 2005). As empresas envolvidas nesta produção incluíam serrarias pequenas e rudimentares, serrarias comuns, equipa-

das com serras-de-fita e outras que também produziam produtos acabados (Tabela 2).

As micro-serrarias formam o tipo de empresa predominante no estuário amazônico. Uma típica micro-serraria opera durante 5 a 7 meses por ano e emprega entre 6 e 11 pessoas, frequentemente membros de uma mesma unidade familiar (LENTINI *et al.*, 2005). As serras empregadas, geralmente circulares ou pequenas serras-de-fita, são antigas e rudimentares. Intermediários ligam produtores e consumidores, geralmente representados pelo setor de construção civil para moradias populares nos grandes centros urbanos da Amazônia (VERÍSSIMO *et al.*, 1999; VERÍSSIMO *et al.*, 2002b). Em geral, as micro-serrarias localizadas em florestas de terra firme são um pouco maiores, mas utilizam os mesmos tipos de equipamentos das serrarias de várzea (BARROS e UHL 1995; VERÍSSIMO *et al.*, 1999; VERÍSSIMO *et al.*, 2002a; LENTINI *et al.*, 2004; LENTINI *et al.*, 2005).

As empresas predominantes em florestas de terra firme são serrarias convencionais equipadas com serras-de-fita, empregando de 30 a 40 pessoas. Em 2004, as serrarias comuns que beneficiavam madeira de florestas de terra firme representavam 60% das empresas madeireiras na Amazônia. Geralmente, a produção destas empresas é formada por cerca de 90% de madeira serrada, na forma de peças para a construção civil, e 10% em produtos acabados, o que inclui peças para móveis, decking e pisos (VERÍSSIMO *et al.*, 2002b). Os equipamentos utilizados são geralmente uma serra-de-fita industrial e serras auxiliares, pelo menos uma plaina, além de caminhões e empilhadeiras de madeira (LENTINI *et al.*, 2005).

**Tabela 1.** Fronteiras de exploração madeireira na Amazônia Brasileira, 2004.

**Table 1.** Logging frontiers in the Brazilian Amazon Area, 2004.

Fronteira Madeireira (Idade)	Número de Pólos Madeireiros	Número de empresas	Consumo de Toras (1000 m <sup>3</sup> )	Número de empregos	Renda Bruta (US\$ 1000)
Antigas (> 30 anos)	37	1.185	12.680	182.830	1.129.761
Intermediárias (10-30 anos)	26	751	5.960	99.212	571.523
Recentes (< 10 anos)	10	347	2.830	40.538	298.840
Estuário (> 300 anos)	9	849	2.990	57.042	310.565
Amazônia	82	3.132	24.460	379.621	2.310.689

Fonte: Adaptado de LENTINI *et al.* (2005).

**Tabela 2.** Caracterização dos principais tipos de empresas madeireiras da Amazônia, 2004.

**Table 2.** Characterization of the main types of logging companies in the Amazon Area, 2004.

Tipo de empresa	Número de Empregados	Produção Anual (m <sup>3</sup> )	Renda Bruta Anual (US\$)	Mercado	Participação no mercado Amazônico
Micro-Serrarias	3-12	400 - 2.000	1.500-30.000	Local, regional	< 5%
Serrarias	18-80	4.000 - 30.000	40.000-5.000.000	Nacional, exportação	até 55%
Serrarias-Beneficiadoras	50-100	4.000 - 30.000	60.000-5.000.000	Nacional, exportação	até 20%

Fonte: Adaptado de LENTINI *et al.* (2005).

### **Análise por envoltória de dados (DEA)**

DEA é uma técnica de programação matemática não-paramétrica, introduzida por Charnes *et al.* (1978). O método é usado frequentemente para estimar e comparar a eficiência relativa de empresas ou, na terminologia da DEA, unidades de tomada de decisão (DMUs).

O método é vantajoso por oferecer medidas robustas de eficiência, com exigências mínimas de dados, sem fazer pressupostos a respeito da forma funcional da função de produção. Para fins de comparação, caso seja desejado usar outro método em que uma fronteira estocástica é gerada para avaliar a eficiência de empresas, o analista deve assumir ou derivar uma função de produção (CARTER e SIRY, 2003). Outra vantagem da DEA é o seu uso relativamente simples para analisar empresas que produzem múltiplos produtos.

Além disso, a DEA foi usada nesse trabalho porque dedica particular atenção aos “extremos” dos dados. A técnica busca uma ou um conjunto de empresas que produzam o máximo de produtos a partir de um determinado conjunto de insumos. Portanto, a lógica da DEA é encontrar empresas que possuam um ótimo desempenho na fronteira dos dados, ao invés de simplesmente empresas que possuam um desempenho médio. Desta forma, firmas eficientes utilizam um conjunto pequeno de insumos para uma quantidade grande de produtos, em termos proporcionais.

A DEA já foi usada para estudar a eficiência em uma grande variedade de indústrias (CHARNES *et al.*, 1994) e até mesmo examinar questões administrativas e operacionais no setor florestal. Entretanto, poucos estudos têm empregado DEA para estudar a eficiência de serrarias (FOTIOU, 2000; NYRUD e BAARDSEN, 2003; OJO e OBALOKUN, 2005). Nenhum destes estudos analisou serrarias na Amazônia.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Hipótese do estudo**

A principal hipótese deste trabalho é que as serrarias localizadas nas fronteiras madeireiras mais antigas apresentam maior eficiência técnica em comparação com serrarias de fronteiras mais recentes. A principal razão que justificaria este fato é que as empresas em fronteiras mais antigas, providas com melhor acesso à infra-estrutura, tecnologia, informação e serviços especializados, seriam mais eficientes na conversão

de insumos em produtos do que nas empresas em fronteiras mais recentes. É também provável que a escassez de matéria-prima nestas fronteiras, além dos maiores custos de transação para acessá-la (maior fiscalização e requerimentos legais) tenha forçado as empresas ineficientes a cessar suas atividades.

Entretanto, a teoria micro-econômica também pode explicar o contrário, de que a eficiência industrial se distribui uniformemente em diferentes fronteiras. Como defendem Merry *et al.* (2006), se os mercados operarem corretamente, o desenvolvimento do setor florestal provocará a alocação eficiente de terras para a produção racional e manejada de madeira. Ou seja, com o aumento da escassez de matéria-prima, outrora abundante, algumas empresas ineficientes seriam obrigadas a se retirar do mercado. As demais, mesmo que migrando para fronteiras mais novas, podem ter sido capazes de aumentar sua eficiência ao aprimorar suas práticas ao longo do tempo, incorporando tal conhecimento em suas práticas industriais. Além disso, as empresas locadas nas fronteiras mais recentes podem ter a sua disposição matéria-prima de melhor qualidade (conforme indicado por LENTINI *et al.*, 2005) fato que pode aumentar sua eficiência relativa.

### **Área de estudo e número de empresas incluídas nas análises**

O banco de dados utilizado neste estudo foi criado pelo Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON) a partir de um amplo levantamento sócio-econômico nas empresas madeireiras realizado em 2004 em oito estados da Amazônia: Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, e Roraima.

Durante este levantamento, 680 empresas, abrigadas em 82 polos madeireiros, foram entrevistadas através de questionários, junto aos proprietários ou gerentes. Os questionários coletaram as seguintes informações: a produção e o consumo de madeira; o número de empregados; o número de meses de funcionamento da empresa durante o ano; o ano de estabelecimento da empresa; os equipamentos utilizados na exploração e no beneficiamento industrial; a origem da matéria-prima; o tipo de transporte da madeira em tora; os preços para as principais espécies exploradas (em pé, em tora e processado); e os custos envolvidos na exploração (transação, extração e transporte) e processamento. Os resultados gerais deste levantamento foram publicados em Lentini *et al.* (2005).

Neste estudo, apenas empresas que produzem exclusivamente madeira serrada como produto foram incluídas na análise. Esta opção foi feita, pois, embora DEA seja útil para comparar empresas que geram múltiplos produtos, as estimativas de eficiência são mais robustas quando todas as empresas fabricam os mesmos tipos de produtos, embora em quantidades diferentes. Também foram excluídas empresas que possuem uma produção mista, como as beneficiadoras, que produzem madeira serrada e produtos acabados, por serem extremamente heterogêneas e difíceis de serem comparadas entre si. Assim, os dados de 291 serrarias foram utilizados na DEA (Tabela 3).

Baseado em Charnes *et al.* (1978), definiu-se como eficiência técnica a capacidade de uma determinada empresa em produzir produtos a partir de um conjunto de insumos. Desta forma, os insumos utilizados nas análises foram: o número de serras-de-fita, outras serras utilizadas e plainas; o número de empregados; e o volume mensal de madeira em tora. O único produto considerado foi a produção mensal de madeira serrada (Tabela 3).

Os dados são apresentados em termos mensais, uma vez que as empresas operam durante um número diferente de meses por ano, em decorrência da duração da estação de chuvas em cada região e dos estoques de matéria-prima de cada empresa. Esta decisão foi tomada porque, caso a produção anual fosse utilizada, a eficiência técnica seria influenciada pelo número de meses de funcionamento de cada empresa – ou seja, uma empresa eficiente que apenas opera durante alguns meses do ano seria assinalada pela DEA como ineficiente.

### O modelo utilizado

Para este trabalho, utilizou-se o modelo de retornos constantes à escala de produção, desenvolvido por Charnes *et al.* (1978), mostrado na equação 1.

$$\frac{\text{Produto}}{\text{Insumo}} = \frac{\sum_{y=1}^s u_y y_y}{\sum_{i=1}^m v_i x_i} \quad (1)$$

Na equação,  $x_i$  representa o  $i_{th}$  insumo, onde  $i=1, \dots, m$ , e  $y_y$  representa o  $y_{th}$  produto, onde  $r=1, \dots, s$ . O índice  $th$  denota, respectivamente, o último insumo e produto considerado. Em seguida,  $v_i$  é o peso do  $i_{th}$  insumo, e  $u_r$  é o peso do  $y_{th}$  produto. A eficiência de uma dada empresa é então caracterizada como a razão dos produtos e insumos ponderados.

Na DEA, cada unidade de tomada de decisão (ou DMU que, neste caso, representa as serrarias) tem sua classificação de eficiência técnica obtida iterativamente, ou seja, o programa é rodado várias vezes, sendo que cada iteração gera um resultado parcial para a próxima iteração. Isto é necessário para que o desempenho de cada empresa seja comparado com o desempenho das demais. Na prática, o programa cria uma DMU de comparação, ou DMU múltipla, que se torna uma referência para cada DMU pontualmente examinada. Este programa, expresso matematicamente no conjunto de equações 2, é um problema de programação matemática não-linear.

$$\begin{aligned} \text{Eficiência Max} &= \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{io}} \\ \text{sujeito a } &\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, j = 1 \dots n \quad (2) \\ &e u_r \geq 0, r=1 \dots s \text{ e } v_i \geq 0, i=1 \dots m \end{aligned}$$

**Tabela 3.** Estatísticas descritivas para as variáveis de insumo e produção.  
**Table 3.** Descriptive statistics for input and output variables.

Variáveis	Número de Observações	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio Padrão
<b>Insumos</b>					
Número de serras-de-fita	291	0,00	4,00	0,86	0,56
Número de outras serras	291	0,00	3,00	0,29	0,51
Plainas de madeira	291	0,00	3,00	0,14	0,46
Número de empregados	291	2,00	142,00	22,00	21,00
Consumo mensal de toras (m³)	291	18,00	3.333,00	686,00	538,00
<b>Produtos</b>					
Produção mensal de madeira serrada (m³)	291	5,00	1.333,00	262,00	214,00

No conjunto de equações 2, os insumos e produtos de cada DMU sob análise são identificados com o subscrito adicional  $x_{i0}, y_{r0}$ , já que a eficiência da empresa em questão é comparada com a eficiência de  $n$  outras empresas. O objetivo do programa passa a ser a seleção do conjunto de pesos não-negativos ( $u, v$ ) que maximiza a razão de eficiência da DMU. A única restrição cabível, expressa na segunda linha do conjunto 2, é de que nenhuma empresa no conjunto de  $n$  empresas deve ter um nível de eficiência técnica maior do que 1.

Para facilitar a resolução deste problema, como mostram Charnes *et al.* (1978), o programa não-linear, definido na equação 2, pode ser convertido em um problema de programação linear, que pode ser solucionado usando o algoritmo simplex. Nas análises deste estudo, utilizou-se o problema dual de programação linear de Charnes *et al.* (1978), discutido em detalhes em Thompson e Thore (1992) e expresso no conjunto de equações 3.

$$\begin{aligned} & \min \theta_0 \\ \text{sujeito a } & \theta_0 x_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (3) \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{r0}, \quad r = 1, \dots, s \\ & \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Nesta versão do modelo DEA,  $\theta_0$  representa um fator de "encolhimento" escalar (shrinking factor, na versão original de CHARNES *et al.*, 1978), e  $\lambda_j$  é um vetor de pesos. Como na formulação anterior do programa, este programa buscou uma DMU ou uma combinação ponderada de DMUs que gerassem uma quantidade igual ou superior de produtos do que a DMU sob análise ( $y_{i0}$ ), segundo a terceira linha do conjunto de equações 3. Nas análises deste estudo,  $\theta_0$  representa a eficiência técnica das serrarias. Por causa da dessa restrição,  $\theta_0$  seria sempre maior ou igual a 0. Se a DMU em questão fosse tecnicamente eficiente,  $\theta_0$  seria igual a 1. Caso contrário,  $\theta_0$  seria menor do que 1.

### **Análises da eficiência das empresas e dos fatores relacionados à eficiência das serrarias amazônicas**

Primeiramente, calculou-se a medida de eficiência  $\theta_0$  para cada uma das 291 serrarias estudadas neste estudo, com o objetivo de

compará-las e observar como a escala da produção (quantidade de produtos gerados) influenciava na eficiência.

Em seguida, compararam-se as diferentes fronteiras madeireiras utilizando-se a eficiência técnica média de cada fronteira. O teste de Tukey para comparação múltipla de médias (nível de significância de 95%) foi aplicado para analisar diferenças estatísticas entre tais médias. Finalmente, um mapa foi gerado com as eficiências médias das empresas existentes em cada polo madeireiro para auxiliar na discussão dos resultados.

Para avaliar os fatores relacionados à eficiência das serrarias, realizou-se uma segunda etapa das análises, em que os coeficientes de eficiência técnica foram utilizados em regressões lineares, juntamente com um conjunto de variáveis não incluídas na primeira etapa da DEA. As variáveis escolhidas (independentes) foram o número de meses em que a serraria opera anualmente, a idade da serraria, sua localização (através de uma variável binária em que a variável base escolhida foi a fronteira estuarina), o preço da madeira serrada e o volume de toras consumido mensalmente. O modelo incorporou variáveis falsas relativas às fronteiras pela vantagem de captar qualquer efeito específico às fronteiras que pode não ter sido captado pelas demais variáveis. Tais fatores são extremamente difíceis de coletar através de questionários, e podem incluir a qualidade dos equipamentos (não restrita apenas ao seu tempo de uso) e a qualidade da matéria-prima. Formalmente, o modelo está descrito na Equação 4:

$$e_{Ti} = \beta_0 + \beta_1 M_i + \beta_2 Id_i + \beta_3 Ant_i + \beta_4 Int_i + \beta_5 Rec_i + \beta_6 P_i + \beta_7 Vol_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

onde ( $i = 1, \dots, 291$ ),  $e_{Ti}$  representa o índice de eficiência técnica das serrarias,  $M_i$  é o número de meses de funcionamento da empresa durante o ano,  $Id_i$  é a idade das empresas (anos);  $Ant_i$ ,  $Int_i$  e  $Rec_i$  representam se as empresas estão localizadas, respectivamente, nas fronteiras antigas, intermediárias ou recentes;  $P_i$  representa o preço médio da produção processada (em US\$/m<sup>3</sup>);  $Vol_i$  representa o volume de madeira em tora mensalmente consumido (m<sup>3</sup>) e é o erro estocástico do modelo.  $\beta_0$  é a constante e  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  e  $\beta_6$  são os parâmetros do modelo. Como variáveis falsas binárias,  $\beta_3, \beta_4$  e  $\beta_5$  assumem apenas os valores de 0 ou 1.

Durante a confecção do modelo teórico, cada uma destas variáveis continha uma relação espe-

rada com a eficiência técnica (positiva, negativa ou desconhecida), em função de análises exploratórias dos dados e da experiência empírica dos autores. O número de meses de funcionamento era a única variável assumida a priori como negativa, já que as empresas que funcionam durante os meses chuvosos possuem maiores dificuldades logísticas em produzir e este fato influenciaria a eficiência. Já os parâmetros das variáveis binárias eram assumidos como positivos, pois todas estas fronteiras deveriam ter um nível de eficiência maior do que as empresas do estuário. O volume de madeira em tora era também assumido como positivo, já que geralmente as empresas madeireiras mais eficientes deveriam ser também as que têm maior escala.

Finalmente, a idade das empresas e os preços poderiam ter um efeito tanto positivo quando negativo sobre a eficiência. Por um lado, o efeito da idade das empresas poderia ter sido negativo, já que haveria um declínio do capital (depreciação dos equipamentos com o tempo), sendo que este frequentemente não é substituído. Por outro, a idade da serraria poderia ter um efeito positivo devido ao aumento da experiência dos gerentes no processamento da madeira, auxiliando a diminuir desperdícios e utilizar melhor a matéria-prima.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

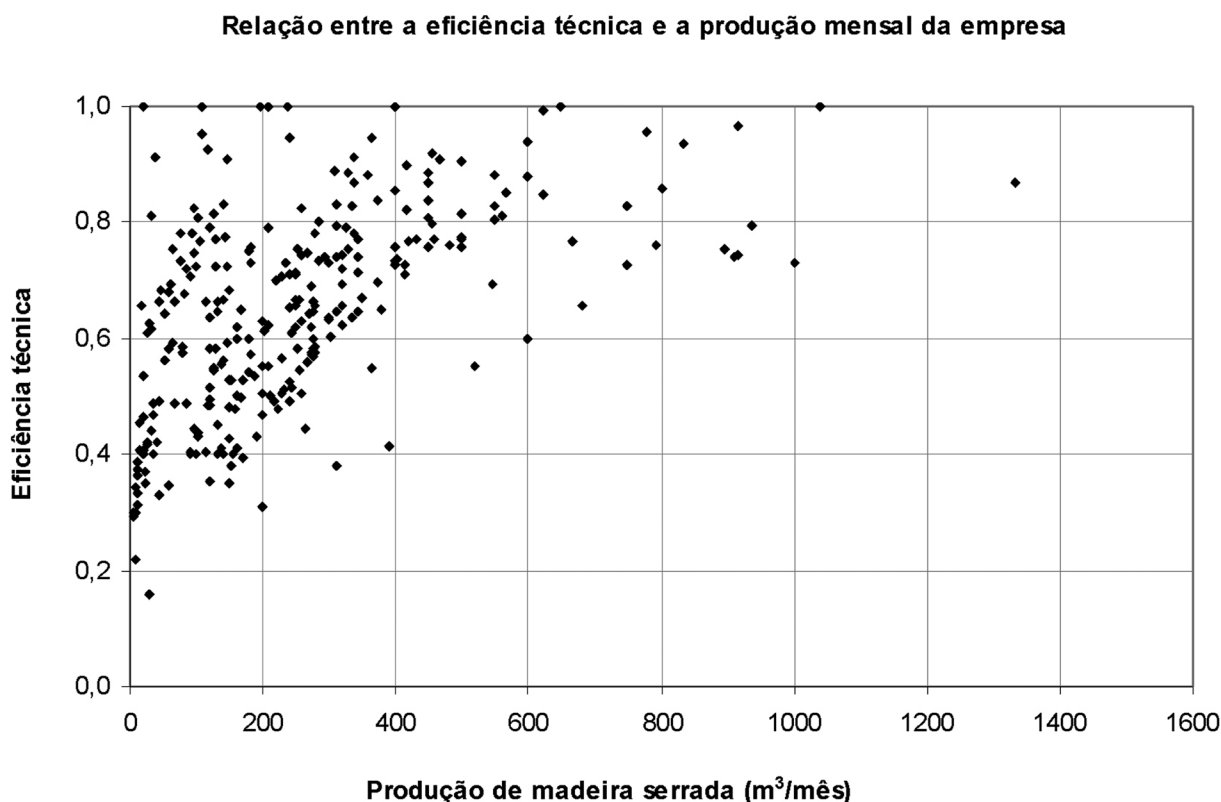
### Resultados da DEA

Na análise da eficiência técnica das empresas individuais pesquisadas, os níveis de eficiência variaram enormemente entre as serrarias de diferentes regiões da Amazônia. A Figura 1 apresenta a eficiência destas empresas em relação à produção mensal de madeira serrada.

Há um nível relativamente alto de dispersão nas medidas de eficiência, sendo que um número reduzido de empresas atingiu um alto desempenho. Há, ainda, uma tendência de aumento de eficiência em decorrência do aumento do tamanho da empresa, medida por sua capacidade em produzir madeira serrada.

A Tabela 4 mostra que, em média, empresas localizadas nas fronteiras mais antigas e mais recentes apresentaram eficiência mais alta do que as empresas operando nas fronteiras intermediárias e estuarinas.

Com base na inspeção dos resultados do teste de Tukey ( $\alpha=5\%$ ), verificou-se a não existência de diferenças estatísticas significativas entre a eficiência técnica das fronteiras antigas e das fronteiras novas e entre as fronteiras novas e intermediárias. A Tabela 4 também mostra que os níveis médios de eficiência das ser-



**Figura 1.** Gráfico de dispersão da eficiência técnica das serrarias em decorrência da produção mensal de madeira processada (N = 291).

**Figure 1.** Scatterplot of technical efficiency and production of processed wood per month (N=291).

**Tabela 4.** Estatísticas descritivas dos índices de eficiência técnica em serrarias das fronteiras madeireiras da Amazônia Brasileira, 2004.

**Table 4.** Descriptive statistics for the technical efficiency estimates in sawmills of the logging frontiers in the Brazilian Amazon Area, 2004.

Fronteira Madeireira	Número de Observações	Média <sup>1</sup>	Desvio Padrão	Erro Padrão	Valor mínimo	Valor máximo
Estuário	58	0,58c	0,18	0,02	0,16	1,00
Antiga	106	0,70a	0,15	0,01	0,33	1,00
Intermediária	86	0,62bc	0,17	0,02	0,30	1,00
Nova	41	0,70ab	0,18	0,03	0,34	1,00
Amazônia	291	0,65	0,18	0,01	0,16	1,00

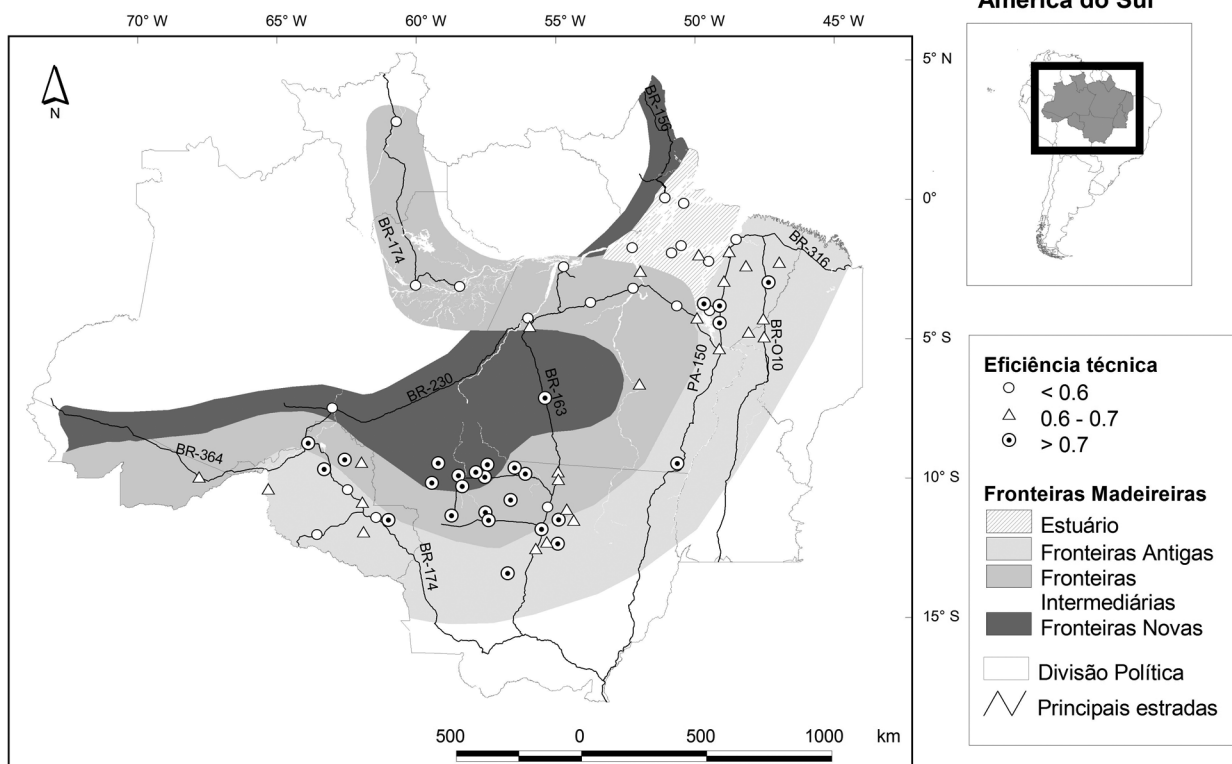
<sup>1</sup>Médias seguidas de letras diferentes são estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 95% de probabilidade.

rarias estuarinas foram significativamente mais baixos do que os coeficientes constatados para as fronteiras antigas e novas, mas não diferem dos níveis de eficiência constatados para as fronteiras intermediárias.

Tais resultados entram parcialmente em conflito com a hipótese deste estudo, de que as serrarias localizadas nas fronteiras mais antigas exibiriam uma maior eficiência técnica. Para ilustrar a provável explicação para tal fato, a Figura 2 mapeia as fronteiras e os polos madeireiros, classificados em três classes de eficiência técnica (alta, média e baixa), definidos de forma a haver um número aproximadamente equivalente de polos em cada classe. Com algumas exceções em sua porção ocidental, a fronteira antiga apresentou relativamente pouca variação na eficiência, uma vez que a maioria de seus polos madeireiros contém valores altos ou médios.

Já as fronteiras recentes continuam diversos polos madeireiros altamente eficientes. Há duas possíveis explicações para este fato: é possível que as serrarias nas fronteiras recentes não sejam simplesmente versões anteriores das serrarias em fronteiras mais antigas, mas que tenham aprendido com o tempo de operação em outras regiões e, desta forma, elevado os níveis de eficiência; é também possível que tais polos poderiam ter acesso à matéria-prima de ótima qualidade, o que significa que as serrarias processariam um grande volume de espécies de alto valor com grandes diâmetros e poucos defeitos – tais como ocos e nós. Em qualquer um dos cenários, há evidências de que a hipótese principal deste trabalho pode ser rejeitada. Novas pesquisas são recomendadas para melhor estudar o desenvolvimento da eficiência de serrarias na Amazônia.

### Amazônia Brasileira



**Figura 2.** Eficiência técnica dos pólos madeireiros na Amazônia Brasileira, 2004.

**Figure 2.** Technical efficiency in the logging centers of the Brazilian Amazon Area, 2004.



## Fatores relacionados à eficiência das serrarias

O modelo de regressão linear ajustado mostrou-se estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 5). O coeficiente de determinação ajustado encontrado para este modelo foi 0,31. Conforme esperado, os coeficientes nas variáveis binárias relativas às fronteiras antigas e recentes foram significativos (a 95% de probabilidade) e positivos, uma vez que a variável base considerada foi a fronteira estuarina. Corroborando a análise feita com as médias das medidas de eficiência para as quatro fronteiras, as fronteiras intermediárias não demonstraram diferença da estuarina com um nível de 10% de significância.

O efeito negativo significativo dos preços sobre a eficiência técnica pode ser consequência de exigências de qualidade mais alta dos mercados de exportação, nos quais pequenas imperfeições na madeira são comumente rejeitadas. O volume de toras consumido pelas empresas teve efeito positivo sobre a eficiência, o que sugere retornos crescentes à escala de produção madeireira. Embora os valores de ambos os coeficientes tenham sido relativamente baixos, é preciso considerar a escala das variáveis ao medir seu efeito sobre a eficiência. Isto é particularmente verdadeiro para os volumes, geralmente na escala de alguns milhares de metros cúbicos.

Os coeficientes para o número de meses de funcionamento e idade da empresa não se mostraram significativos (probabilidade próxima a 0,2, em ambos os casos). No caso do número de meses, era esperado que o aumento no número de meses em operação diminuiria a eficiência técnica. Isso seria esperado porque um número maior de meses de operação implicaria no processamento de madeira durante a estação chuvosa, o que tenderia a diminuir a eficiência industrial.

## Discussão dos resultados e implicações para políticas públicas

Baseadas nos resultados deste estudo, foram encontradas evidências de que as serrarias localizadas em fronteiras mais recentes estão seguindo uma trajetória diferente de desenvolvimento do que as empresas localizadas na fronteiras mais antigas – ou seja, não há uma superioridade na eficiência das empresas em fronteiras antigas em comparação às fronteiras recentes.

É importante lembrar que as fronteiras de extração madeireira foram formadas na Amazônia ao longo de várias décadas, impulsionadas por diferentes contextos políticos e estruturais. Como exemplo, há 30 anos, muitas serrarias foram estabelecidas na medida em que o governo federal oferecia fortes incentivos econômicos para induzir a ocupação territorial e o desmatamento. Atualmente, os empresários madeireiros enfrentam regras e incentivos diferentes para o uso de recursos florestais, já que a conservação florestal e uso sustentável têm passado a ser um objetivo importante para a sociedade brasileira.

Além disso, devido à melhoria das condições de infra-estrutura e da informação disponível sobre as florestas, eventuais barreiras ao estabelecimento de serrarias nas novas fronteiras são possivelmente menores, o que aumenta a probabilidade das empresas ineficientes serem naturalmente expulsas do mercado.

As serrarias maiores parecem ser capazes de se beneficiar de economias de escala no beneficiamento de toras. Todavia, a composição de escalas de produção na indústria madeireira amazônica é muito heterogênea.

Neste contexto, eventuais políticas setoriais provavelmente terão consequências diferentes dependendo da localização e da escala de cada empresa – favorecendo mais algumas empresas do que outras. Uma possível política setorial é redu-

**Tabela 5.** Modelo estatístico linear ajustado entre os níveis de eficiência e variáveis potencialmente explanatórias.  
**Table 5.** Linear model regressed between the efficiency levels and potential explanatory variables.

Variáveis explanatórias	Efeito a priori na eficiência	Modelo ajustado <sup>1</sup>		
		Coefficiente	Erro Padrão	Significância estatística
Constante		+ 0,5948	0,038	0,000
Meses de funcionamento	-	- 0,0047	0,004	0,196
Idade da serraria (anos)	+ / -	- 0,0015	0,001	0,212
Variáveis falsas binárias (base=estuário)				
Fronteiras antigas	+	+ 0,0954	0,027	0,000
Fronteiras intermediárias	+	+ 0,0416	0,028	0,136
Fronteiras recentes	+	+ 0,0998	0,034	0,004
Preço de madeira serrada (US\$/m <sup>3</sup> )	+ / -	- 0,0001	0,000	0,000
Volume de madeira em tora consumido mensalmente (m <sup>3</sup> )	+	+ 0,0002	0,000	0,000

<sup>1</sup>O modelo final obteve um coeficiente de determinação ajustado igual a 0,31.  
O valor do teste F para a significância do modelo foi igual a 17,99\*\*.

zir impostos sobre a madeira de empresas interessadas em voluntariamente investir em tecnologia. Outra possibilidade seria o governo reduzir ou eliminar as tarifas de importação que as empresas atualmente pagam para adquirir equipamentos não produzidos no Brasil. Tais políticas precisam ser aplicadas de forma cautelosa porque provavelmente teriam impactos diferentes sobre empresas de diferentes tamanhos e localização.

A sociedade brasileira está preocupada em mitigar os problemas relacionados ao desmatamento e à exploração madeireira ilegal e predatória, incentivando a adoção do manejo florestal na Amazônia. Embora importantes tais esforços precisam ser complementados por medidas que visem atenuar os problemas específicos relacionados ao desperdício de matéria-prima e à baixa eficiência técnica das serrarias.

Pesquisas e novas políticas aplicadas sobre esta etapa da cadeia produtiva são um componente necessário dentro de uma estratégia mais ampla para desacelerar a expansão descontrolada e contínua do setor madeireiro para novas fronteiras.

## CONCLUSÃO

Utilizando-se a técnica de DEA, encontrou-se que empresas localizadas nas velhas e novas fronteiras são estatisticamente mais eficientes em alocar insumos para gerar produtos do que as serrarias localizadas em florestas de várzea e fronteiras intermediárias. As melhores condições de infra-estrutura e a melhor qualidade da mão-de-obra devem explicar a eficiência relativamente alta nas fronteiras mais antigas.

Nas fronteiras recentes, a melhor qualidade da matéria-prima (toras maiores e com menos defeitos) pode explicar o fato destas empresas serem igualmente eficientes. Além disso, é também possível que a evolução industrial nas fronteiras mais antigas esteja sendo transmitida às fronteiras mais recentes na medida em que as empresas migram para novas áreas. Este fato pode implicar que as condições políticas e econômicas que favorecem o aprimoramento das operações industriais estão presentes nas fronteiras mais recentes.

A eficiência técnica das empresas em fronteiras intermediárias não é um ponto intermediário entre as velhas e novas fronteiras, conforme era esperado. Como possível explicação para este fato, tais serrarias podem ter se desenvolvido sob um conjunto único de condições não comparáveis às demais fronteiras.

Através de análises de regressão linear, encontrou-se que a localização das empresas nas fronteiras antigas e recentes (tendo a fronteira estuarina como base) e o volume de madeira processado pela empresa são fatores positivamente relacionados à eficiência técnica. Este último fator sugere que a economia do setor madeireiro na Amazônia apresenta retornos crescentes à escala de produção. Os preços do produto têm uma relação negativa com a eficiência, sugerindo que as exigências de qualidade mais alta dos mercados de exportação, que oferecem maiores preços, diminuem os níveis de eficiência das empresas. É preciso cautela com tais resultados, pois se aplicam especialmente ao caso de serrarias da Amazônia, nas quais a abundância de matéria-prima e outros incentivos perversos podem ter estimulado as empresas exportadoras a não investir significativamente em tecnologias de melhor aproveitamento industrial da matéria-prima.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID) e à Fundação Betty e Gordon Moore (GBMF) pelo apoio financeiro ao projeto "Pólos madeireiros da Amazônia Brasileira", executado pelo Imazon em 2004. A.J. Macpherson recebeu apoio do Programa Working Forests in the Tropics da Universidade da Flórida, iniciativa apoiada pela Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos (DGE-0221599). M.W. Lentini recebeu apoio durante o mestrado da GBMF, através da Amazon Conservation Leadership Initiative (ACLI) da Universidade da Flórida (EUA). Dados deste trabalho foram cedidos pelo Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON) para a realização do mestrado de M.W. Lentini.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, A.C.; UHL, C. Logging along the Amazon River and estuary: patterns, problems and potential. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v.77, p.87-105, 1995.
- CARTER, D.R.; SIRY, J.P. Timber production efficiency analysis: theoretical foundations and empirical applications. In: SILLS, E.; ABT, K. (Eds.) *Forests in a market economy*. Boston: Kluwer Academic, 2003. p.97-115.

- CHARNES, A.; COOPER, W.W.; RHODES, E. Measuring efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v.2, p.429-444, 1978.
- CHARNES, A.; COOPER, W.W.; LEWIN, A.Y.; SEIFORD, L.M. **Data envelopment analysis: theory, methodology, and applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994. 528p.
- FOTIOU, S.I. Efficiency measures and logistics: the case of the sawmill industry. In: SJOESTROEM, K. (Ed.) **Logistics in the forest sector**. Helsinki: Timber Logistics Club, 2000. p.189-204.
- IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Dados macroeconômicos e regionais**. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em 30 jun. 2004.
- LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; SOBRAL, L. **Forest facts in the Brazilian Amazon 2003**. Belém: Imazon, 2004. 100p.
- LENTINI, M.; PEREIRA, D.; CELENTANO, D.; PEREIRA, R. **Fatos florestais da Amazônia 2005**. Belém: Imazon, 2005. 110p.
- MERRY, F.; AMACHER, G.; NEPSTAD, D.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; BAUCH, S. Industrial development on logging frontiers in the Brazilian Amazon. *International Journal of Sustainable Development*, Geneva, v.9, p.277-296, 2006.
- NYRUD, A.Q.; BAARDSEN, S. Production efficiency and productivity growth in Norwegian sawmilling. *Forest Science*, Bethesda, v.49, p.89-97, 2003.
- OJO, S.O.; OBALOKUN, B.M. Analyses of productivity and technical efficiency of sawmill industries in Nigeria. *Journal of Tropical Forest Science*, Kepong, v.17, p.428-437, 2005.
- RANKIN, J.M. Forestry in the Brazilian Amazon. In: PRANCE, G.; LOVEJOY, T. (Eds.) **Amazonia, key environmental series**. Oxford: Pergamon Press, 1985. p.369-392.
- SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J.N.; ZWEDE, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. **Manejo florestal empresarial na Amazônia Brasileira: restrições e oportunidades - relatório síntese**. Belém: CIFOR, Imazon, Embrapa, IFT, 2006. 74p.
- SCHNEIDER, R.; ARIMA, E.; VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; SOUZA Jr., C. **Sustainable Amazon: limitations and opportunities for rural development**. Belém: World Bank, Imazon, 2000. 77p.
- STONE, S.W. Evolution of the timber industry along an aging frontier: the case of Paragominas (1990-95). *World Development*, Amsterdam, v.26, p.433-448, 1998a.
- STONE, S.W. Using a geographic information system for applied policy analysis: the case of logging in the Eastern Amazon. *Ecological Economics*, Amsterdam, v.27, p.43-61, 1998b.
- THOMPSON G.L.; THORE, S. **Computational economics: economic modeling with optimization software**. Danvers: Boyd & Fraser Publishing, 1992.
- UHL, C.; BARRETO, P.; VERÍSSIMO, A.; VIDAL, E.; AMARAL, P.; BARROS, A.C.; SOUZA Jr., C.; JOHNS, J.; GERWING, J. Natural resource management in the Brazilian Amazon. *Bioscience*, Washington, v.47, p.160-168, 1997.
- VERÍSSIMO, A.; LENTINI, M.; LIMA, E. **Pólos madeireiros do Estado do Pará**. Belém: Imazon, 2002b. 76p.
- VERÍSSIMO, A.; COCHRANE, M.A.; SOUZA Jr., C.; SALOMÃO, R. Priority areas for establishing national forests in the Brazilian Amazon. *Conservation Ecology*, Waterloo, v.6, n.1, p.4, 2002a.
- VERÍSSIMO, A.; SOUZA Jr., C.; STONE, S.; UHL, C. Zoning of timber extraction in the Brazilian Amazon. *Conservation Biology*, Barking, v.12, p.128-136, 1998.
- VERÍSSIMO, A.; CAVALCANTE, A.; VIDAL, E.; LIMA, E.; PANTOJA, F.; BRITO, M. **O setor madeireiro no Amapá: situação atual e perspectivas para o desenvolvimento sustentável**. Macapá: Governo do Estado do Amapá, Imazon, 1999. 46p.
- ZARIN, D.; PEREIRA, V.F.G.; RAFFLES, H.; RABELO, F.G.; PINEDO-VASQUEZ, F.G.; CONGALTON, R.G. Landscape change in the tidal floodplain near the mouth of the Amazon River. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v.154, p.383-393, 2001.

Recebido em 19/07/2007

Aceito para publicação em 16/09/2009

