

# Condições ideais para o consumo específico de madeira na produção de celulose

Francisco de Assis Bertini Moraes<sup>a</sup>, Claudio Luis Piratelli<sup>b\*</sup>, Jorge Alberto Achcar<sup>c</sup>

<sup>a</sup>francisco.bertini@ipaperbr.com, UNIARA, Brasil

<sup>b\*</sup>clpiratelli@uniara.com.br, UNIARA, Brasil

<sup>c</sup>achcar@fmrp.usp.br, UNIARA, FMRP/USP, Brasil

## Resumo

Este artigo apresenta uma modelagem estatística para os dados sobre consumo específico de madeira (CEM) de uma indústria de celulose e papel. Um importante objetivo deste setor é identificar os possíveis fatores que afetam o CEM, promovendo grande variabilidade nos custos de produção. Modelos de regressão linear múltipla foram utilizados para esse fim. Com os fatores identificados, objetivou-se determinar os valores adequados (condições ideais) que minimizam a resposta CEM no processo produtivo através de técnicas de superfície de respostas. Os resultados mostraram que a densidade básica da madeira (DB), o rendimento da madeira no processo (REND) e as perdas na produção (PERDAS) influenciam significativamente o CEM. As condições ideais identificadas foram: DB > 500 kg-seco/m<sup>3</sup>-sólido; REND > 57%; PERDAS < 14%. Conclui-se que, além de trazer contribuições para o planejamento de florestas, a abordagem estatística empreendida pode ser útil para o controle dos processos das indústrias de celulose e papel.

## Palavras-chave

Regressão linear múltipla. Produção de celulose. Análise de superfície de respostas. Consumo específico de madeira.

## 1. Introdução

Segundo Silva (2005), um dos fatores críticos para a competitividade internacional do papel brasileiro é a gestão do processo produtivo. Dentre os diversos fatores que influenciam os custos de produção de celulose e papel, o consumo específico de madeira (CEM) se destaca como um dos mais relevantes – Valverde, Soares e Silva (2006) e Gardner, Little e Arbuthnot (2007). Normalmente, o CEM é expresso em volume (m<sup>3</sup>) de madeira sólida necessária para a produção de uma tonelada de celulose. Dentre as variáveis que afetam CEM estão: a densidade básica da madeira recebida como matéria-prima (DB), o rendimento da madeira nos processos de polpação e branqueamento (REND) e as perdas de madeira que ocorrem no setor de produção de cavacos (PERDAS). Outros fatores, intimamente correlacionados com os anteriores, são: a dilatação ou contração da madeira em função de sua umidade, o teor de casca contida na madeira recebida e a perda de fibras para

o efluente no processo de lavagem da polpação e branqueamento – Moraes (2011).

Geralmente as indústrias medem o consumo específico de madeira numa base mensal, em função dos longos tempos de retenção entre a entrada da matéria-prima na área de preparação de madeira e a saída de celulose após o branqueamento. Nessa contabilização mensal estão computados todos os inventários necessários ao processo produtivo. De acordo com Moraes (2011), no Brasil, a variação do CEM nas diversas indústrias instaladas é de 3,55 m<sup>3</sup> a 4,50 m<sup>3</sup>-sólido por tonelada de celulose branqueada produzida. Em 2011, o Brasil produziu um total de 14,1 milhões de toneladas de celulose e de 9,9 milhões de toneladas de papel (ASSOCIAÇÃO..., 2012). Com isso, é fácil perceber a importância econômica de controlar o CEM, por ele influir significativamente nos custos de produção da celulose e evidenciar a necessidade do planejamento de terras e florestas

para a sustentabilidade da produção em alta escala (BACHMANN, 2009). A busca pela redução do CEM deveria ser enquadrada como uma evidência voluntária das práticas ambientais por parte das indústrias – ver Borges, Rosa e Ensslin (2010).

Para o presente artigo foi coletado um conjunto de dados sobre o CEM em uma indústria de celulose localizada no interior do estado de São Paulo, durante o período de janeiro/2004 a junho/2009 – totalizando 66 observações. Associado à resposta CEM foram identificadas as três covariáveis ou fatores previamente apresentados, que poderiam estar relacionados com a variabilidade desses dados: DB, REND e PERDAS. Algumas estatísticas descritivas desses dados são apresentadas na Tabela 1.

Para a análise estatística dos dados da indústria em questão inicialmente procedeu-se a uma transformação da resposta dada pelo inverso do consumo específico de madeira, definida como  $Y = 1/CEM$ . Essa transformação da resposta simplifica as interpretações, pois menor CEM significa maior valor da resposta Y e, também, melhora o ajuste do modelo de regressão linear múltipla que será empregado para a análise estatística dos dados. Cabe acrescentar que os interesses dos engenheiros de produção e administradores da indústria objeto de estudo são identificar os fatores importantes que influenciam a variabilidade da resposta CEM e determinar os níveis desses fatores que maximizam Y (condições ideais).

A Figura 1 apresenta os gráficos da resposta Y versus DB, REND e PERDAS.

A partir dos gráficos da Figura 1, algumas hipóteses preliminares relacionando as covariáveis com a resposta Y são apresentadas: aparentemente há uma queda do consumo de madeira (ou seja, Y cresce) com o aumento de DB e o aumento de REND. Para a outra covariável, PERDAS, observa-se um efeito inverso, isto é, Y decresce (aumento do consumo de madeira) quando a covariável PERDAS aumenta. Pode-se observar uma forte relação linear entre a variável resposta e as covariáveis DB, REND e PERDAS, com correlações de Pearson dadas por 0,702 (p-valor<0,001), 0,807 (p-valor<0,001) e, -0,494 (p-valor<0,001), respectivamente. Os p-valores estimados para o teste de correlação linear mostram correlações significativas ao nível de 5% de significância.

Apresentado o problema, definiu-se como objetivo central deste artigo verificar o efeito conjunto dessas covariáveis na resposta Y através de técnicas de regressão múltipla – ver, por exemplo, Draper e Smith (1981), Seber e Lee (2003) ou Montgomery e Runger (2011). Serão utilizadas técnicas de superfície ajustada para explorar o melhor modelo de regressão ajustado por mínimos quadrados para determinar regiões dos níveis das covariáveis (condições ideais) que otimizam Y dentro dos limites de variabilidade de cada covariável – ver, por exemplo, Myers (1971), Box e Draper (1987), Khuri e Cornell (1987) ou Montgomery (2009).

Grande parte dos estudos sobre CEM pertence à área florestal e, em geral, foram conduzidos laboratorialmente, com objetivos distintos dos apresentados acima (ver seção 2.4). Na literatura não foram identificados trabalhos que utilizassem dados reais de produção industrial (com a significativa amostra de 66 meses), considerando também a covariável perdas no processo (tais perdas são inevitáveis, na prática). Ressalta-se como principal contribuição deste trabalho a possibilidade de replicação das técnicas aqui empregadas para a determinação das condições ideais de REND, DB e PERDAS, as quais minimizam o consumo específico de madeira em outros sistemas produtivos reais, com escala industrial. A identificação das condições ideais permite recomendações para o processo produtivo e para o planejamento sustentável de florestas (ver seção 5).

Conforme Miguel (2007), metodologicamente este trabalho pode ser classificado como aplicado, de

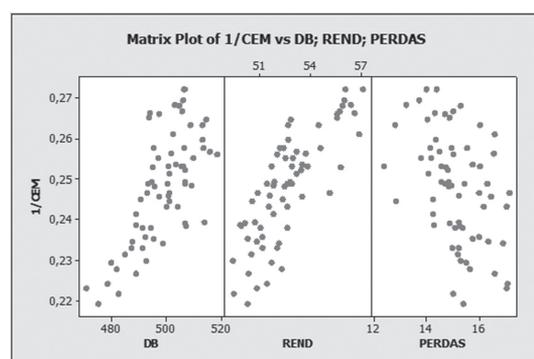


Figura 1. Inverso do consumo específico de madeira versus covariáveis.

Tabela 1. Estatísticas descritivas para os dados da indústria de celulose.

Variável	Unidade	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Consumo específico de madeira (CEM)	m <sup>3</sup> /t.celulose	4,05	0,22	3,68	4,56
Densidade básica (DB)	kg-seco/m <sup>3</sup>	498,99	10,1754	471,32	518,43
Rendimento da madeira (REND)	%, base seca	52,66	2,00	49,40	57,11
Perdas de madeira no processo (PERDAS)	%, base seca	16,08	1,66	12,11	20,59

objetivo descritivo e abordagem quantitativa. Bertrand e Fransoo (2002) definem a pesquisa quantitativa em Engenharia de Produção como aquela em que se modela um problema cujas variáveis apresentam relações causais e quantitativas. Nesse sentido, torna-se possível quantificar o comportamento das variáveis dependentes sob um domínio específico, permitindo ao pesquisador realizar previsões. Em geral, as pesquisas quantitativas utilizam modelagem matemática, estatística ou computacional (simulação) – especificamente, neste trabalho será adotada a modelagem estatística. Quanto às técnicas de pesquisa, serão utilizadas a pesquisa bibliográfica e a observação direta intensiva, segundo a classificação de Lakatos e Marconi (2008), ou a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso, conforme a classificação de Gil (2008).

O artigo é organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta brevemente o processo de produção de celulose, uma breve explanação sobre as covariáveis que afetam o consumo específico de madeira e uma revisão de trabalhos que relacionam CEM, REND e DB; na seção 3 será apresentada a modelagem estatística empreendida para abordar o problema; na seção 4 serão apresentados os resultados obtidos para os dados da indústria de celulose – disponibilizados em Apêndice; na seção 5 será realizada uma discussão dos resultados; e, finalmente, na seção 6 serão tecidas algumas considerações finais.

## 2. O processo de produção de celulose

De acordo com Magaton Silva et al. (2009), o processo kraft de produção de celulose pode ser considerado uma *commodity* por ser bem definido e de amplo domínio. De forma sucinta, pode-se dizer que sua principal função é dissolver e extrair a lignina da madeira, com o objetivo de liberar as fibras com o mínimo de degradação dos carboidratos (celulose e hemicelulose). Para maiores detalhes sobre o processo kraft recomenda-se a leitura de Shreve e Brink Junior (1997), Piotto (2003), Colodette et al. (2006), Neuberger (2008) e Moraes (2011).

O processo, ilustrado pela Figura 2, pode ser dividido em quatro áreas:

- 1) Linha de fibras;
- 2) Recuperação química;
- 3) Utilidades; e
- 4) Máquina de papel.

A linha de fibras é composta dos processos: preparação da madeira, cozimento, pré-lavagem e depuração, deslignificação com  $O_2$ , pós-lavagem, branqueamento, secagem e enfardamento da celulose. Essa linha possui ainda uma planta química para

produção de dióxido de cloro e armazenagem de peróxido de hidrogênio e soda cáustica, utilizados no processo de branqueamento.

O processo de recuperação química compõe-se de: evaporação e *stripping*, caldeira de recuperação, caustificação e forno de cal fornecendo  $CO_2$  para produção de carbonato de cálcio destinado à utilização no papel. Engloba também a armazenagem e preparação de enxofre e soda cáustica rayon para reposição das perdas de sódio e enxofre no ciclo de recuperação química.

A área de utilidades subdivide-se em: tratamento de água, tratamento de efluentes, desmineralização de água para as caldeiras, caldeira de biomassa, caldeira a óleo, turbinas e geradores, compressores e distribuição de ar comprimido e distribuição de energia elétrica e vapor.

A área de máquina de papel consome as fibras para confecção do papel utilizando a energia produzida nas áreas de utilidades e recuperação.

Na Figura 3 é possível observar a atuação dos fatores que afetam o consumo específico de madeira no processo de produção de celulose e papel (linha de fibras).

### 2.1. Densidade básica da madeira

Tradicionalmente, na área florestal, a unidade de medida para madeira é dada em volume ( $m^3$ -sólido), tanto para quantificação de inventário florestal como para comercialização e transporte. No entanto, a produção de celulose é mensurada em unidade de peso (t<sub>sa</sub>, tonelada seca ao ar), que demanda quantidade de madeira também em peso (t-seca, tonelada seca). Daí a necessidade de se conhecer a densidade básica da madeira ( $kg$ -seco/ $m^3$ -sólido) e verificar sua influência no consumo específico de madeira, em volume. Salienta-se que se o consumo específico de madeira fosse expresso em peso (ou seja, t-madeira seca por t<sub>sa</sub> de celulose) não seria afetado pela variável DB – exceto pela influência dessa no processo de produção de celulose, ou seja, pelas características da madeira. Para Gomide (2006), o desenvolvimento de florestas com árvores de densidade maior ou igual a 500  $kg$ -seco/ $m^3$ -sólido e que apresentam o máximo de rendimento no processo de polpação é a tendência atual de hibridação e clonagem em larga escala de árvores elite.

### 2.2. Perdas de madeira no processo industrial

Além da casca, resíduo indesejável no processo de produção de celulose, há de se considerar perdas de

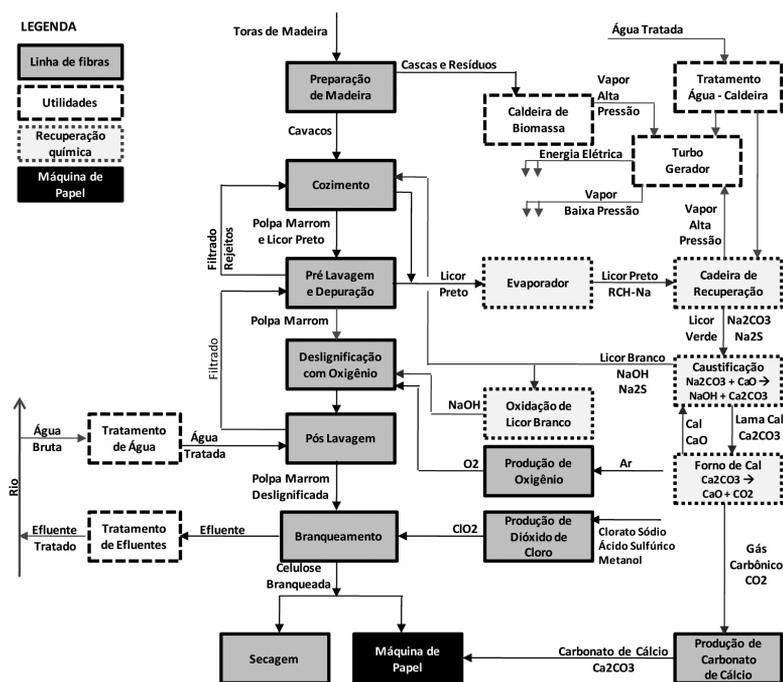


Figura 2. Visão geral do processo kraft de produção de celulose. Fonte: Moraes (2011).

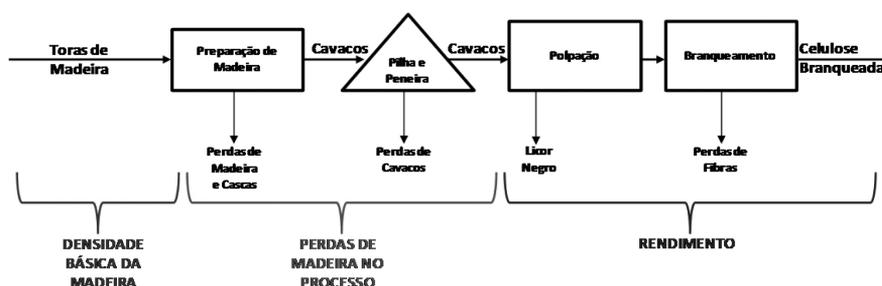


Figura 3. Atuação dos fatores que afetam o consumo específico de madeira no processo produtivo. Fonte: Moraes (2011).

madeira no processo de produção de celulose devido à quebra das toras no tambor descascador, o que gera toretes direcionados como resíduos através de fendas de retirada (de casca do tambor descascador) e das aberturas entre os rolos aceleradores após o tambor descascador. Também ocorrem perdas de madeira na forma de cavacos, principalmente na peneiragem, quando cavacos fora de especificação são rejeitados pela peneira e se incorporam aos resíduos, ou devido ao excesso de alimentação de cavacos para a peneira, o que provoca transbordo de cavacos bons para o rejeito.

Normalmente, a perda de madeira no processo varia de 10% a 18% em peso, base seca, do total de madeira com casca consumida, sendo 8% a 12% desse total representado pelas cascas, ou seja, as perdas de madeira no seu processamento podem variar de 2%

a 8%, dependendo de como estão sendo efetuadas as operações em termos de geração de toretes no descascamento e de rejeição de cavacos na peneiragem.

### 2.3. Rendimento da madeira

De um total de 70% de celulose e hemicelulose contidos na madeira, somente entre 49% e 56% serão transformados em polpa branqueada, ou seja, celulose. Isso se deve principalmente à dissolução da celulose e hemicelulose no processo de polpação, onde esses materiais fibrosos se dissolvem juntamente com a lignina, no licor preto destinado à queima do material orgânico (fonte de energia), à recuperação de químicos, na área de recuperação e também, em menor escala, ao rejeito de processo de depuração,

para retirada de impurezas da celulose branqueada (que representam entre 0,1% a 0,5% da produção, dependendo do tipo de equipamento e das condições da manutenção efetuada) – Gomide (2006). De uma maneira geral, quanto maior o rendimento, menor o consumo de madeira para produção de uma tonelada de celulose.

#### 2.4. Revisão da literatura

Alguns poucos estudos da área florestal relacionam DB, REND e CEM.

Maron e Neves (2004) analisaram que misturas de outras espécies de madeira com *Eucalyptus grandis* podem promover um aumento na densidade básica, uma pequena diminuição do rendimento da polpação e uma queda sensível do consumo específico de madeira.

Bassa, Silva Junior e Sacon (2007), a partir de experimentos laboratoriais, afirmam que a mistura de 10% de *Pinus taeda* ao *Eucalyptus grandis* melhora o rendimento da polpação e o consumo específico de madeira.

Gardner, Little e Arbuthnot (2007) compararam a eficiência econômica (função do CEM) de várias espécies de madeira do sul da África na produção de celulose utilizando como covariáveis REND e DB. Em geral, o estudo mostra que quanto maior a DB, maior o REND e menor o CEM.

Mokfienski et al. (2008), a partir de amostras de cavacos de eucalipto, concluíram que menor DB implica em maior REND. Contudo, o CEM é menor para o eucalipto com maior DB.

Guerra et al. (2008) identificaram forte correlação entre o REND e o CEM de clones de *Eucalyptus globulus* com idade entre 5 e 7 anos plantados em uma mesma área geográfica.

Magaton Silva et al. (2009), a partir de procedimentos experimentais com eucaliptos, concluíram que: (1) o CEM é mais fortemente afetado por DB do que por REND – afirmação corroborada pelo estudo de Demuner (2011); (2) REND não apresenta relação com qualquer outra propriedade da madeira, dentre outras afirmações.

Gomide, Fantuzzi Neto e Regazzi (2010) analisaram 75 amostras de clones de eucalipto e identificaram que o teor de lignina e o de extrativos são os principais critérios de qualidade da madeira que afetam significativamente o rendimento da polpação kraft. Os autores afirmam que a DB não afeta significativamente o REND, mas sim o CEM para produção de celulose.

Sansígolo e Ramos (2011) compararam a qualidade de amostras de eucalipto plantadas em três fazendas distintas e identificaram que a densidade básica

possui relação com o REND e com o CEM – maior DB promove um maior REND e um menor CEM.

Observa-se que a maioria dos trabalhos acima são estudos experimentais da área florestal, com variáveis controladas – amostras são coletadas nas florestas e o processo de cozimento/branqueamento é realizado em laboratório para analisarem-se as relações entre DB, REND e CEM. Tais situações não conseguem retratar a escala e a realidade industrial – como, por exemplo, a existência de perdas no processo (PERDAS). Em nenhum dos trabalhos acima observou-se a utilização de técnicas para a determinação dos níveis de REND e DB que minimizassem o CEM (condições ideais). Para se alcançar esse objetivo, o presente trabalho utiliza uma ampla base de dados industriais (66 meses) que, na prática, incluem as perdas ocorridas no processo, as diferentes densidades básicas e rendimentos das matérias-primas provenientes de diversas espécies (incluindo clones) e idades.

#### 2.5. Modelagem estatística

Para analisar os dados de consumo específico de madeira na indústria de celulose, utilizou-se um modelo de regressão linear múltiplo considerando as três covariáveis introduzidas na Tabela 1 (ver dados no Apêndice). Assim, considerando-se a resposta Y transformada, supõe-se um modelo de regressão linear múltiplo dado por

$$y_i = \beta_0 + \beta_1(x_{1i} - \bar{x}_1) + \beta_2(x_{2i} - \bar{x}_2) + \beta_3(x_{3i} - \bar{x}_3) + \varepsilon_i \quad (1)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, 66$ ;  $\varepsilon_i$  são erros aleatórios supostos como independentes, com uma distribuição normal com média zero e variância constante  $\sigma^2$ ;  $x_{1i}$  denota a densidade básica (DB) para a  $i$ -ésima observação;  $x_{2i}$  denota as perdas em madeira (PERDAS) para a  $i$ -ésima observação;  $x_{3i}$  denota o rendimento de madeira (REND)

para a  $i$ -ésima observação;  $\bar{x}_l = \sum_{i=1}^n x_{li} / n, l = 1, 2, 3$  são as médias amostrais para cada covariável considerada. Observar que, usando as variáveis independentes transformadas e centralizadas em sua média, temos essas variáveis com valores centrais iguais a zero; essa transformação é importante para usar técnicas de superfície de respostas, onde obtemos direções do máximo da superfície partindo dos valores centrais das variáveis independentes (ver, por exemplo, MYERS, 1971).

Para a procura do ponto ótimo da superfície ajustada (maior resposta Y, isto é, menor consumo de madeira), utilizam-se técnicas de superfície de respostas.

Considerando-se modelos de primeira ordem, isto é, modelos de regressão incluindo só termos lineares,

utiliza-se uma técnica exploratória (*steepest ascent*) para encontrar as regiões da superfície que otimizam a resposta – ver, por exemplo, Myers (1971).

Supor que o modelo ajustado por mínimos quadrados seja dado por

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{l=1}^k b_l z_l \tag{2}$$

onde  $b_l$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots, k$  são EMQ (estimadores de mínimos quadrados) dos parâmetros de regressão  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ . No caso,  $k = 3$ .

Com as covariáveis  $z_{li}$  transformadas e iguais a  $(x_{li} - \bar{x}_l) / s_l$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $l = 1, \dots, k$  o centro da variabilidade das covariáveis é dado por:  $z_1 = 0, z_2 = 0, \dots, z_k = 0$ . Para achar os valores de  $z_1, z_2, \dots, z_k$  que maximizam a resposta  $b_0 + \sum_{l=1}^k b_l z_l$  sujeito à restrição  $\sum_{l=1}^k z_l^2 = R^2$  (uma hiperesfera de dimensão  $k$  e raio  $R$  fixado), é apresentada a função a ser maximizada, dada por

$$Q(z_1, \dots, z_k) = b_0 + \sum_{l=1}^k b_l z_l - \mu \left( \sum_{l=1}^k z_l^2 - R^2 \right) \tag{3}$$

onde  $\mu$  é um multiplicador de Lagrange, usualmente considerado em problemas de otimização. O método dos multiplicadores de Lagrange permite encontrar extremos (máximos e mínimos) de uma função de uma ou mais variáveis suscetíveis a uma ou mais restrições. O método dos multiplicadores de Lagrange também garante uma condição necessária para a otimização em problemas de otimização com restrição (ver, por exemplo, BERTSEKAS, 1999).

Observar que é necessário fixar diferentes valores de  $R$  (raio da hiperesfera) para determinar o caminho ou direção do máximo da superfície de respostas. Esses valores são obtidos resolvendo-se as equações

$$\begin{aligned} \partial Q / \partial z_j &= b_j - 2\mu z_j = 0, \\ \partial Q / \partial \mu &= - \left[ \sum_{l=1}^k z_l^2 - R^2 \right] = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

De 4, encontra-se

$$z_j = \frac{b_j}{2\mu} \tag{5}$$

para  $j = 1, \dots, k$ .

Observar que na prática é mais simples selecionar valores de  $\mu$  que correspondam a valores nas variáveis independentes as quais correspondam a aumentos na variável  $Y$  (ver, por exemplo, MYERS, 1971). Essa escolha é arbitrária. Daí, esse procedimento continua à procura da direção do máximo (ou mínimo) da superfície ajustada, tomando cuidado para não extrapolar para valores fora dos limites de variação das covariáveis.

### 3. Resultados obtidos

Usando o *software* Minitab® versão 14 e considerando-se o modelo 1, onde a resposta  $Y$  foi multiplicada por 10 mil (um procedimento usado apenas com a finalidade computacional de transformar a variável resposta sem implicações nas interpretações), construiu-se a Tabela 2, contendo os estimadores de mínimos quadrados (EMQ) para os coeficientes de regressão do modelo, os erros padrão (EP) dos estimadores obtidos, a estatística  $t$  de Student observada e os valores- $p$ .

Um estimador da variância  $\sigma^2$  do erro é dado a partir da soma de quadrados residual por  $S^2 = 1.622,49$  – ver, por exemplo, Draper e Smith (1981), Chatterjee, Hadi e Price (1999) –; o coeficiente de determinação que mede a qualidade do ajuste do modelo aos dados é igual à  $R^2 = 0,915$  (um indicativo do excelente ajuste do modelo aos dados). A adequabilidade do modelo (normalidade dos erros, variância constante, erros não correlacionados) também é verificada a partir de gráficos dos resíduos (ver Figura 4).

Dos resultados da Tabela 2 observa-se que as covariáveis densidade básica (DB), perdas de madeira no processo (PERDAS) e rendimento (REND) apresentam efeitos significativos na resposta  $Y$ , pois os valores- $p$  correspondentes são menores do que 0,05. Esses resultados corroboram as hipóteses preliminares dos dados, apresentadas na seção 1.

Dos estimadores de mínimos quadrados (EMQ) para os parâmetros de regressão  $\beta_l$ ,  $l = 1, 2, 3$ , observa-se que aumentos na DB e no REND ( $\beta_1 = 5,90$  e  $\beta_3 = 43,49$ ) levam a um aumento médio na resposta  $Y$ , pois os sinais dos estimadores são positivos. Dessa forma, pode-se concluir, há queda no consumo médio

Tabela 2. Estimadores de mínimos quadrados.

Preditor	EMQ para $\beta_l$	EP do estimador	Estatística $t$	valor- $p$
Constante	-2.404,10	307,60	-7,82	0,00(*)
Densidade básica (DB)	5,90	0,54	10,84	0,00(*)
Perdas de madeira no processo (PERDAS)	-23,30	5,10	-4,54	0,00(*)
Rendimento da madeira (REND)	43,49	2,63	16,57	0,00(*)

(\*) – significativo em 5%.

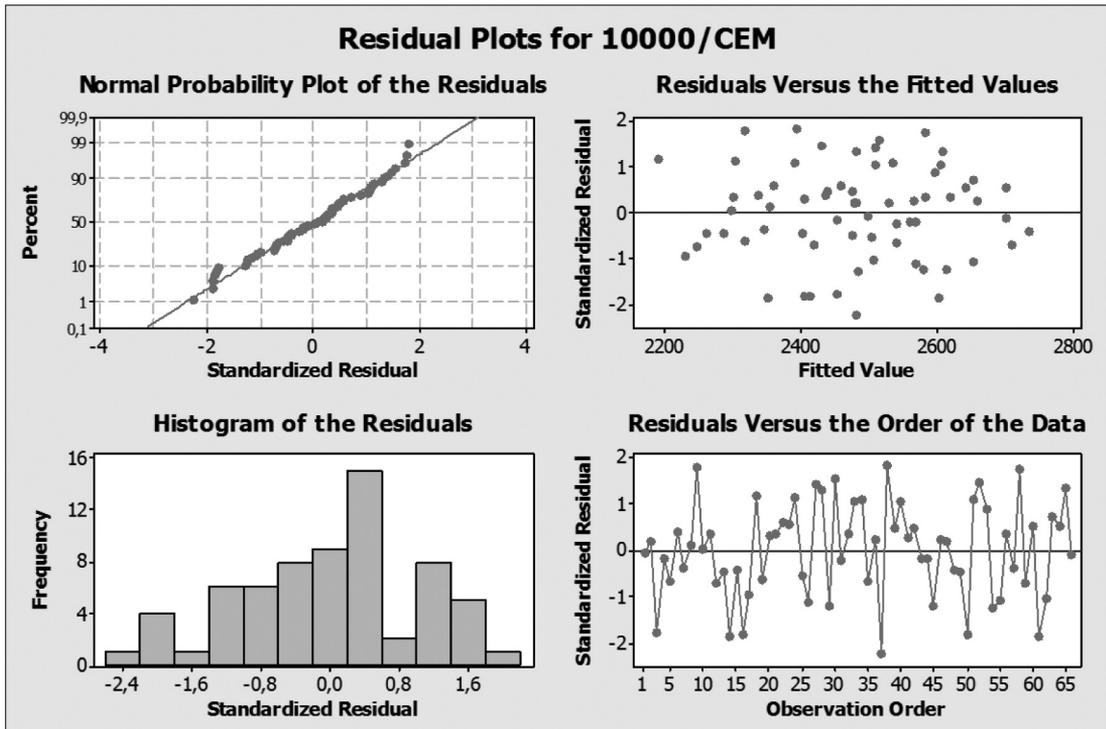


Figura 4. Gráficos dos resíduos padronizados.

de madeira com o aumento dos valores desses fatores (densidade básica e rendimento de madeira). Da mesma forma, um aumento nos níveis de PERDAS leva a um aumento médio no consumo de madeira ( $\beta_2 = -23,30$ ), pois os sinais dos EMQ são negativos.

O modelo de primeira ordem ajustado é dado por

$$(10.000/CEM) = -2.404,10 + 5,90 (DB) - 23,30 (PERDAS) + 43,49 (REND) \quad (6)$$

onde as covariáveis DB, PERDAS e REND são dadas nas formas transformadas  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ , respectivamente, com médias iguais a zero, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 5.

Com a superfície ajustada dada por 6 é possível fazer previsões para valores especificados das covariáveis  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  e encontrar os níveis dos fatores (ou variáveis independentes) que otimizam a resposta Y dentro dos limites observados para as covariáveis:  $-27,67 \leq Z_{1i} \leq 19,44$ ;  $-2,706 \leq Z_{2i} \leq 2,022$  e  $-3,264 \leq Z_{3i} \leq 4,446$ .

A partir do centro, onde os valores das covariáveis transformadas são iguais à zero ( $Z_1 = 0$ ,  $Z_2 = 0$ ,  $Z_3 = 0$ ), a superfície ajustada é explorada na direção da região do máximo da resposta Y.

Para isso, fixam-se valores do raio da hipersfera de dimensão igual a 3 que satisfazem a equação

$$\sum_{i=1}^3 z_i^2 = R^2.$$

Uma alternativa é fixar um aumento em uma unidade em uma das covariáveis. No caso, optou-se por  $Z_1$ ; daí, determinar o valor de  $\mu$  (multiplicador de Lagrange em 3, dado pela Equação 5,  $\mu = b_j / (2z_j)$ ,  $j = 1, 2, 3$ ).

Assim, com  $Z_1 = 0,1$ , encontrou-se  $\mu = 5,9017 / [2(0,1)] = 29,5085$  onde  $b_1 = 5,9017$  é o EMQ de  $\beta_1$  (ver Tabela 2). Com esse valor de  $\mu$ , determinaram-se valores das covariáveis  $Z_2$  e  $Z_3$  na direção dos valores maiores da resposta Y obtidos a partir da Equação 5, ou seja,

$$Z_j = \frac{b_j}{2\mu}$$

onde  $j = 2,3$  e  $b_j$  é o EMQ de  $\beta_j$  dado na Tabela 2. Assim,  $Z_2 = b_2 / 2\mu = -23,301 / [2(29,5085)] = -0,394818$ . Da mesma forma foi determinado  $Z_3 = 43,491 / [2(29,5085)] = 0,736923$ .

Observar que, em geral, no estudo da superfície de respostas seria necessário fazer novos experimentos com os valores das covariáveis encontrados na direção do máximo da superfície, no caso com os níveis  $Z_1 = 0,1$ ,  $Z_2 = -0,394818$  e  $Z_3 = 0,736923$  - ver, por exemplo, Box, Hunter e Hunter (1978). Como no caso não se dispõe de um estudo experimental, utilizou-se o modelo ajustado 6 para encontrar um valor de previsão para a resposta.

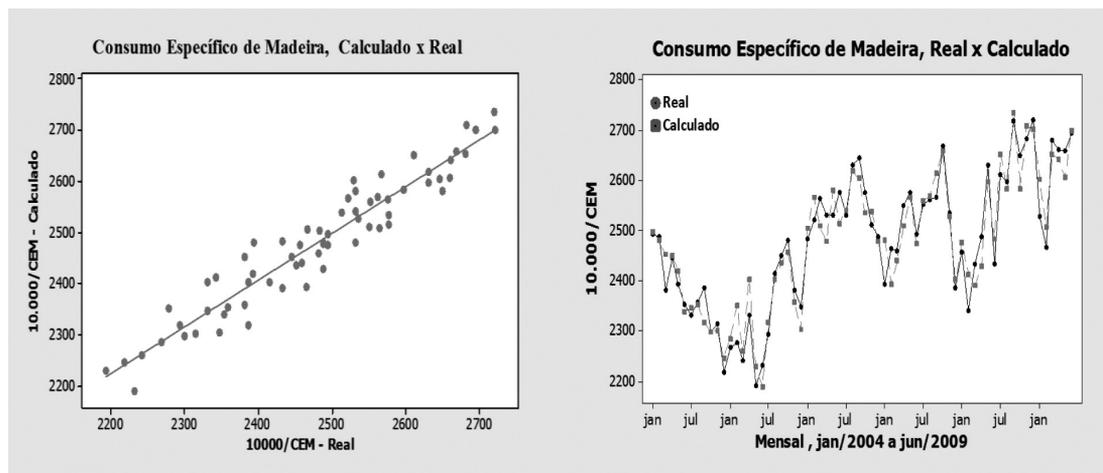


Figura 5. Modelo de primeira ordem ajustado.

Assim, considerando como base inicial para o estudo exploratório as condições (centro da hypersfera de dimensão 3)  $Z_1 = 0, Z_2 = 0$  e  $Z_3 = 0$ , caminhou-se na superfície ajustada na direção do máximo, tomando cuidado para não extrapolar os valores da variabilidade das covariáveis.

Refazendo o mesmo procedimento considerando  $Z_1 = 0,2$ , encontraram-se os valores  $\mu = 14,7543, Z_2 = -0,789634$  e  $Z_3 = 1,47384$  na direção do máximo da superfície ajustada. Considerando  $Z_1 = 0,3$ , encontrou-se  $\mu = 9,83617, Z_2 = -1,18445$  e  $Z_3 = 2,21077$ ; com  $Z_1 = 0,4$ , encontrou-se  $\mu = 7,37713, Z_2 = -1,57927$  e  $Z_3 = 2,94769$ ; com  $Z_1 = 0,5$ , encontrou-se  $\mu = 5,90170, Z_2 = -1,97409$  e  $Z_3 = 3,68462$ ; com  $Z_1 = 0,6$ , encontrou-se  $\mu = 4,91808, Z_2 = -2,36891$  e  $Z_3 = 4,42154$ ; com  $Z_1 = 0,7$ , encontrou-se  $\mu = 4,21550, Z_2 = -2,76373$  e  $Z_3 = 5,15846$ .

Observar na Tabela 3 que o procedimento exploratório deve ser interrompido na base + 6d para que todas as covariáveis transformadas tenham níveis dentro dos limites de variação observados, ou seja,  $-27,67 \leq Z_{1i} \leq 19,44; -2,706 \leq Z_{2i} \leq 2,022$  e  $-3,264 \leq Z_{3i} \leq 4,446$ . Isso não ocorre na base + 7d, onde os níveis das variáveis  $Z_2 (-2,76373)$  e  $Z_3 (5,15846)$  extrapolam os limites  $-2,706 \leq Z_{2i} \leq 2,022$  e  $-3,264 \leq Z_{3i} \leq 4,446$ .

Assim encerrou-se o procedimento exploratório, ficando-se com os níveis  $Z_1 = 0,6, Z_2 = -2,36891$  e  $Z_3 = 4,42154$  com resposta estimada igual à 2.730,07 (ou inverso de consumo específico de madeira igual a 0,2730).

É importante salientar que novos resultados deveriam ser explorados em torno dos níveis  $Z_1 = 0,6, Z_2 = -2,36891$  e  $Z_3 = 4,42154$  para explorar possíveis direções que minimizem o consumo específico de madeira (ou maximizar seu inverso).

Tabela 3. Valores das covariáveis na direção do máximo da superfície ajustada (menor consumo de madeira).

Valores	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	Resposta 10.000/CEM
Base	0,0000	0,0000	0,0000	2.404,10
d	0,1000	-0,3948	0,7364	
Base +d	0,1000	-0,3948	0,7364	2.520,85
Base +2d	0,2000	-0,7896	1,4738	2.562,69
Base +3d	0,3000	-1,1845	2,2108	2.604,54
Base +4d	0,4000	-1,5793	2,9478	2.646,38
Base +5d	0,5000	-1,9741	3,6846	2.688,23
Base +6d	0,6000	-2,3689	4,4215	2.730,07
Base +7d	0,7000	-2,7637	5,1585	2.771,92

De posse dos níveis ideais para as covariáveis ( $Z_1 = 0,6, Z_2 = -2,36891$  e  $Z_3 = 4,42154$ ), determinou-se o consumo específico de madeira ideal igual a 3,6630 ( $m^3/t.Cel$ ) – a partir de 6 – dado por  $\hat{y} \times 10.000 = 2.730,07$  (ou  $\hat{y} = 0,2730$ ), que corresponde aos valores na escala original  $X_1 = 499,589$  (densidade básica),  $X_2 = 12,7321$  (perdas de madeira no processo),  $X_3 = 57,0854$  (rendimento da madeira).

#### 4. Discussão dos resultados obtidos

A Tabela 4 ilustra as diferenças em custo de dispêndio de madeira e área florestal necessária para manter uma produção anual de 1 milhão de toneladas de celulose. Comparando-se o caso 1 de alta eficiência com o caso 2 de baixa eficiência, encontram-se diferenças de + 28% no dispêndio de custo de madeira e de + 70% na área necessária.

Face à grande influência do consumo específico de madeira no custo variável de produção de celulose, o adequado controle dos fatores que o afetam contribui de forma significativa no bom desempenho econômico do negócio. A modelagem matemática, através da

Tabela 4. Quadro comparativo de consumo de madeira.

Caso	CEM (m <sup>3</sup> /t.Cel)	Preço madeira (R\$/m <sup>3</sup> )	Custo específico (R\$/t.Cel)	Produção celulose (t.Cel/ano)	Dispendio de madeira (MR\$/ano)	Produtividade florestal (m <sup>3</sup> /ha.ano)	Área florestal (ha)
1	3,5	60	210	1.000.000	210	40	87.500
2	4,5	60	270	1.000.000	270	30	150.000

Fonte: Moraes (2011).

utilização da técnica estatística de regressão linear múltipla, auxilia na determinação dos pesos desses fatores, visando decisões para ações de controle nos valores ótimos, para o mínimo de consumo específico de madeira. A Figura 6 ilustra, em gráficos de superfície, a influência desses fatores no CEM.

Dessa forma pode-se argumentar que para minimizar o consumo específico de madeira (menor que 3,67 m<sup>3</sup>/t-celulose), é possível propor as seguintes ações:

- Corroborando Gomide (2006), o desenvolvimento de florestas com árvores de densidade básica maior que 500 kg-seco/m<sup>3</sup>-sólido e que apresentem o máximo de rendimento (maior que 57%) no processo de polpação através de um direcionamento da pesquisa e desenvolvimento para a hibridação e clonagem em larga escala de árvores elite de eucalipto;
- Pesquisa e desenvolvimento direcionados à obtenção de um rendimento da madeira maior que 57% no processo de produção de celulose, através do aprimoramento e desenvolvimento de novas tecnologias – ver, por exemplo, Bassa, Silva Junior e Sacon (2007), Moraes (2011) e Segura (2012) –, como o cozimento *Lo solids*<sup>®</sup> da tecnologia Andritz ou o *compact cooking* de tecnologia Metso, duplo estágio de deslignificação com oxigênio e branqueamento ECF (celulose sem o uso de cloro elementar), assim como a utilização de aditivos no processo de cozimento, como antraquinona, surfactantes e polissulfetos;
- Maior controle das perdas de madeira no processo – em muitos casos, é onde se encontra o maior potencial de redução no consumo específico de madeira, principalmente devido à falta de medição e controle dessas perdas. Algumas ações são altamente recomendadas na área de preparação de madeira, visando obter uma perda de madeira menor que 13%:
  - Identificar as principais causas de geração de toretes (quebras de toras) no tambor descascador como, por exemplo, controle do tempo após corte da madeira na floresta (teor de umidade da madeira), comprimento ideal da tora em relação às dimensões do tambor descascador, nível adequado de toras na operação do tambor descascador, rotação adequada do tambor descascador e controle do desgaste da abertura das fendas do tambor descascador, mínimo de distância da

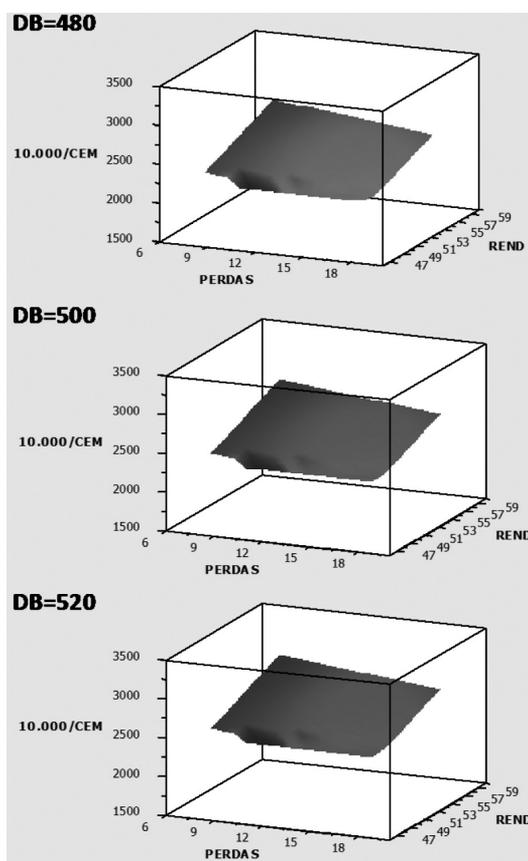


Figura 6. Consumo específico de madeira X Fatores de influência.

abertura entre rolos aceleradores e, se possível, instalar rolinhos de 50 mm de diâmetro entre as aberturas maiores;

- Controle adequado do tempo de uso das lâminas do picador, com o objetivo de evitar a formação excessiva de cavacos grandes e de lascas, que certamente serão rejeitados na peneira de cavacos.

Em suma, grandes investimentos são feitos para o desenvolvimento de clones de árvores elite, na aquisição de terras para o reflorestamento e no desenvolvimento de equipamentos e químicos para a obtenção de maior rendimento, não se justificando assim manter altos níveis de perda de madeira no processamento.

## 5. Considerações finais

Em função da natureza quantitativa e descritiva deste trabalho, optou-se por verificar se a utilização da técnica de modelagem por regressão linear múltipla é uma ferramenta viável, alternativa aos modelos teóricos (com base fenomenológica). A modelagem mostrou-se capaz para abordar um processo de complexidade reconhecida: a interdependência entre as variáveis de influência no resultado econômico da indústria de celulose e papel, relacionadas ao consumo específico de madeira de eucalipto.

Os resultados da regressão linear múltipla dos dados industriais corroboram os efeitos de DB e REND sobre o CEM reportados por Gardner, Little e Arbuthnot (2007), Gomide, Fantuzzi Neto e Regazzi (2010) e Sansígolo e Ramos (2011). Contudo, apresentaram alguma divergência com os resultados obtidos por Mokfienski et al. (2008), Magaton Silva et al. (2009) e Demuner (2011) quanto ao peso de influência de DB e REND sobre o CEM. Salienta-se que as condições experimentais (prática industrial versus experimentos laboratoriais) e as variáveis (espécies de madeira, idades, misturas etc.) utilizadas em cada estudo são distintas, o que sugere novos estudos.

Com o emprego das técnicas de superfície de respostas, foram identificadas as condições ideais para o CEM na indústria objeto de estudo: densidade básica da madeira superior a 500 kg/m<sup>3</sup>, rendimento da madeira superior a 57% e níveis de perda de madeira no processo inferiores a 13%, garantindo um CEM menor que 3,67 m<sup>3</sup>/t-celulose. A determinação dessas condições ideais propiciaram recomendações (apresentadas na seção 5) quanto ao planejamento e ao controle dos processos industriais (processos de polpação e controle das perdas), bem como quanto ao direcionamento de pesquisas para o desenvolvimento de clones de eucaliptos.

As técnicas aqui empreendidas possibilitam a replicação de estudos similares em outras unidades fabris (a partir de dados reais), visando sua eficiência econômica e, consequentemente, a sustentabilidade da cadeia industrial de celulose e papel. Ratifica-se que as condições ideais de CEM aqui reportadas não foram encontradas na literatura industrial.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA. *Dados do setor de fevereiro 2012*. São Paulo, 2012. Disponível em <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2012.

BACHMANN, D. Benchmarking dos processos em fábricas de celulose. *O Papel*, n. 8, p. 66-70, ago. 2009.

BASSA, A. G. M. C.; SILVA JUNIOR, F. G.; SACON, V. M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose *Kraft* através do Processo Lo-Solids®. *Scientia Forestalis*, n. 75, p. 19-29, set. 2007.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241-261, 2002. <http://dx.doi.org/10.1108/01443570210414338>

BERTSEKAS, D. P. *Nonlinear Programming*. 2nd ed. Cambridge: Athena Scientific, 1999.

BORGES, A. P.; ROSA, F. S.; ENSSLIN, S. R. Evidenciação voluntária das práticas ambientais: um estudo nas grandes empresas brasileiras de papel e celulose. *Produção*, v. 20, n. 3, p. 404-417, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132010005000034>

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. *Empirical model building and response surfaces*. New York: Wiley, 1987.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building*. New York: Wiley, 1978.

CHATTERJEE, S.; HADI, A. S.; PRICE, B. *Regression analysis by example*. New York: Wiley, 1999.

COLODETTE, J. L. et al. Branqueamento de Polpa Kraft de Eucalipto: nível atual da técnica e novos desenvolvimentos. *O Papel*, v. 67, n. 9, p. 88-110, set. 2006.

DEMUNER, P. W. Predição do Impacto da madeira em fábrica KRAFT de Eucalipto. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 44., 2011, São Paulo. *Resumos...* São Paulo: ABTCP, 2011. CD-ROM.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. Wiley series in probability and mathematical statistics, 1981.

GARDNER, R. A. W.; LITTLE, K. M.; ARBUTHNOT, A. Wood and fibre productivity potential of promising new eucalypt species for coastal Zululand, South Africa. *Australian Forestry*, v. 70, n. 1, p. 37-47, 2007. <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2007.10676261>

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMIDE, J. L. Produção de Celulose de *Eucalyptus* no Brasil: Desafios e Novos Desenvolvimentos. In: CONGRESSO ABTCP/TAPPI, 2006, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SOBER, 2006. CD-ROM.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose *Kraft*. *Revista Árvore*, v. 34, n. 2, p. 339-344, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622010000200017>

GUERRA, A. et al. Influence of Lignin Structural Features on *Eucalyptus globulus* Kraft Pulp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 47, n. 22, p. 8542-8549, 2008. <http://dx.doi.org/10.1021/ie800320d>

KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. *Response surfaces: designs and analyses*. New York: Marcel Dekker, 1987.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de metodologia científica*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

MAGATON SILVA, A. et al. *Eucalyptus* Wood Quality and Its Impact on Kraft Pulp Production and Use. *Tappi Journal*, p. 32-40, ago. 2009.

- MARON, A.; NEVES, J. M. Utilização de misturas de cavacos industriais com resíduos de serraria provenientes de madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes idades para produção de Pasta Kraft. *Revista Ciência Florestal*, v. 14, n. 1, p. 205-221, 2004.
- MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução *Produção*, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132007000100015>
- MOKFIENSKI, A. et al. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. *Ciência Florestal*, v. 18, n. 3, p. 401-413, 2008.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. New York: Wiley, 2009.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. New York: Wiley, 2011.
- MORAES, F. A. B. *Modelo para avaliação do consumo específico de madeira e insumos energéticos no processo de produção de celulose e papel*. 2011. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2011.
- MYERS, R. H. *Response surface methodology*. Boston: Allyn and Bacon, 1971.
- NEUBERGER, R. *Boas práticas de operação e manutenção para redução de odores na produção de celulose Kraft: uma abordagem qualitativa*. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos)-Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2008.
- PIOTTO, Z. C. *Eco-eficiência na indústria de celulose e papel*. 2003. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SANSÍGOLO, C. A.; RAMOS, E. S. Quality of wood and pulp from a clone of *Eucalyptus grandis* planted at three locations. *Cerne*, v. 17, n. 1, p. 47-60, 2011.
- SEBER, G. A. F.; LEE, A. J. *Linear regression analysis*. 2nd ed. Wiley series in probability and mathematical statistics, 2003.
- SEGURA, T. E. S. *Avaliação das Madeiras de Eucalyptus randis vs Eucalyptus urophylla e Acacia mearnsii para produção de celulose Kraft pelos Processos convencional e Lo-Solids®*. 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", Piracicaba, 2012.
- SHREVE, R. N.; BRINK JUNIOR, J. A. *Indústrias de Processos Químicos*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 732 p.
- SILVA, C. L. Competitividade internacional da indústria brasileira exportadora de papel de imprimir e escrever à luz da cadeia de valor. *Produção*, v.15, n. 1, p. 114-126, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132005000100010>
- VALVERDE, S. R.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L. Desempenho das exportações brasileiras de celulose. *Revista Árvore*, v. 30, n. 6, p.1017-1023, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622006000600017>

## Optimal conditions for wood consumption in cellulose production

### Abstract

This study presents a statistical modeling approach for wood consumption in the cellulose industry. One of the goals of the cellulose industry is to identify the factors that can affect wood consumption (CEM) and cause high variability in production costs. Multiple linear regression models were used for this purpose. After the factors of influence were identified (for optimal conditions), the goal was to determine their appropriate values to minimize CEM in the production process, using response surface methods. The results showed that three factors affect wood consumption: the basic density (DB) of the wood received, the Kraft pulp yield (REND), and wood losses that occur during the production process (PERDAS). The optimal conditions identified are DB > 500 kg-dry/m<sup>3</sup>-solid, REND > 57% and PERDAS < 13%. The statistical approach taken in this work is concluded to be useful in process control in the cellulose industry and can also provide insights useful to forest planning.

### Keywords

Multiple linear regression. Cellulose production. Response surface analysis. Pulp wood specific consumption.

Apêndice

Anos 04/05/06/07/08/09 Média Mensal	Dados para análise do consumo específico de madeira e fatores de influência													
	Consumo Específico Madeira m <sup>3</sup> -sólido/Adt	Teor Seco Entrada Pilha Cavacos (%)	Densidade Aparente Madeira Recebida kg/m <sup>3</sup>	Densidade Básica Saída Pilha kg/m <sup>3</sup>	Rendimento Madeira (%)	Resíduo Base Umida (%)	Balança Biomassa ton.úmida	Teor Seco Biomassa (%)	Balança Entrada Pilha ton.úmida	Teor Resíduo Seco (%)	Teor Seco Madeira Recebida (%)	RENDT		
	CEM	TSCE	DA	DB	REND	PERDAS-UM	BB	TSB	BC	PERDAS	TSME	RENDT		
j/04	4,010	56,144	931,380	506,867	51,850	16,042	506,516	51,200	2929,818	14,821	55,416	47,689		
	4,020	56,466	927,520	506,804	51,400	15,816	453,518	51,800	2623,267	14,688	55,778	47,497		
	4,200	54,146	948,710	494,631	52,620	15,563	725,938	52,100	3398,711	15,075	53,786	46,350		
	4,090	57,872	908,410	501,211	50,520	13,300	491,945	55,635	3206,888	12,852	57,575	46,508		
	4,180	56,888	917,000	506,871	50,100	15,300	563,780	55,006	3121,056	14,869	56,600	45,860		
	4,250	52,992	968,030	495,489	50,240	17,714	565,183	46,182	3202,702	15,741	51,971	45,868		
	4,290	54,495	946,470	487,376	51,120	15,760	601,090	51,338	3212,934	14,984	53,997	45,194		
	4,240	54,926	940,360	492,623	51,130	16,530	633,850	52,783	3200,693	15,988	54,572	45,663		
	4,190	56,609	916,000	489,243	49,830	15,102	432,328	53,150	3105,547	14,286	56,186	46,026		
	4,350	54,474	948,000	492,946	49,400	16,339	589,623	50,342	3432,364	15,269	53,868	44,516		
	4,320	54,375	946,000	485,245	50,490	16,228	561,012	50,354	3294,743	15,191	53,790	45,002		
	4,510	54,355	950,590	482,904	49,430	16,180	633,861	49,752	3283,700	15,015	53,610	42,913		
j/05	4,410	53,118	969,780	489,164	50,320	18,620	714,399	46,073	3122,332	16,559	51,806	44,020		
	4,390	52,373	979,970	482,253	52,270	18,100	804,298	43,952	3639,338	15,645	50,849	44,383		
	4,460	51,844	980,470	478,734	51,410	18,730	790,475	46,281	3429,892	17,063	50,802	44,110		
	4,290	53,025	969,410	491,506	52,000	17,100	162,812	46,105	789,307	15,208	51,842	45,348		
	4,560	53,623	958,000	475,613	50,260	17,010	644,681	47,597	3145,331	15,293	52,598	42,689		
	4,480	51,857	974,000	471,322	50,780	18,543	640,467	46,969	3699,038	17,032	51,135	44,193		
	4,360	53,044	965,210	480,310	51,710	17,102	625,423	47,349	3781,772	15,502	52,236	44,798		
	4,140	55,653	929,000	489,133	51,790	14,976	518,017	52,466	3601,212	14,221	55,252	46,719		
	4,080	55,352	936,000	490,855	52,330	15,234	612,570	51,261	3814,185	14,254	54,786	47,308		
	4,030	56,964	916,000	495,812	52,470	15,667	611,252	53,438	3290,328	14,841	56,412	47,555		
	4,200	54,847	945,190	491,624	51,020	16,351	682,519	50,882	3491,698	15,350	54,198	45,928		
	4,260	54,043	946,000	487,750	50,800	16,721	718,300	52,463	3577,387	16,312	53,779	45,916		
j/06	4,028	56,304	927,000	509,231	51,770	15,493	700,000	53,942	3818,136	14,940	55,938	47,565		
	3,965	55,525	951,000	506,826	53,470	16,275	919,878	49,405	3718,134	14,802	54,311	47,762		
	3,900	54,408	960,740	502,000	53,700	18,575	800,737	47,273	3510,175	16,542	53,082	49,053		
	3,950	54,389	946,000	500,780	52,910	16,623	759,863	51,991	3811,165	16,008	53,990	49,204		
	3,950	55,680	930,000	505,623	53,810	14,479	472,742	56,066	2792,301	14,565	55,736	48,890		
	3,880	56,508	917,000	506,436	52,380	14,963	603,988	56,327	3432,570	14,922	56,481	49,738		
	3,950	57,005	899,000	506,078	51,670	12,112	559,385	58,555	3513,507	12,395	57,218	48,857		
	3,800	58,666	894,000	513,247	52,690	12,696	543,457	59,236	3570,743	12,803	58,741	50,176		
	3,780	57,487	910,000	514,722	52,850	13,954	553,516	57,878	3413,142	14,036	57,541	50,571		
	3,880	56,008	939,000	513,731	52,170	16,798	682,122	51,005	3378,656	15,531	55,167	49,007		

## Apêndice. Continuação...

Anos 04/05/06/07/08/09 Média Mensal	Dados para análise do consumo específico de madeira e fatores de influência												
	Consumo Específico Madeira m <sup>3</sup> -sólido/Adt	Teor Seco Entrada Pilha Cavacos (%)	Densidade Aparente Madeira Recebida kgf/m <sup>3</sup>	Densidade Básica Saída Pilha kgf/m <sup>3</sup>	Rendimento Madeira (%)	Resíduo Base Umida (%)	Balança Biomassa ton-úmida	Teor Seco Biomassa (%)	Balança Entrada Pilha ton-úmida	Teor Resíduo Seco (%)	Teor Seco Madeira Recebida (%)	RENDT	
CEM	TSCE	DA	DB	REND	PERDAS-UM	BB	TSB	BC	PERDAS	TSME	RENDT		
	3,980	56,519	919,820	501,118	53,190	14,353	723,045	3672,036	14,047	56,283	48,330		
	4,020	55,597	936,790	500,414	52,620	16,655	744,650	3726,282	15,408	54,777	47,762		
j/07	4,057	53,995	970,660	513,984	50,720	16,642	844,269	3167,778	15,207	52,782	45,679		
	4,177	54,351	961,000	501,270	50,840	17,895	818,917	3757,400	15,963	53,102	47,191		
	4,067	56,744	923,000	500,785	51,580	16,586	670,131	3370,194	15,230	55,837	46,946		
	3,920	56,820	916,000	497,095	52,930	14,403	604,648	3593,555	13,801	56,423	49,014		
	3,882	57,198	907,000	495,664	54,580	14,857	493,134	2436,269	14,130	56,638	49,654		
	4,010	55,644	930,000	495,039	52,810	15,133	792,758	3668,573	14,552	55,186	48,190		
	3,919	55,588	932,000	510,040	52,500	14,312	649,590	3889,285	14,166	55,493	49,252		
	3,904	55,929	936,000	518,433	52,040	15,665	673,475	3625,790	15,016	55,502	48,931		
	3,896	56,780	921,000	515,878	53,150	15,129	671,287	3765,880	14,472	56,343	49,083		
	3,748	54,873	948,000	506,022	55,780	15,789	612,866	3722,411	14,998	54,425	51,290		
	3,944	53,416	967,000	503,500	53,500	16,998	715,665	3808,909	15,729	52,677	49,087		
	4,192	54,711	945,000	507,274	49,860	16,012	643,012	3372,924	15,249	54,218	46,140		
j/08	4,070	54,717	948,000	497,564	53,500	17,690	779,626	3627,410	16,438	53,897	47,367		
	4,270	51,272	1003,000	498,987	52,100	18,878	1060,458	4091,036	16,898	49,915	45,540		
	4,110	51,413	1005,000	500,376	51,500	20,585	738,727	3744,193	17,041	49,724	47,089		
	4,020	52,016	991,000	493,590	52,900	18,846	765,307	3668,378	16,306	50,593	48,258		
	3,800	52,248	988,000	509,000	54,500	17,391	797,338	4279,425	16,020	51,491	50,979		
	4,110	52,385	980,000	504,322	52,600	17,346	755,762	3601,317	16,163	51,646	47,394		
	3,830	53,289	971,000	502,720	56,900	17,976	589,106	2688,009	16,558	52,384	50,459		
	3,850	55,976	928,000	513,398	52,700	14,566	757,262	3625,879	14,340	55,795	50,002		
	3,677	55,764	931,000	506,667	57,110	14,790	514,320	3551,158	14,374	55,538	52,384		
	3,774	54,276	946,000	493,930	55,580	15,177	470,072	3383,596	14,851	54,114	51,606		
	3,728	55,763	925,000	503,157	56,400	12,993	550,439	3686,060	13,227	55,913	52,004		
	3,675	56,397	920,000	506,774	56,100	14,145	463,876	3344,892	13,980	56,307	52,444		
	3,953	53,590	961,000	495,235	55,800	15,825	593,528	3156,980	14,709	52,888	49,121		
	4,054	52,821	974,000	493,301	55,150	18,386	783,750	3478,942	17,123	52,016	47,946		
j/09	3,730	54,061	958,000	504,953	55,940	16,364	514,875	3229,029	15,287	53,499	51,766		
	3,757	56,150	924,000	494,172	56,620	14,988	459,172	3291,148	14,292	55,788	51,302		
	3,760	55,120	938,000	497,402	55,600	15,553	400,957	3162,726	14,687	54,734	51,440		
	3,710	56,123	925,000	506,230	56,010	13,490	554,983	3559,118	13,699	56,259	51,921		