

# MODELAGEM GEOESTATÍSTICA APLICADA AO MICROPLANEJAMENTO DA COLHEITA DE MADEIRA EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

## GEOSTATISTIC MODELING APPLIED TO MICROPLANING OF WOOD HARVEST IN EUCALYPTUS STAND

Carla Krulikowski Rodrigues<sup>2</sup>, Antenor Luiz Simão de Souza<sup>1</sup>, Franciéle Maria de Souza  
Retslaff<sup>3</sup>, Ana Paula Dalla Corte<sup>4</sup>, Eduardo da Silva Lopes<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná, Brasil – [carlkr@gmail.com](mailto:carlkr@gmail.com),  
[antenor\\_210@hotmail.com](mailto:antenor_210@hotmail.com), [francielersetslaff@yahoo.com.br](mailto:francielersetslaff@yahoo.com.br) & [eslopes@unicentro.br](mailto:eslopes@unicentro.br)

<sup>4</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil - [anapaulacorte@gmail.com](mailto:anapaulacorte@gmail.com)

### RESUMO

A colheita de madeira contribui com os custos operacionais da madeira posta na indústria, sendo necessária a busca por ferramentas que auxiliem no planejamento das operações para otimizar os recursos disponíveis e reduzir tais custos. Considerando que a produtividade do processador florestal é influenciada pelo volume individual das árvores, e que é possível ajustar modelos geoestatístico com dados do inventário florestal, supõem-se que é possível realizar a modelagem da produtividade do processador florestal por meio de geoestatística. Neste contexto, objetivou-se realizar o microplanejamento da colheita de madeira por meio de modelagem geoestatística. O estudo foi realizado em uma empresa florestal localizada em Telêmaco Borba, Paraná, Brasil. O povoamento florestal avaliado era composto de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, com 7 anos de idade, submetido ao regime de corte raso. A coleta de dados foi realizada por meio de inventário florestal e estudo de tempos e movimentos. Com os resultados obtidos, ajustou-se um modelo para a estimativa da produtividade da máquina em função do volume individual das árvores, sendo extrapolado para os dados de volume médio individual de cada parcela. Em seguida, realizou-se a modelagem geoestatística. O melhor modelo ajustado foi o circular, com uma dependência espacial moderada. Portanto, pode-se afirmar que é possível utilizar a modelagem geoestatística como uma ferramenta inovadora no microplanejamento das operações de colheita da madeira, podendo futuramente ser testada com outras variáveis dendrométricas do povoamento, a fim de melhorar os parâmetros da modelagem geoestatística.

PALAVRAS-CHAVE: **Harvester, Mapeamento da produtividade, Planejamento.**

### ABSTRACT

Wood harvesting contributes to wood operational costs put in the industry, being necessary search for tools that aid in operations planning to optimize resources available and to reduce such costs. Considering that forest processor productivity is influenced by individual volume of trees, and that it is possible to adjust geostatistical models with forest inventory data, it is assumed that it is possible to model forest processor productivity by means of geostatistics. In this context, the aim was to carry out wood harvest microplanning through geostatistical modeling. The study was carried out in a forest company located in Telêmaco Borba, Paraná, Brazil. The forest stand evaluated was composed of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, at 7 years-old, under clearcutting regime. Data collection was done through forest inventory and time and motion study. With results obtained, a model for estimation of machine productivity was fitted as a function of individual volume of trees, being extrapolated to data of individual average volume of each plot. Then, geostatistical modeling was carried out. The best fit model was circular, with moderate spatial dependence. Therefore, it can be stated that it is possible to use geostatistical modeling as an innovative tool in wood harvesting operations microplanning, which can be tested in future with other dendrometric variables of stand, in order to improve parameters of geostatistical modeling.

KEYWORDS: **Harvester, Mapping of productivity, Planning.**

## INTRODUÇÃO

A colheita florestal pode ser definida como um conjunto de operações que tem como objetivo preparar e extrair a madeira até o local de transporte, através do uso de técnicas e padrões estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final (MACHADO et al., 2014). Esse conjunto de operações pode apresentar alto grau de mecanização e, por consequência, elevados custos. Dessa forma, são necessários estudos a respeito de melhorias nos sistemas de colheita e desempenho operacional, para tentar minimizar os custos de produção.

Dentre os desafios das empresas, para a redução dos custos das operações de colheita da madeira, está o desenvolvimento de um planejamento operacional adequado, pois esse busca auxiliar na tomada de decisão dos gestores florestais, elevar a produtividade e a eficiência operacional. O microplanejamento também é eficaz e de fundamental importância quando o objetivo é a redução de custos, sendo esse um planejamento em nível de talhão (MACHADO & LOPES, 2014).

O microplanejamento, como uma descrição fiel da estrutura física do talhão, tem como objetivos segregar e caracterizar todos os aspectos operacionais que nortearão as estratégias de planejamento operacional (curto prazo). Para Guimarães (2004), os principais objetivos do microplanejamento florestal são: quantificação do volume de madeira por sortimento de produção; definição de sentidos e distâncias de extração; definição de postos de processamento e carga; identificação de reserva legal e áreas de preservação permanente; programação de transporte da madeira (planejamento de rede viária); e caracterização física das estradas que serão utilizadas no escoamento da produção.

Para gerar o planejamento em curto prazo, é importante conhecer de forma precisa o verdadeiro estoque de madeira na floresta, pois é por meio da produtividade em cada povoamento florestal que se define o dimensionamento de máquinas, equipes de colheita e transporte florestal, bem como todo o planejamento logístico. O volume médio individual da árvore (VMI) é considerado uma das principais variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita da madeira (BURLA et al., 2012; VISSER & SPINELLI, 2012; GERASIMOV et al., 2012; FERNANDES et al., 2013; SCHETTINO et al., 2015;). RODRIGUES et al. (2018) e (2019), verificaram que o volume individual das árvores foi a variável que explicou, isoladamente, as produtividades alcançadas pelo processador florestal, em povoamento de eucalipto.

Na busca por soluções que otimizem as operações

florestais, auxiliem no planejamento e reduzam os custos operacionais, a geoestatística tem sido aplicada em diversas áreas do setor florestal. Desenvolvida com a finalidade de melhorar as estimativas da estatística convencional, a geoestatística é uma ferramenta que vem sendo aplicada na gestão florestal, no inventário florestal, na classificação de índice de sítio, silvicultura de precisão, nos estudos sobre atributos dos solos, dentre outros (AKHAVAN et al., 2010; PELISSARI et al., 2012; PELISSARI et al., 2014), tendo como principal objetivo obter estimativas precisas, redução de tempo e custos, e contribuindo para o planejamento das empresas.

Diante disso, objetivou-se neste estudo realizar o microplanejamento da colheita de madeira por meio de modelagem geoestatística.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Características da área de estudo

O estudo foi conduzido em povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, com sete anos de idade, espaçamento 2,5 m x 2,5 m, pertencentes à uma empresa florestal localizada no município de Telêmaco Borba, Paraná, Brasil, entre as coordenadas geográficas 24°19'26" S e 50°36'07" W e altitude média de 760 m.

O clima do local do estudo, segundo Köppen, é classificado como Cfa, com temperaturas médias anuais inferiores a 18 °C e superiores a 22 °C, em meses mais frios e quentes, respectivamente (ALVARES et al., 2013). A umidade relativa do ar média anual encontra-se entre 70 a 75%, com precipitação média anual de 1.400 a 1.600 mm. O solo predominante nas áreas de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho-Escuro de textura argilosa (SANTOS et al., 2018), com relevo variando de plano a suavemente ondulado e declividade média de 6%. O povoamento foi submetido ao regime de corte raso sendo a madeira destinada a produção de celulose.

### Inventário florestal

A fim de se obter os dados dendrométricos do povoamento, realizou-se um inventário florestal pré-corte utilizando parcelas retangulares com 27,2 m x 23,0 m. Para tal, com auxílio do *software* ArcGis®, realizou-se a distribuição aleatória das parcelas, com intensidade de 1 parcela para cada 5 hectares, totalizando 80 parcelas. (Figura 1).



**Figura 1.** Localização das parcelas do inventário no povoamento de *E. grandis*.

O inventário florestal foi composto pelas seguintes variáveis: contagem de indivíduos em cada parcela; diâmetro à altura do peito (DAP) com 1,30 m do solo; e a altura das 10 primeiras árvores medidas em cada parcela. Com base nestas informações, utilizando as equações hipsométricas e volumétricas já ajustadas pela empresa para povoamentos com as mesmas características, estimou-se o VMI de cada parcela.

### Sistema de colheita de madeira

O sistema de colheita da madeira empregado pela empresa foi o de árvores inteiras (*full tree*) que, quando mecanizado, utiliza o *feller-buncher* para o corte, acúmulo e enleiramento das árvores no interior do talhão para posterior extração com o *skidder*. Nesse sistema, a empresa implementou na margem da estrada um processador florestal, composto por uma máquina base e cabeçote *harvester*, para o processamento das árvores em toras de 7,2 m de comprimento.

Foi avaliado o processador florestal (Figura 2), composto por uma máquina base da marca John Deere, modelo 903J, com potência nominal de 219 kW, peso operacional de 31,2 t (sem cabeçote), material rodante de esteiras e vida útil de 10.600 horas, e cabeçote *harvester* da marca Waratah, modelo HTH622B, peso operacional de 2,12 t, diâmetro máximo de corte de 750 mm, e quatro facas de desgalhamento.



**Figura 2.** Processador florestal.

Fonte: Rodrigues et al. (2018).

### Análise técnica operacional

A análise técnica do processador florestal foi realizada por meio de um estudo de tempos e movimentos, sendo utilizado o método de cronometragem de tempos contínuos, com uso de um cronômetro digital centesimal e formulários específicos para registro dos dados.

Inicialmente, realizou-se um estudo piloto com o objetivo de se definir o número mínimo de ciclos operacionais necessários. Para isso, aplicou-se a metodologia descrita por MURPHY (2005), de modo a obter estimativas de produtividade da máquina ao nível de 95% de confiança e erro de amostragem máximo de 5%, conforme a equação (1) descrita a seguir:

$$n = \frac{t^2 \times \text{Var}(\text{TCO})}{\left(E \times \frac{\overline{\text{TCO}}}{100}\right)^2} \quad (1)$$

Em que: n = número de ciclos operacionais a serem estudados; t = valor de t, para o nível de probabilidade desejado e (n-1) graus de liberdade; Var(TCT) = variância dos tempos dos ciclos operacionais; E = erro máximo admissível (5%); e  $\overline{\text{TCO}}$  = média dos tempos dos ciclos operacionais (segundos).

A determinação da produtividade efetiva (2) foi obtida por meio do volume individual das árvores dividido pelas horas efetivamente trabalhadas, conforme descrito por Visser & Spinelli (2012).

$$\text{Pr} = \frac{v_i}{h_e} \quad (2)$$

Em que: Pr = produtividade efetiva ( $\text{m}^3\text{cc he}^{-1}$ );  $v_i$  = volume da árvore com casca ( $\text{m}^3\text{cc}$ ) e;  $h_e$  = horas efetivas de trabalho.

## Modelagem da produtividade do *harvester*

Realizou-se o ajuste de modelo estatístico para verificação da relação entre a variável dependente “produtividade efetiva” e a independente “volume das árvores”. O modelo ajustado foi avaliado por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e apresentado em uma linha de tendência com os valores reais.

### Análise geoestatística

Os valores resultantes do inventário florestal e a produtividade efetiva estimada do processador florestal foram submetidos à análise estatística descritiva e, posteriormente, a análise geoestatística foi aplicada para modelar os padrões espaciais; e as semivariâncias (3), o posicionamento central de cada parcela, as distâncias de separação ( $h$ ) e as diferenças numéricas da produtividade na malha ( $Z$ ) foram calculados.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2\} \quad (3)$$

Em que:  $\gamma(h)$  = semivariância de  $Z(x_i)$ ;  $h$  = distância;  $N(h)$  = número de pares de pontos mensurados  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ , separado por uma distância  $h$ .

As semivariâncias foram determinadas entre as parcelas equidistantes em quatro direções:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , em que a matriz média de semivariância foi obtida entre as distâncias equivalentes. Posteriormente, os modelos de semivariograma Circular, Estável, Esférico, Tetraesférico, Pentaesférico, Exponencial e Gaussiano foram ajustados com o programa ArcGis®. Esses modelos foram compostos pelo efeito pepita ( $C_1$ ): semivariância na distância zero; patamar ( $C_1+C_0$ ): estabilização do semivariograma; variância *a priori* ( $C$ ): diferença entre o patamar e o efeito pepita; e alcance ( $a$ ): distância onde o semivariograma atinge o patamar (WEBSTER & OLIVER, 2007).

A interpolação foi feita por meio da krigagem ordinária pontual (4), em que os pesos ( $\lambda_i$ ) foram determinados pelo método dos multiplicadores de Lagrange (WEBSTER & OLIVER, 2007). Posteriormente, o mapa temático foi produzido com seis classes relativas da produtividade efetiva estimada do processador florestal.

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i)] \quad (4)$$

Em que:  $Z_{KO}^*$  = estimador de krigagem ordinária;  $\lambda_i$  = peso;  $Z(x_i)$  = observações; e  $n$  = número de dados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

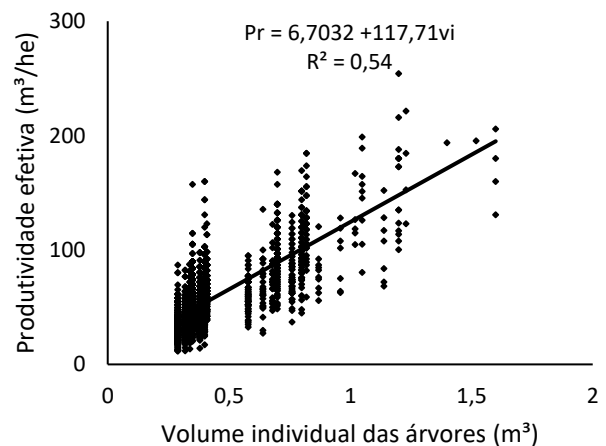
As características dendrométricas do povoamento de *E. grandis* avaliado, bem como a produtividade efetiva estimada do processador florestal estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Estatística descritiva do povoamento florestal estudado e produtividade do processador florestal.

Variáveis	Mínimo	Média	Máximo	CV (%)
VMI (m <sup>3</sup> )	0,119	0,257	0,371	21,4
DAP (cm)	9,3	13,2	41,7	10,7
Altura (m)	14,6	20,4	24,9	10,1
G (m <sup>2</sup> há <sup>-1</sup> )	21,8	32,9	41,5	14,8
N (n há <sup>-1</sup> )	1.127	1.609	1.927	10,0
Pr (m <sup>3</sup> he <sup>-1</sup> )	17,4	36,7	50,4	17,5

Em que: VMI = volume médio individual; DAP = diâmetro a 1,30 m do solo; G = área basal; N = número de árvores; e Pr = produtividade efetiva.

Verificou-se que o VMI do povoamento foi de 0,257 m<sup>3</sup>, sendo encontradas parcelas com variação entre 0,119 a 0,371 m<sup>3</sup>. Tais valores influenciam a produtividade efetiva da máquina, conforme pode ser visto na Figura 3.



**Figura 3.** Distribuição dos valores de produtividade efetiva do processador florestal em função do volume individual das árvores.

Com o modelo linear ajustado, verificou-se acréscimo da produtividade da máquina com o aumento do volume das árvores, apresentando um coeficiente de determinação de 0,54, podendo ter sido influenciado pelas questões operacionais de processamento da madeira, pois o cabeçote *harvester* pode consumir maior tempo de trabalho devido a variabilidade do número de galhos e

bifurcação das árvores. Além disso, existem outras variáveis que podem afetar a produtividade da máquina, como características do operador, sortimentos gerados entre outros (MALINOVSKI et al., 2006; PURFÜRST, 2010; LOPES & PAGNUSSAT, 2017).

O modelo ajustado se mostrou satisfatório para ser

utilizado no microplanejamento de colheita da madeira e aplicado para estimar a produtividade efetiva da máquina. Dentro deste contexto, após calcular a produtividade estimada da máquina para cada parcela, em função do seu VMI, ajustou-se o modelo circular, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros do semivariograma ajustado.

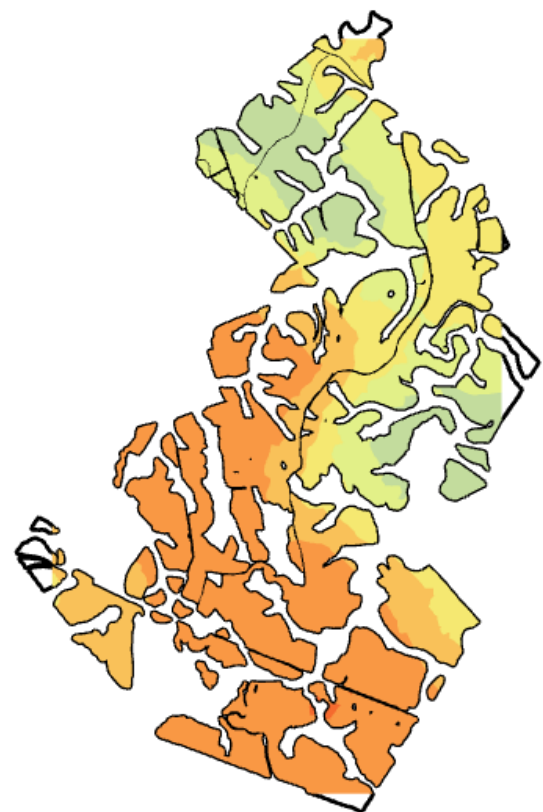
Modelo	Circular	Estável	Esférico	Tetraesférico	Pentaesférico	Exponencial	Gaussiano
<b>Anisotropia</b>	sim	sim	sim	sim	Sim	sim	sim
<b>Efeito Pepita (<math>C_1</math>)</b>	0,5742	0,8007	0,7656	0,7585	0,7536	0,7053	0,7130
<b>Alcance (<math>C_0</math>)</b>	0,4456	0,2191	0,2542	0,2613	0,2661	0,3145	0,3068
<b>Patamar (<math>C_0+C_1</math>)</b>	1,0198	1,0198	1,0198	1,0198	1,0197	1,0198	1,0198
<b>RD (<math>C_0/(C_0+C_1)</math>)</b>	0,4369	0,2148	0,2493	0,2562	0,2610	0,3084	0,3008
<b>Coefficiente (a)</b>	0,6524	0,8237	0,8082	0,7672	0,7974	0,7796	0,7015
<b>Coefficiente (b)</b>	0,0935	0,0481	0,0522	0,0632	0,0552	0,0599	0,0806

Por meio do efeito pepita ( $C_1$ ), verificou-se que a variância dos dados nas distâncias inferiores à amostrada foi elevada para o volume médio individual (Tabela 2). Desse modo, com a aplicação de amostragens mais intensivas, uma continuidade espacial mais detalhada do VMI possivelmente seria detectada.

Com o alcance ( $a$ ) foi determinada a distância máxima em que dois pontos amostrais correlacionaram-se espacialmente, correspondendo ao raio das áreas onde os valores de amostras vizinhas foram mais semelhantes para estimar em quaisquer locais entre elas, enquanto as determinações em distâncias superiores ao alcance apresentaram independência entre si (WEBSTER & OLIVER, 2007), podendo, dessa forma, o alcance ser um potencial parâmetro para a definição da intensidade amostral nos inventários florestais em múltiplas ocasiões ou após amostragens pilotos.

No modelo circular, a variável VMI apresentou classe moderada de dependência espacial (RD). Isso demonstrou que a malha amostral foi moderada para detectar as características espaciais do VMI, e conseqüentemente da produtividade do processador florestal.

O mapa de produtividade estimada do processador florestal está apresentado na Figura 4. Nota-se que dos 399,1 ha totais do povoamento, 72% da área apresenta VMI acima da média do povoamento ( $0,255 \text{ m}^3$ ) e, conseqüentemente, maiores as produtividades da máquina. Por meio de tal mapa é possível dimensionar o número de máquinas necessárias para as operações de colheita da madeira, e principalmente, para o processamento, podendo realizar o planejamento do tempo necessário para a execução desta operação na área.



Classes	VMI ( $\text{m}^3$ )	PR ( $\text{m}^3 \text{he}^{-1}$ )	Área (ha)
1	0,234 - 0,246	34,24 - 35,66	45,4
2	0,246 - 0,255	35,66 - 36,72	66,3
3	0,255 - 0,263	36,72 - 37,66	69,5
4	0,263 - 0,275	37,66 - 39,01	56,9
5	0,275 - 0,294	39,01 - 41,31	160,4
6	0,294 - 0,324	41,31 - 44,84	0,6

**Figura 4.** Mapa de classes de produtividade do processador florestal em função do volume das árvores em povoamento de *E. grandis*.

## CONCLUSÕES

O volume das árvores é uma variável que explica a produtividade do processador florestal, sendo crescente com o aumento do VMI.

A modelagem geoestatística mostra que a intensidade amostral do inventário florestal deve ser maior, para obter melhores ajustes.

O modelo circular pode explicar a dependência espacial moderada da variável VMI e produtividade do processador florestal.

## REFERÊNCIAS

- AKHAVAN, R. et al. Spatial variability of forest growing stock using geostatistics in the Caspian region of Iran. **Caspian Journal Environmental Sciences**, v.8, n.1, p.43-53, 2010.
- ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.
- BURLA, E.R. et al. Avaliação técnica e econômica do harvester em diferentes condições operacionais. **Engenharia na Agricultura**, v.20, n.5, p.412-422, 2012.
- FERNANDES H.C. et al. Avaliação técnica e econômica de um "Harvester" em diferentes condições de terreno e produtividade da Floresta. **Scientia Forestalis**, v.41, n.97, p.141-151, 2013.
- GERASIMOV, Y. et al. Productivity of single-grip harvesters in clear-cutting operations in the northern European part of Russia. **European Journal of Forest Research**, v.131, n.3, p.647-654, 2012.
- GUIMARÃES, H.S. A logística como fator decisivo das operações de colheita de madeira e transporte florestal. **13º Seminário de atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal**, p.127-146, 2004.
- LOPES, E.S.; PAGNUSSAT, M.B. Effect of the behavioral profile on operator performance in timber harvesting. **International Journal of Forest Engineering**, v.28, n.3, p.1-6, 2017.
- MACHADO, C.C. et al. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. **Colheita Florestal**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2014.
- MACHADO, C.C.; LOPES, E.S. Planejamento. **Colheita Florestal**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2014.
- MALINOVSKI, R.A. et al. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, v.36, n.2, p.169-182, 2006.
- MURPHY, G. Determining sample size for harvesting cost estimation. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.35, n.1/2, p.166-169, 2005.
- PELISSARI, A.L. et al. Modelagem geoestatística da dinâmica espacial da altura dominante de *Tectona grandis* L.f (Teca). **Biosfera**, v.8, n.15, p.1249-1260, 2012.
- PELISSARI, A.L. et al. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em povoamentos de *Tectona grandis*. **Cerne**, v.20, n.3, p.377-384, 2014.
- PURFÜRST, F.T. Learning Curves of Harvester Operators. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v.31, n.2, p.89-97, 2010.
- RODRIGUES, C.K. et al. Effect of individual tree volume on operational performance of harvester processor. **Floresta**, v.49, n.2, p.345-352, 2019.
- RODRIGUES, C.K. et al. Influência do volume das árvores no desempenho do processador florestal harvester em povoamento de eucalipto. **BIOFIX Scientific Journal**, v.3, n.2, p.237-242 2018.
- SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.
- SCHETTINO, S. et al. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Árvore**, v.39, n.5, p.935-942, 2015.
- VISSER, R.; SPINELLI, R. Determining the shape of the productivity function for mechanized felling and felling-processing, **Journal of Forest Research**, v.17, n.5, p.397-402, 2012.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Geostatistics for environmental scientists**, 2.ed. John Wiley & Sons: West Sussex, 2007.