

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TANELISE DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE ESPACIAL POR INTERPOLAÇÃO IDW E
KRIGAGEM ORDINÁRIA NA PREDIÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS
PARA PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L.

CURITIBA

2023

TANELISE DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE ESPACIAL POR INTERPOLAÇÃO IDW E
KRIGAGEM ORDINÁRIA NA PREDIÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS
PARA PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L.

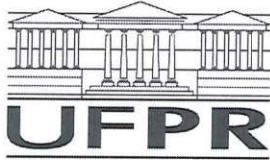
TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Ercolin Filho

CURITIBA

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

PARECER

Defesa nº 319

A Banca Examinadora, instituída pelo Colegiado do Curso de Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir **Tanelise de Andrade** em relação ao seu Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Avaliação de técnicas de análise espacial por interpolação IDW e krigagem ordinária na predição de variáveis dendrométricas para produção de *Pinus taeda* L.**, é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** na Disciplina ENGF010 - Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal, condicionada a entrega da versão final corrigida.



Prof. Dr. Alexandre Behling
1. Avaliador



Prof. Me. Carla Talita Pertille
2. Avaliadora



Prof. Dra. Ana Paula Dalla Corte
Orientadora - Presidente da Banca

Curitiba, 17 de fevereiro de 2023.



Prof. Dra. Lucieli Rossi
Vice-Coordenadora do Curso de Engenharia Florestal em exercício

Dedico este trabalho a minha família, que é a minha fonte de amor e apoio incondicional, sem eles nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por sua constante presença em minha vida, por me conceder forças e sabedoria para chegar até aqui.

Aos meus pais, Sandro e Joelma, as minhas irmãs Analu e Tatiane, que sempre estiveram presentes, me dando apoio e incentivo, para possibilitar a realização deste sonho.

Agradeço a orientação da professora Dr.^a Ana Paula Dalla Corte durante o desenvolvimento do meu trabalho e ao professor Dr. Leonardo Ercolin Filho pela coorientação das atividades.

À empresa Florestal Gateados Ltda., pela oportunidade em desenvolver meu trabalho de conclusão de curso durante este um ano de estágio e por disponibilizar a base de dados para o processamento das informações.

Ao Engenheiro Florestal Nilton Sérgio Novack Junior, pela sugestão do tema enquanto trabalhávamos na mesma equipe de planejamento e pesquisa, pela sua contribuição, experiência e conhecimento compartilhado durante este período.

E por fim, à Universidade Federal do Paraná, que tornou tudo isso possível.

RESUMO

Para o planejamento da produção de um povoamento florestal, é essencial conhecer o estoque volumétrico existente, o qual pode ser mensurado através do inventário florestal ou por metodologias de interpolação geoespaciais que estimam variáveis e são capazes de representar seu comportamento, extrapolando os valores para a população. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial das ferramentas de análises espaciais e geoestatística para geração de estimativas em inventários florestais. Para isso, foram testados os métodos de interpolação espacial pela ponderação do inverso da distância (*Inverse Distance Weighed* - IDW) e a geoestatística com a aplicação de krigagem ordinária para a predição de quatro variáveis dendrométricas: volume, diâmetro, altura e área basal em plantios de *Pinus taeda* L. pertencentes a empresa Florestal Gateados Ltda., localizada no município de Campo Belo do Sul em Santa Catarina. Foram utilizados dois projetos, sendo o projeto denominado Porteira Queimada apresenta área total de 137,81 hectares, com 15 parcelas instaladas de 500 m² cada. O projeto denominado Prefeito tem área total de 153,71 hectares, com 32 parcelas de 500 m². Para a aplicação das técnicas de interpolação foi utilizado o software ArcGIS e os resultados foram comparados aos valores mensurados e processados pelo inventário florestal pré corte e ao volume real colhido em campo. Em função dos limites inferiores e superiores do intervalo de confiança apresentados pelo método de inventário pré-corte tradicional, a avaliação das predições das variáveis pelos métodos espaciais está contemplada dentro dos intervalos de confiança. Portanto, é possível concluir que ao comparar os valores mensurados pelo Inventário Florestal Pré-Corte - IPC, preditos nas duas metodologias testadas juntos aos volumes colhidos em campo para os dois projetos, as predições não são diferentes sob a probabilidade de 95%, logo conclui-se pela maior facilidade da aplicação do IDW em relação a técnica de geoestatística para o caso em tela, sugere-se sua adoção em caso de necessidade de avaliação espacial de distribuição das variáveis aqui estudadas. No entanto, destaca-se que o inventário florestal tradicional resultou em valores estimados mais próximos aos valores de produção volumétrica colhido em campo, demonstrando, portanto, a consistência das técnicas tradicionais utilizadas nos inventários florestais.

Palavras-chave: Geoestatística. Interpolação Espacial. Inventário Florestal.

ABSTRACT

For planning the production of a forest stand, it is essential to know the existing volumetric stock, which can be measured through the forest inventory or by geospatial interpolation methodologies that estimate variables and are able to represent their behavior, extrapolating the values to the population. This work aimed to evaluate the potential of spatial and geostatistical analysis tools to generate estimates in forest inventories. For this, the methods of spatial interpolation by weighting the inverse of the distance (Inverse Distance Weighed - IDW) and geostatistics with the application of ordinary kriging were tested for the prediction of four dendrometric variables: volume, diameter, height and basal area. in plantations of *Pinus taeda* L. belonging to the company Florestal Gateados Ltda., located in the municipality of Campo Belo do Sul in Santa Catarina. Two projects were used, the project called Porteira Queimada has a total area of 137.81 hectares, with 15 installed plots of 500 m² each. The project called Mayor has a total area of 153.71 hectares, with 32 plots of 500 m². For the application of interpolation techniques, ArcGIS software was used and the results were compared to the values measured and processed by the pre-cut forest inventory and the actual volume collected in the field. Due to the lower and upper limits of the confidence interval presented by the traditional pre-cutting inventory method, the evaluation of the variables' predictions by the spatial methods is contemplated within the confidence intervals. Therefore, it is possible to conclude that when comparing the values measured by the Pre-Cutting Forest Inventory - IPC, predicted in the two methodologies studied together with the volumes harvested in the field for the two projects, the predictions are not different under a probability of 95%, thus concluding - if for the greater ease of application of the IDW in relation to the geostatistics technique for the case in question, its adoption is suggested in case of need for spatial evaluation of the distribution of the variables studied here. However, it is noteworthy that the traditional forest inventory resulted in estimated values closer to the volumetric production values collected in the field, thus demonstrating the consistency of the traditional techniques used in forest inventories.

Keywords: Geostatistics. Spatial Interpolation. Forest Inventory.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SEQUÊNCIA DE MEDIÇÃO DAS ÁRVORES NAS PARCELAS DE INVENTÁRIO	16
FIGURA 2– EXEMPLO DE PONTOS SEM MEDIÇÃO	17
FIGURA 3– MAPAS GERADOS POR INTERPOLAÇÃO DE: a) volume/ha IDW, (b) área basal/ha IDW, (c) altura dominante IDW, (d) volume/ha Krigagem Ordinária, (e) área basal/ha Krigagem Ordinária, (f) altura dominante Krigagem Ordinária.	18
FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS VARIÁVEIS DO POVOAMENTO DE TECA POR.....	21
FIGURA 5 – FAZENDAS GUAMIRIM E GATEADOS	23
FIGURA 6 – REGIME DE MANEJO BÁSICO ADOTADO PELA FLORESTAL GATEADOS LTDA.	24
FIGURA 7 – ÁREA DE ESTUDO PROJETO PORTEIRA QUEIMADA	25
FIGURA 8 – ÁREA DE ESTUDO PROJETO PREFEITO.....	25
FIGURA 9 – PARÂMETROS UTILIZADO PARA A INTERPOLAÇÃO DAS VARIÁVIES PELO MÉTODO IDW	28
FIGURA 10 – PARÂMETROS UTILIZADO PARA A INTERPOLAÇÃO DAS VARIÁVIES PELO MÉTODO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA.....	31
FIGURA 11 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA	39
FIGURA 12 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME PARA O PROJETO PREFEITO.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA POR PROJETO	32
GRÁFICO 2 – PREDIÇÃO DO VOLUME PELO MÉTODO IDW	37
GRÁFICO 3 – PREDIÇÃO DO VOLUME PELO MÉTODO KRIGAGEM ORDINÁRIA	37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS DE SEMIVARIOGRAMAS EMPREGADOS NA KRIGAGEM SIMPLES	21
TABELA 2 – PARÂMETROS DE SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA OS SORTIMENTOS DO VOLUME COMERCIAL EM POVOAMENTO DE <i>Pinus sp.</i>	22
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	24
TABELA 4 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA.....	29
TABELA 5 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO DIÂMETRO POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA	29
TABELA 6 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ALTURA POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA.....	29
TABELA 7 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ÁREA BASAL POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA	29
TABELA 8 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO	30
TABELA 9 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO DIÂMETRO POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO	30
TABELA 10 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ALTURA POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO	30
TABELA 11 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ÁREA BASAL POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO.....	30
TABELA 12 – DADOS INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ CORTE PROJETO PORTEIRA QUEIMADA.....	34
TABELA 13 – DADOS INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ CORTE PROJETO PREFEITO	34
TABELA 14 – RESULTADOS POR METODOLOGIAS PROJETO PORTEIRA QUEIMADA.....	35
TABELA 15 – RESULTADOS POR METODOLOGIAS PROJETO PREFEITO	35
TABELA 16 – DESVIO PADRONIZADO PONDERADO PELAS ÁREAS DAS CLASSES DO PROJETO PORTEIRA QUEIMADA	36

TABELA 17 – DESVIO PADROZINADO PONDERADO PELAS ÁREAS DAS CLASSES DO PROJETO PREFEITO	36
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ CORTE	15
2.2 PONDERAÇÃO DO INVERSO DA DISTÂNCIA (IDW)	16
2.3 GEOESTATÍSTICA	19
2.4 KRIGAGEM ORDINÁRIA	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 ÁREA DE ESTUDO	23
3.2 ANÁLISE DE DADOS	26
3.2.1 Inventário florestal pré-corte	26
3.2.2 Ponderação do inverso da distância (IDW)	28
3.2.3 Krigagem ordinária	30
3.2.4 Aferição do volume (m ³) planejado e colhido	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE 1 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA	45
APÊNDICE 2 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS PARA O PROJETO PREFEITO	49

1 INTRODUÇÃO

Conhecer a quantidade e a qualidade dos estoques florestais para o planejamento da produção de um povoamento florestal, faz com que as empresas estimem as variáveis dendrométricas através de inventários florestais, que são realizados por técnicas de amostragem (DRUSZCZ *et al.*, 2012).

No entanto, os métodos tradicionais da estatística aplicados ao processamento de inventários florestais utilizam a média e uma correlação como a variância, para descrever um determinado fenômeno, sem considerar as possíveis correlações com as observações das vizinhas (MELLO, 2004).

Mello *et al.* (2006) cita que a utilização do estimador geoestatístico para estimativa de volume por talhão é preferível por dois motivos: apresenta baixo custo quando comparado ao estimador de inventário tradicional e proporciona estimativa da precisão sem viés, com otimização do tempo.

Diante destes fatos, as técnicas de análises espaciais e geoestatísticas podem ser alternativas para complementar as inferências realizadas para a população.

Mello (2004) explica que embora a geoestatística seja amplamente aplicada na geologia e ciências do solo, apresenta grande potencial para ser aplicada em outras áreas da ciência, podendo caracterizar o comportamento espacial de variáveis, tais como as características dendrométricas. Segundo Yamamoto (2013), a krigagem ordinária é o método de interpolação mais usual, devido sua simplicidade e bons resultados, além disso, seu sucesso está interligado ao fato de que a krigagem ordinária foi o primeiro método de estimação a viabilizar um grau de incerteza pela variância da krigagem.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos por Osborne (1942) e Matérn (1960) sobre funções exponenciais que caracterizam a continuidade espacial de volumes de madeira obtidos de amostras sistemáticas. Samra *et al.* (1989) modelou o crescimento de altura para a espécie *Melia azedarach*, fazendo uso de técnicas da geoestatística.

A aplicação destas técnicas na área de sensoriamento remoto foi trabalhada por Cohen *et al.* (1990) e Wulder *et al.* (1996), onde os autores procuraram caracterizar a estrutura de copa de coníferas a partir de imagens de satélite e parâmetros biofísicos, como o índice da área foliar e área basal.

Outros estudos encontrados na literatura, são trabalhos desenvolvidos sobre a estimativa do volume total de madeira de um povoamento de *Pinus sp.* (GUNNARSON, 1998) e a determinação do grau de dependência espacial para área basal de *Pinus ponderosa* (BIONDI, 1994).

A primeira metodologia testada foi a interpolação espacial pela ponderação do inverso da distância (IDW), a qual, realiza a estimativa de variáveis ao longo do espaço, ponderando pesos a cada um dos n postos mais próximos, o que é função do inverso de uma potência da distância, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado (JIMENEZ e DOMECCQ, 2008). Esse procedimento é simples e clássico, sendo recomendado para regiões com alta densidade de amostras (DEUS *et al.*, 2010).

O segundo método aplicado foi a geoestatística pela krigagem ordinária para a predição das variáveis. Esta metodologia é uma ferramenta para estimativas lineares de uma variável regionalizada que atende a hipótese inerente e procura mitigar o erro da prognose, ou seja, objetiva que o erro residual seja zero (LIMA, 2000).

Nesse contexto, esse trabalho teve como motivação conhecer a precisão do inventário florestal tradicional realizado pela empresa Florestal Gateados Ltda. utilizado como fonte de dados para o planejamento da produção de *Pinus taeda* L. e compará-lo ao resultado do volume total colhido em campo após a intervenção de corte raso, uma vez que a empresa realiza o planejamento da produção mensal e não compara com o volume total comercializado em cada projeto.

1.1 OBJETIVOS

Diante de tais possibilidades, este estudo visou testar a relação existente entre as variáveis dendrométricas (volume, diâmetro, altura e área basal) e seu comportamento espacial, com a finalidade de avaliar o potencial de duas metodologias de interpolação geoespaciais para a estimativa das variáveis em pontos não amostrados e assim comparar aos resultados do inventário florestal pré-corte tradicionalmente desenvolvido pela empresa e com o volume real colhido em campo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ CORTE

O inventário florestal faz uso dos fundamentos da teoria da amostragem para fins de determinação ou estimação de uma dada característica, seja quantitativa ou qualitativa (PELLICO NETTO e BRENA, 1997).

Para planejar a produção florestal, deve-se estimar as variáveis dendrométricas para quantificar o estoque do povoamento. Nesse sentido, o acompanhamento do crescimento de uma floresta em médio ou longo prazo ocorre por meio das avaliações efetuadas para um conjunto de parcelas permanentes, denominado de inventário florestal contínuo (CABACINHA, 2003).

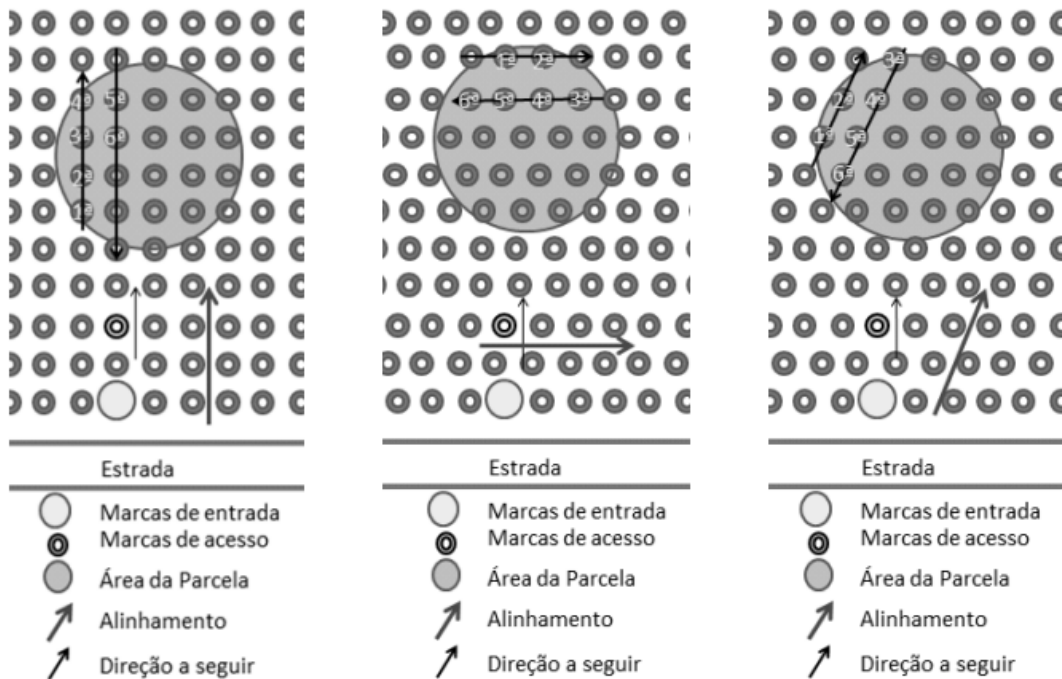
No entanto, para realizar a manutenção e processar os dados mensurados em campo, há custos e gastos de tempo, pois essas atividades dependem da intensidade amostral (LUNDGREN *et al.*, 2015). A intensidade amostral das parcelas permanentes varia de empresa para empresa (PELLICO NETTO e BRENA, 1997).

Em função da dinâmica de crescimento dos povoamentos florestais, as informações obtidas com o processamento dessas parcelas não são suficientes para gerar um resultado preciso em relação ao volume total e sobre o erro do inventário em cada talhão na idade de corte (MELLO *et al.*, 2006).

Dessa forma, é necessário realizar o inventário pré-corte mais próximo ao ano de colheita, uma vez que, este inventário utiliza um maior número de parcelas por talhão em relação ao inventário florestal contínuo, agregando um novo componente ao custo do processo. Deve-se considerar ainda que, se houver estrutura de continuidade espacial da variável volume, a precisão do inventário fica inflacionada (AUBRY e DEBOUZIE, 2001).

A medição da parcela deve ter início na primeira árvore da primeira linha à esquerda, seguindo a marcação de acesso. A medição das demais árvores devem ser feita alternando o sentido do caminhamento em cada linha de plantio conforme (GATEADOS, 2020). A FIGURA 1 ilustra essa metodologia.

FIGURA 1 – SEQUÊNCIA DE MEDIÇÃO DAS ÁRVORES NAS PARCELAS DE INVENTÁRIO



FONTE: GATEADOS (2020).

Contudo, outras metodologias como a interpolação de variáveis por ponderação do inverso da distância (IDW) e a geoestatística pela krigagem ordinária podem ser aplicadas sem a agregar custos, para efetuar a predição volumétrica com eficácia no ano de corte da floresta em função das parcelas remedidas (MELLO *et al.*, 2006).

2.2 PONDERAÇÃO DO INVERSO DA DISTÂNCIA (IDW)

A interpolação Ponderação pelo Inverso da Distância IDW é baseada na distância ponderada de um ponto amostral. Ou seja, no método IDW de interpolação, as amostras de pontos são pesadas durante a interpolação de acordo como a influência de um ponto relativo a outro declina com a distância a partir de um ponto desconhecido (MITAS e MITASOVA, 2005).

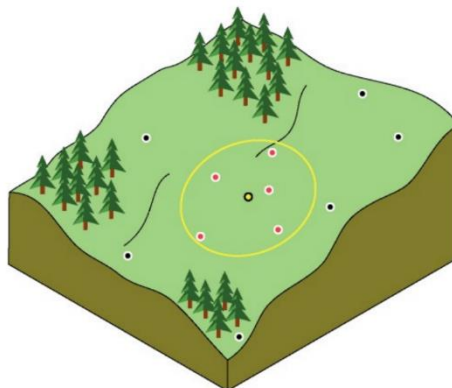
Os pesos são atribuídos aos pontos de amostragem usando um fator de ponderação que controla como a influência dos pesos diminui com a distância do ponto desconhecido. Quanto maior o coeficiente de peso, menos pontos são afetados e mais longe do ponto desconhecido durante o processo de interpolação.

Ao aumentar o coeficiente, o valor do ponto desconhecido ficará mais próximo do valor observado do ponto vizinho (MITAS e MITASOVA, 2005).

Deve-se notar que o método de interpolação IDW também tem algumas desvantagens: se os pontos amostrais não forem distribuídos uniformemente, a qualidade da interpolação pode diminuir. Da mesma forma, os valores máximos e mínimos na superfície interpolada só podem ocorrer nos pontos de dados amostrados. Isso geralmente resulta em pequenos picos e quedas em torno dos pontos de dados da amostra (MITAS e MITASOVA, 2005).

Sendo assim, este método interpolador assume a hipótese de que locais próximos são mais semelhantes entre si. Devido a isso, valores medidos próximos ao local terão maior influência na interpolação que outros distantes (KANEGAE *et al.*, 2006). A FIGURA 2 a seguir, apresenta cinco pontos medidos (vizinhos) que são usados para prever um valor ao local sem medição: o ponto amarelo (ESRI, 2019).

FIGURA 2– EXEMPLO DE PONTOS SEM MEDIÇÃO



FONTE: ESRI (2019).

Ao contrário de outros métodos de interpolação, como a krigagem, o IDW não torna explícito suposições sobre as propriedades estatísticas dos dados de entrada. Este método é frequentemente usado quando os dados de entrada não atendem às suposições estatísticas de interpolação mais avançadas (ESRI, 2019).

O estimador IDW é dado pela seguinte equação:

$$Z(x) = \frac{\sum Z(x_i)W_i}{\sum W_i} \quad (1)$$

Em que $Z(x)$ é o valor estimado para o ponto não amostrado; W_i é o peso da i -ésima parcela amostral e $Z(x_i)$ valor observado da i -ésima parcela amostral (KANEGAE JÚNIOR *et al.*, 2006).

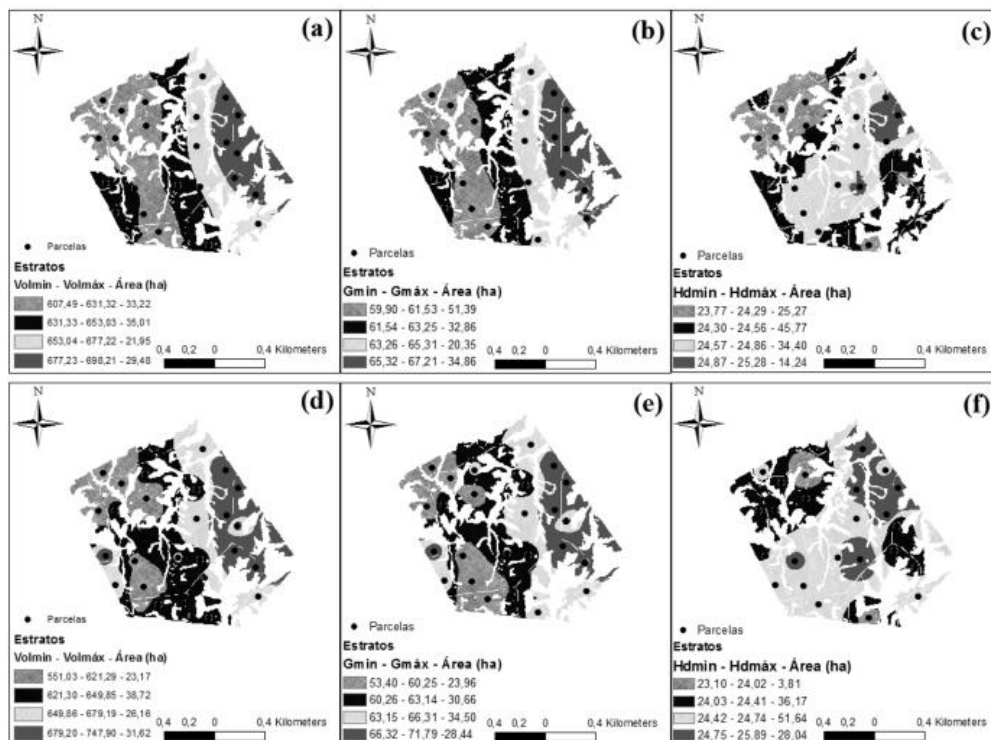
O peso de um dado ponto amostral é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$W_i = \frac{1}{d_i^p} \quad (2)$$

Sendo que, para esse interpolador na determinação do peso apenas é considerado o inverso da distância euclidiana elevado no parâmetro da potência p que para este estudo foi utilizado um valor menor que dois. Em que d_i é a distância entre cada ponto a ser estimado e observado e p o parâmetro da potência (KANEGAE JÚNIOR *et al.*, 2006).

Para Pelissari *et al.* (2014, apud ZECH *et al.*, 2014), a variabilidade das características dendrométricas, como as apresentadas na FIGURA 3, contradiz a homogeneidade aparente em reflorestamentos, sendo correto afirmar que utilizar valores médios de unidades amostrais em áreas florestadas, não possibilita a correta caracterização da variabilidade das estruturas dendrométricas. Sendo assim, combinar dados de inventários florestais com análises geoestatísticas permite produzir mapas que fornecem a melhor espacialização de características dendrométricas para dada área (PELISSARI *et al.*, 2014).

FIGURA 3– MAPAS GERADOS POR INTERPOLAÇÃO DE: a) volume/ha IDW, (b) área basal/ha IDW, (c) altura dominante IDW, (d) volume/ha Krigagem Ordinária, (e) área basal/ha Krigagem Ordinária, (f) altura dominante Krigagem Ordinária.



FONTE: ZECH *et al.* (2014).

2.3 GEOESTATÍSTICA

A geoestatística é uma ferramenta estatística utilizada para analisar dados espaciais e temporais, levando em conta a autocorrelação espacial, ou seja, a correlação entre os dados próximos geograficamente. Segundo Cressie (1993), a geoestatística pode ser definida como o estudo de como fazer afirmações quantitativas precisas sobre propriedades geológicas e hidrológicas baseadas em medidas limitadas e incompletas de campo.

Nesse sentido, a geoestatística é amplamente utilizada em diversas áreas, como geologia, geografia, ecologia, engenharia de minas, engenharia civil, agricultura, entre outras. De acordo com Wackernagel (2003), a geoestatística é uma disciplina em constante evolução, não somente pelos avanços em técnicas computacionais e softwares, mas também pelos novos campos de aplicação que estão sendo explorados.

Portanto, a geoestatística é composta por diversas técnicas estatísticas, como a krigagem, que é utilizada para estimar valores em locais não amostrados, a análise de variância espacial, que é utilizada para analisar a variação espacial dos dados, e a modelagem geoestatística, que é utilizada para modelar a distribuição espacial dos dados. Segundo Chiles e Delfiner (2012), a geoestatística é uma ciência interdisciplinar que lida com problemas de estimativa e modelagem de fenômenos espacialmente distribuídos, com base em observações limitadas, incompletas e ruidosas.

2.4 KRIGAGEM ORDINÁRIA

De acordo com os autores Isaak e Serivastava (1989), existem vários tipos de interpolação de variáveis pela krigagem, através da Krigagem Ordinária, pontual, universal, de blocos, entre outras.

A Krigagem Ordinária, metodologia testada no presente trabalho, é definida como o melhor método de estimativa linear imparcial e pode ser aplicada em muitos campos, como na área florestal. O amplo uso da Krigagem Ordinária se deve à simplicidade do método pela média ponderada, que usa a informação estrutural fornecida pelo modelo de variograma e porque proporciona a incerteza associada à estimativa, por meio da variância de krigagem (YAMAMOTO, 2013).

A predição pela Krigagem Ordinária é baseada na fórmula da média ponderada, onde os ponderadores dependem da informação estrutural fornecida pelo variograma. Esta é a principal diferença em relação a outros métodos de estimativa como, por exemplo, o inverso da distância. O valor da variável de interesse em um ponto não amostrado é calculado como combinação linear dos pontos de dados vizinhos (YAMAMOTO, 2013).

Os métodos de krigagem dependem de modelos matemáticos e estatísticos, dependendo da noção de autocorrelação. A correlação é geralmente considerada como a tendência de dois tipos de variáveis que se relacionam e essa autocorrelação se dá em função da distância. Ou seja, em geoestatística, as informações sobre localizações espaciais permitem calcular distâncias entre observações para modelar a autocorrelação em função da distância (ESRI, 2019).

Para dados geoestatísticos, você tem os mesmos termos e eles são expressos da seguinte forma fórmula matemática simples:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (3)$$

Onde, $Z(s)$ é a variável de interesse, decomposta em uma tendência determinística $\mu(s)$ e um erro aleatório autocorrelacionado $\varepsilon(s)$. O símbolo s indica a localização. Em seguida, a análise de tendência pode ser uma constante simples, ou seja, $\mu(s) = m$ para todas as localizações s , e ainda, se μ for desconhecido, o modelo se baseia a krigagem ordinária. Sendo assim, este modelo pode ser composto de uma função linear das próprias coordenadas espaciais, de tendência polinomial de segunda ordem (ESRI, 2019), como por exemplo:

$$\mu(s) = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2y + \beta_3x^2 + \beta_4y^2 + \beta_5xy \quad (4)$$

Segundo um estudo de modelagem geoestatística associada à variáveis dendrométricas para a predição espacial de povoamento de *Tectona grandis* L. f., pode-se gerar mapas temáticos pela Krigagem Ordinária utilizando os parâmetros de semivariogramas empregados na krigagem simples como na TABELA 1 (PFUTZ, 2020).

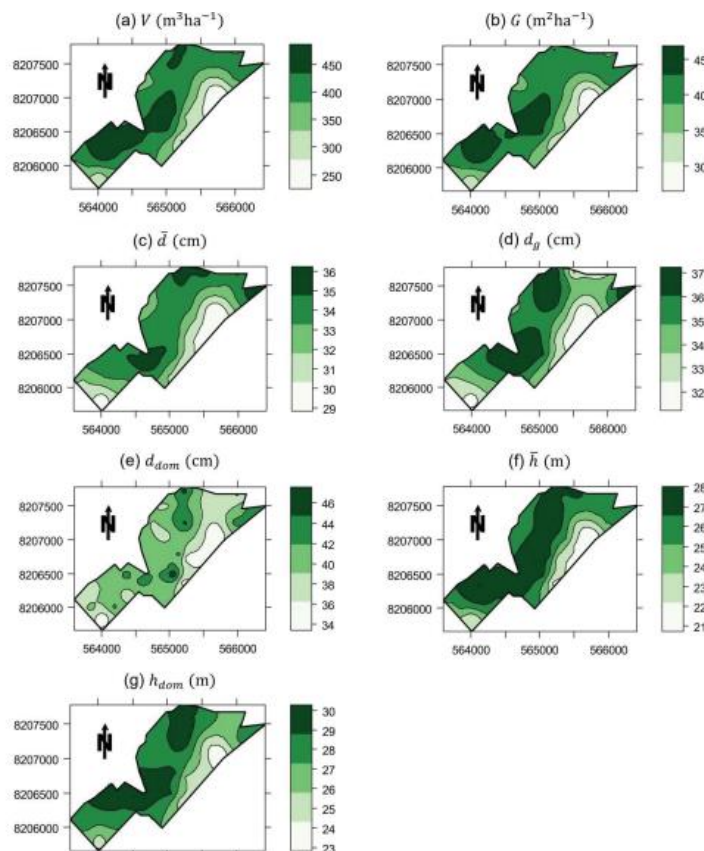
TABELA 1 – PARÂMETROS DE SEMIVARIOGRAMAS EMPREGADOS NA KRIGAGEM SIMPLES

Variáveis	Modelo	C_0	$C_0 + C$	a (m)	R^2	SQDP
Volume	Esférico	0,020	0,068	913	0,990	$1,71 \times 10^{-8}$
Área basal	Esférico	0,009	0,032	881	0,990	$3,73 \times 10^{-9}$
Diâmetro	Esférico	0,002	0,008	222	0,950	$6,33 \times 10^{-10}$
Altura	Esférico	0,002	0,011	829	0,994	$2,30 \times 10^{-10}$

FONTE: PFUTZ, adaptado (2020). Onde: efeito pepita (C_0); patamar ($C_0 + C$); alcance (a); estatísticas de ajuste coeficiente de determinação (R^2) e; soma dos quadrados dos desvios ponderados (SQDP).

A FIGURA 4 mostra que em detrimento dos parâmetros utilizados, houve semelhança entre os padrões espaciais, em que a região central apresentou os valores maiores para as variáveis do povoamento florestal, enquanto na região leste verificou-se valores menores (PFUTZ, 2020).

FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS VARIÁVEIS DO POVOAMENTO DE TECA POR KRIGAGEM ORDINÁRIA



FONTE: (PFUTZ, 2020).

Para Calixto *et al.* (2017), em função dos parâmetros geoestatísticos dos semivariogramas ajustados e selecionados para os sortimentos do volume comercial em povoamentos de *Pinus* sp. no município de Tunas do Paraná – Paraná, apresentados na TABELA 2, os valores dos coeficientes de regressão (R^2) dos semivariogramas foram superiores a 0,75 e inferiores a 0,95, uma vez que o maior foi obtido pelo modelo Gaussiano no sortimento 25 a 35 cm de diâmetro, com R^2 de

0,95. Enquanto, as somas de quadrados dos desvios ponderados (SQDP) foram de 24.860 a 2.169.051, com o melhor resultado para o modelo Gaussiano no sortimento oito a 18 cm de diâmetro.

TABELA 2 – PARÂMETROS DE SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA OS SORTIMENTOS DO VOLUME COMERCIAL EM POVOAMENTO DE *Pinus* sp.

Sortimento	Modelo	C_0	$C_0 + C$	a (m)	R^2	SQDP
8-18 cm	Gaussiano	866,6	2.148,2	1.600	0,881	24.860
18-25 cm	Gaussiano	1.200,0	2.833,0	240	0,815	42.844
25-35 cm	Gaussiano	2.925,0	11.107,0	1.876	0,950	978.804
> 35cm	Gaussiano	7.685,0	17.107,0	2.391	0,771	2.169.051

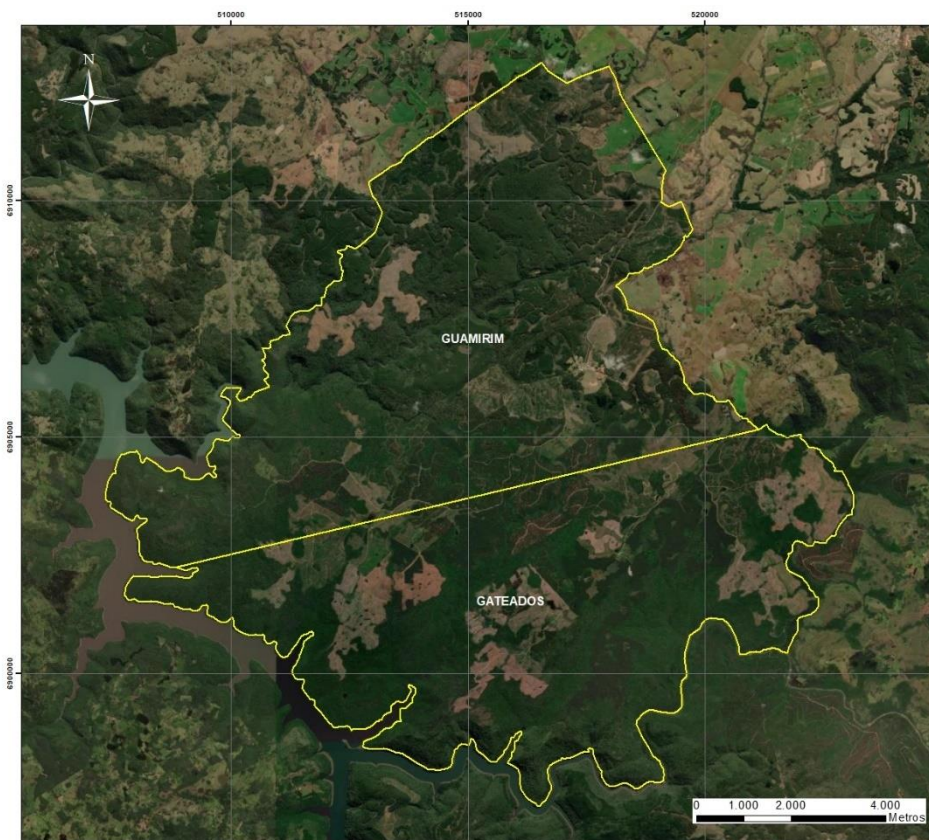
FONTE: CALIXTO, adaptado (2017). Onde: efeito pepita (C_0); patamar ($C_0 + C$); alcance (a); estatísticas de ajuste coeficiente de determinação (R^2) e; soma dos quadrados dos desvios ponderados (SQDP).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área deste estudo está localizada na região de Campo Belo do Sul no estado de Santa Catarina, com os limites geográficos situados nos limites das fazendas pertencentes a empresa Florestal Gateados Ltda. (FIGURA 5) entre as coordenadas 50°45' W e 51°05' W, e 27°35' S e 28°05' S.

FIGURA 5 – FAZENDAS GUAMIRIM E GATEADOS



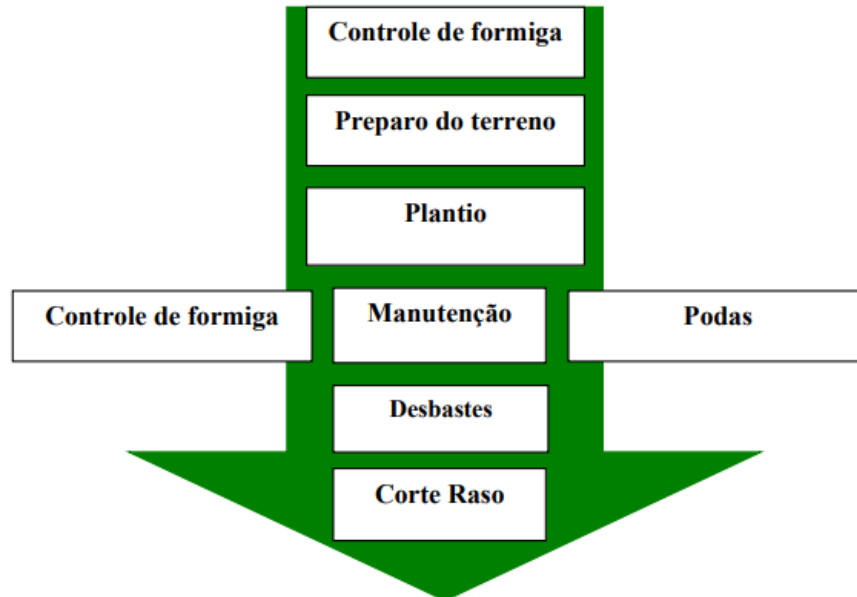
FONTE: GATEADOS, adaptado (2023).

O clima é classificado de acordo com Köppen como Cfb, sendo um clima temperado, com verão ameno (KOPPEN, 2010). Apresenta chuvas uniformemente distribuídas, com precipitação média anual acima de 1.300 mm, sem estação seca e a temperatura média do mês mais quente não chega a 22°C (KOPPEN, 2010). A temperatura média anual nos meses mais frios é inferior a 18 °C, enquanto a média anual dos meses mais quentes é superior a 22°C (ALVARES *et al.*, 2013).

De acordo com indicadores que determinam o grau de competição do povoamento (área basal e *Hart-Becking*), determina-se o projeto a ser colhido, bem

como a operação que deverá ser realizada, que pode ser de desbaste ou corte raso. Sendo assim, a empresa adota um regime de manejo básico para suas florestas comerciais, que consiste sinteticamente conforme FIGURA 6 (GATEADOS, 2020).

FIGURA 6 – REGIME DE MANEJO BÁSICO ADOTADO PELA FLORESTAL GATEADOS LTDA.



FONTE: GATEADOS (2023).

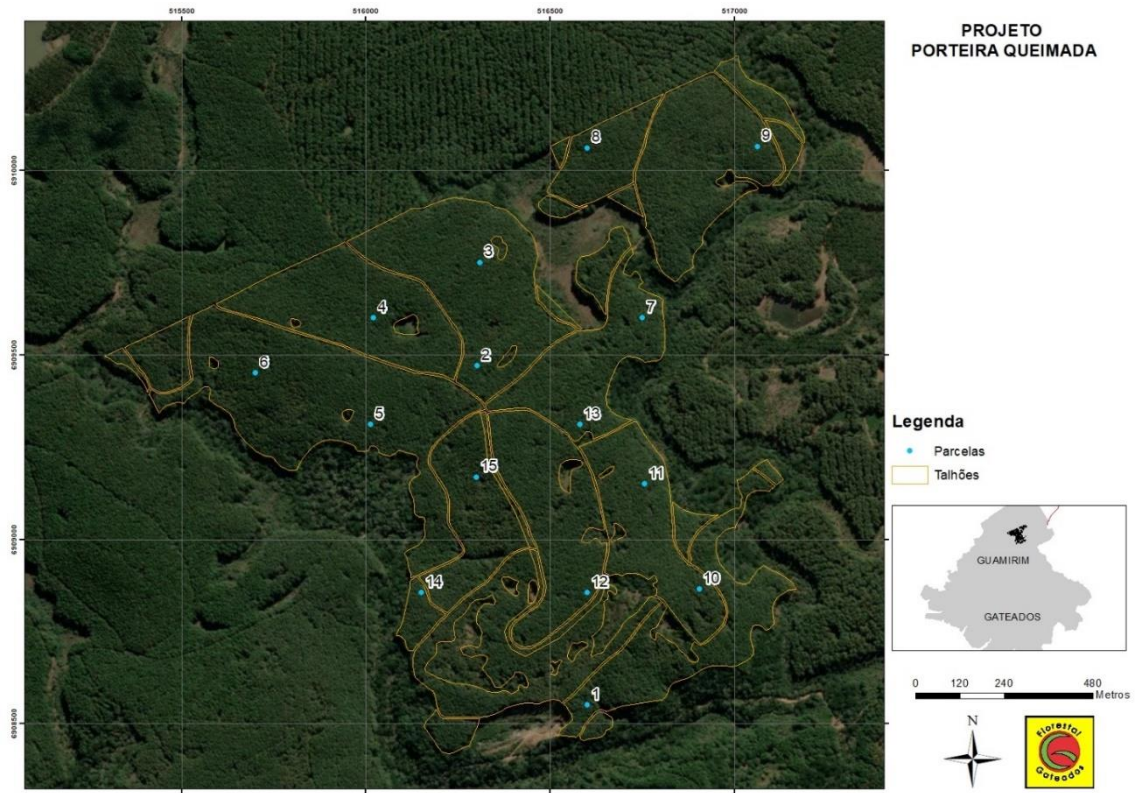
Como fonte de dados, foram utilizados dados mensurados pelo inventário florestal pré-corte de dois projetos de corte raso, com talhões de *Pinus taeda* L. de idades superiores a 30 anos, que apresentam espaçamentos de 2 m por 2 m. O projeto Porteira Queimada apresenta uma área total de 137,81 hectares, com 15 parcelas circulares instaladas de 500 m² cada FIGURA 7. O projeto Prefeito tem área total de 153,71 hectares, com 32 parcelas de 500 m² FIGURA 8. As características das áreas de estudo estão apresentadas na TABELA 3.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS DE ESTUDO

Características	Porteira Queimada	Prefeito
Área total projeto (ha)	137,81	153,71
Nº parcelas	15	32
Área das parcelas (m ²)	500	500
Espaçamento	2 m x 2 m	2 m x 2 m
Ano de plantio	1984	1984
Ano de corte	2020	2021
Idade	36 anos	37 anos
Intervenção	Corte raso	Corte raso
Fazenda	Guamirim	Gateados
Área total da fazenda (ha)	6.907,47	6.113,74

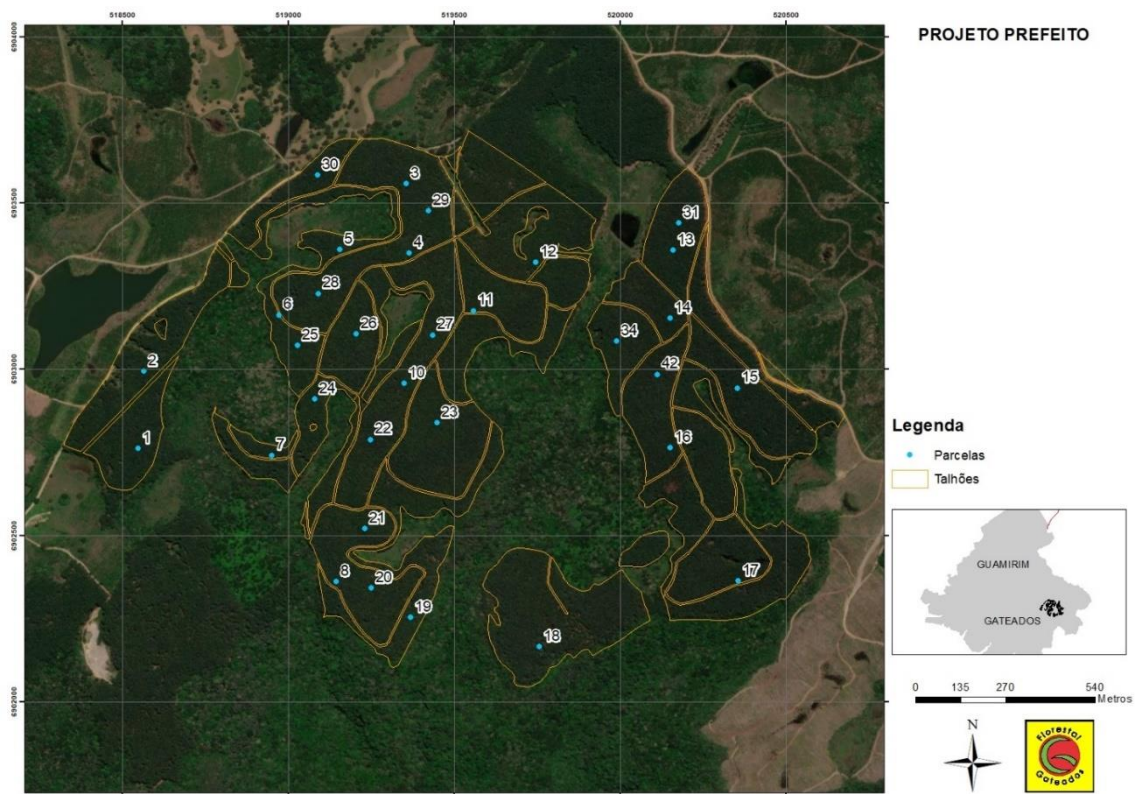
FONTE: GATEADOS, adaptado (2023).

FIGURA 7 – ÁREA DE ESTUDO PROJETO PORTEIRA QUEIMADA



FONTE: GATEADOS, adaptado (2023).

FIGURA 8 – ÁREA DE ESTUDO PROJETO PREFEITO



FONTE: GATEADOS, adaptado (2023).

No entanto, as estimativas tradicionais de inventário florestal pré-corte não levam em conta possíveis correlações com observações vizinhas. Este trabalho, portanto, tem como objetivo avaliar o potencial das técnicas de análise espacial usando o método de interpolação IDW e a geoestatística usando Krigagem Ordinária para a predição de variáveis dendrométricas no planejamento da produção em plantios de *Pinus taeda* L. pertencentes à Florestal Gateados Ltda.

Sendo assim, foram testadas três metodologias para a estimativa das variáveis dendrométricas em plantios de *Pinus taeda* L. i) abordagem com inventário tradicional; ii) interpolador IDW e iii) técnicas de krigagem ordinária.

3.2 ANÁLISE DE DADOS

3.2.1 Inventário florestal pré-corte

A empresa utiliza no IPC, o método de área fixa, com parcelas circulares de área igual a 500 m² e o processo de amostragem sistemática. A intensidade amostral (número de parcelas por projeto) é definida com base nos dados de inventários florestais anteriores. Nestes dados, deve-se avaliar a homogeneidade das parcelas quanto às variáveis de interesse, tais como número de árvores por hectare, diâmetro médio, altura dominante, área basal, volume individual médio e volume por hectare. Com base na variância destas variáveis é possível determinar o número de parcelas necessárias para se atingir um determinado nível de confiança de 95% (GATEADOS, 2020).

Para o processamento destes dados foi utilizado a ferramenta florestal desenvolvida para o MS Excel (FlorExel) que é composto por funções, bibliotecas e módulos para a realização de cálculos florestais. O FlorExel permite processar com elevada precisão os dados da floresta simulando diferentes padrões de traçamento, regras para códigos de qualidade, gerenciamento de downgrade, definição prévias das perdas por cortes de abate e traçamento, entre outros (OPTIMBER, 2021). O FlorExel inclui vários parâmetros importantes que são usados para estimar variáveis florestais como o volume de madeira e outras métricas. Alguns dos parâmetros mais comuns do FlorExel incluem:

Dados de entrada: informações sobre as árvores, como espécie, diâmetro, altura e posição geográfica; Modelos de distribuição de árvores: modelos estatísticos

para descrever a distribuição de árvores na floresta; Estimativas de volume: técnicas para a estimativa volumétrica da floresta; Métricas de biomassa: técnicas para estimar a biomassa total da floresta, incluindo biomassa da madeira, folhas, ramos e raízes; Modelos de crescimento: modelos de crescimento de árvores para prever o tamanho futuro das árvores e o volume de madeira disponível no futuro; Análises estatísticas: ferramentas para realizar análises estatísticas, como análise de variância, regressão e modelos lineares; Visualizações de dados: ferramentas para visualizar e exibir dados florestais, como gráficos, mapas e tabelas.

Os dados foram coletados em tablet pelo aplicativo *ForestMobile* e foram exportados para o computador e previamente analisados, utilizando o programa de processamento, corrigindo-se assim eventuais erros (GATEADOS, 2020).

Sendo assim, através da instalação de unidades amostrais, foi realizada a coleta de dados em campo e o processamento dos dados, sendo possível estimar as variáveis dendrométricas que são a base para as estimativas de volume, área basal e número de árvore por hectare dos povoamentos. Estas informações são obtidas por meio de avaliações periódicas da população, realizadas mediante um processo de amostragem. A população amostrada pelo IPC é composta por todos os povoamentos programados para o corte raso anual (GATEADOS, 2020).

De acordo com o procedimento operacional da empresa, o inventário florestal pré-corte (IPC) é realizado antes da intervenção de corte raso, para estimar as quantidades de madeira por sortimento que serão colhidos, bem como estabelecer formas e condições para a comercialização da madeira produzida, complementar a base de dados para a projeção de rendimentos dos povoamentos jovens, estimar o índice de sítio e área basal de cada povoamento, obter informações quanto à topografia dos talhões para microplanejamento da colheita e fazer o mapeamento da produtividade de cada parcela medida (GATEADOS, 2020).

Sendo assim, para ajuste das variáveis, foram utilizadas equações volumétricas de domínio sigiloso da empresa, considerando um erro de amostragem dentro de 10% com confiabilidade de 95% de probabilidade.

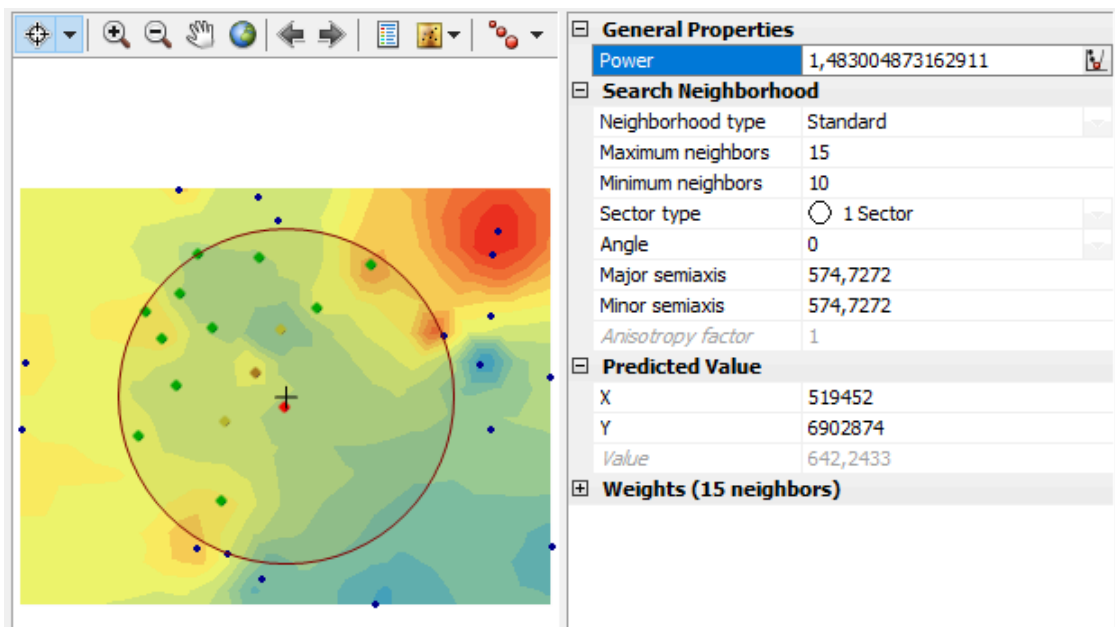
Ainda, a empresa utiliza um fator de conversão dos dados de volume estimados em metro cúbico para toneladas. Logo, para o presente estudo, considerou-se a unidade de medida padrão como metro cúbico para o volume mensurado, estimado e o volume real colhido em campo.

3.2.2 Ponderação do inverso da distância (IDW)

Para a aplicação do método de interpolação da ponderação do inverso da distância (IDW) foram utilizados os dados coletados em campo no inventário florestal pré-corte de cada projeto disponibilizados pela empresa Florestal Gateados Ltda.

O processamento das variáveis foi realizado através do software ArcGIS ArcMap 10.8 pela ferramenta de geoestatística IDW, com a configuração encontrada na FIGURA 9.

FIGURA 9 – PARÂMETROS UTILIZADO PARA A INTERPOLAÇÃO DAS VARIÁVIES PELO MÉTODO IDW



FONTE: A autora (2023).

A metodologia IDW depende principalmente do inverso da distância elevada a uma potência matemática (*power*). Este parâmetro de potência permite controlar o significado de pontos conhecidos nos valores interpolados com base em sua distância do ponto de saída. É um número real positivo e seu valor padrão é 2 (ESRI, 2019).

Ao definir um valor de potência mais alto, mais ênfase pode ser colocada nos pontos mais próximos. Ao especificar um valor mais baixo para potência dará mais influência aos pontos circundantes que estão mais distantes, resultando em uma superfície mais lisa (ESRI, 2019).

Sendo assim, foi utilizado um parâmetro de potência igual a 1,48 para atingir os pontos mais distantes de cada parcela. Na sequência, para a predição das

variáveis dendrométricas foram classificadas e recalculadas suas respectivas áreas representadas no talhão. Depois, cada área foi multiplicada pelo centro de classe para predizer o valor total de cada variável dendrométrica para os dois projetos. As TABELAS 4, 5, 6 e 7 a seguir apresentam a classificação para a predição de cada variável por classes no projeto Porteira Queimada.

TABELA 4 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA

Classe	Volume (m ³)	Área (ha)	Centro de classe
0	400 – 500	2,61	450
1	500 – 600	7,91	550
2	600 – 700	100,83	650
3	700 – 800	23,58	750
4	800 – 900	2,86	850

FONTE: A autora (2023).

TABELA 5 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO DIÂMETRO POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA

Classe	Volume (m ³)	Área (ha)	Centro de classe
0	45 – 47	0,52	46
1	47 – 49	69,31	48
2	49 – 51	67,98	50

FONTE: A autora (2023).

TABELA 6 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ALTURA POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA

Classe	Volume (m ³)	Área (ha)	Centro de classe
1	32 – 33	1,81	32,5
2	33 – 34	78,25	33,5
3	34 – 35	51,02	34,5
4	35 – 36	5,59	35,5
5	36 – 37	0,14	36,5

FONTE: A autora (2023).

TABELA 7 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ÁREA BASAL POR CLASSES PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA

Classe	Volume (m ³)	Área (ha)	Centro de classe
0	28 – 33	3,00	30,5
1	33 – 38	6,70	35,5
2	38 – 43	30,12	40,5
3	43 – 48	86,58	45,5
4	48 – 53	11,41	50,5

FONTE: A autora (2023).

Logo, as TABELAS 8, 9, 10 e 11 a seguir apresentam a classificação para a predição de cada variável por classes no projeto Prefeito.

TABELA 8 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO

Classe	Volume (m³)	Área (ha)	Centro de classe
1	480 – 580	21,94	530
2	580 – 680	70,50	630
3	680 – 780	56,70	730
4	780 – 880	4,57	830

FONTE: A autora (2023).

TABELA 9 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DO DIÂMETRO POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO

Classe	Volume (m³)	Área (ha)	Centro de classe
1	43 – 46	0,32	44,5
2	46 – 49	68,98	47,5
3	49 – 52	84,41	50,5

FONTE: A autora (2023).

TABELA 10 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ALTURA POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO

Classe	Volume (m³)	Área (ha)	Centro de classe
1	32 – 34	25,63	33
2	34 – 36	103,61	35
3	36 – 38	23,69	37
4	38 – 40	0,78	39

FONTE: A autora (2023).

TABELA 11 – CÁLCULO PARA A PREDIÇÃO DA ÁREA BASAL POR CLASSES PARA O PROJETO PREFEITO

Classe	Volume (m³)	Área (ha)	Centro de classe
1	35 – 41	23,24	38
2	41 – 47	123,96	44
3	47 – 53	6,51	50

FONTE: A autora (2023).

Neste contexto, as ilustrações das predições totais de cada variável dendrométrica pelo método IDW estão apresentadas em intervalos de classes nos apêndices deste trabalho.

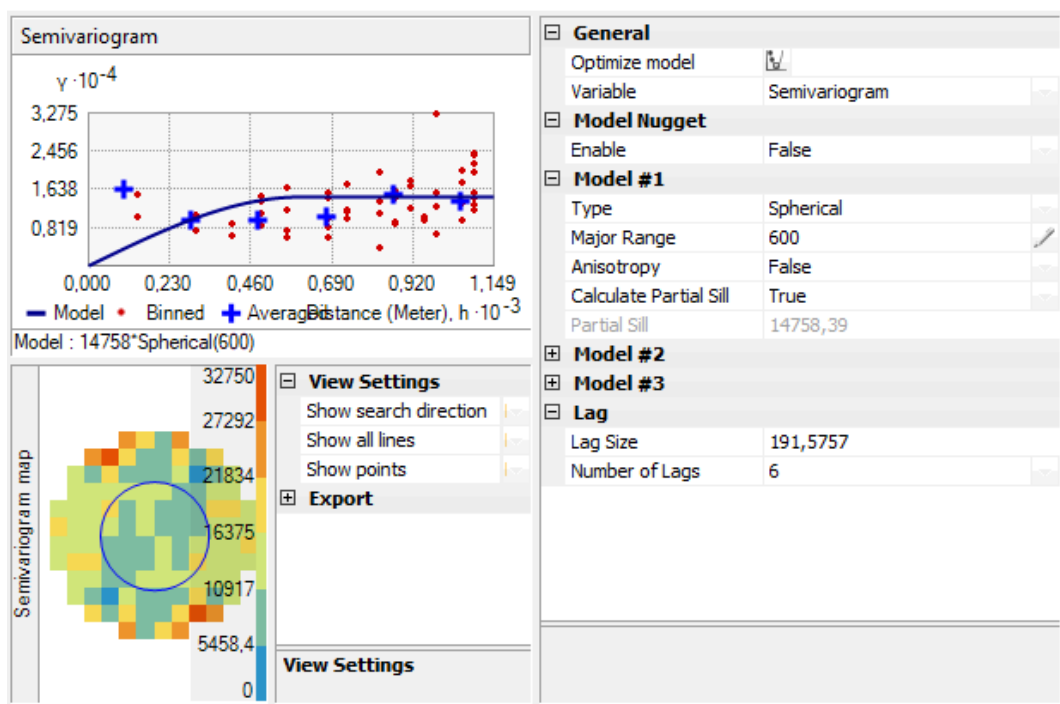
3.2.3 Krigagem ordinária

Segundo Yamamoto (2013), a Krigagem Ordinária é o método de interpolação mais usual, devido sua simplicidade e bons resultados, além disso, seu

sucesso está interligado ao fato de que a krigagem ordinária foi o primeiro método de estimação a viabilizar um grau de incerteza pela variância da krigagem.

Para a aplicação da Geoestatística pelo método de Krigagem Ordinária também foram utilizados os dados coletados em campo no inventário florestal pré-corte de cada projeto. O processamento das variáveis foi realizado através do software ArcGIS, pela ferramenta de análise espacial de acordo com os parâmetros apresentados na FIGURA 10.

FIGURA 10 – PARÂMETROS UTILIZADO PARA A INTERPOLAÇÃO DAS VARIÁVIES PELO MÉTODO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA



FONTE: A autora (2023).

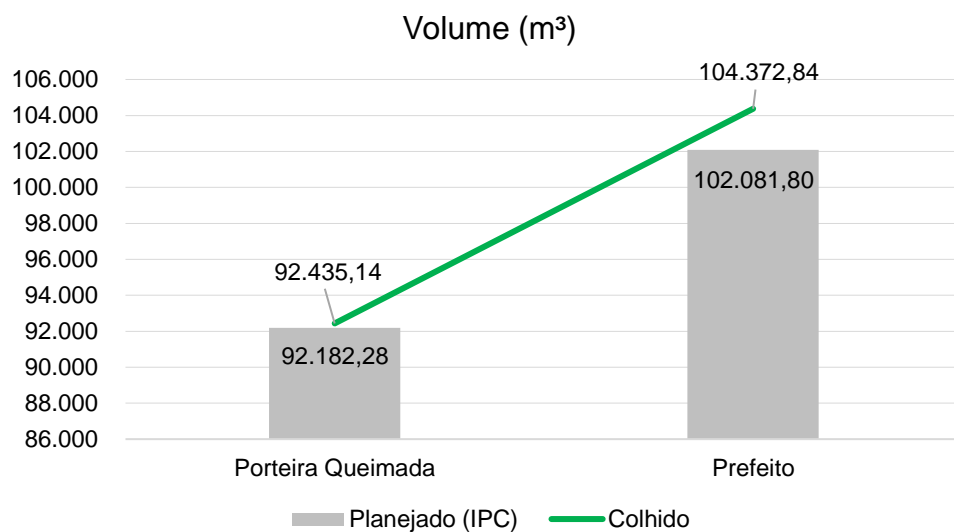
Para ajustar o semivariograma, o modelo esférico é um dos modelos mais utilizados. Uma vez que, este é um modelo simples e de fácil entendimento, é versátil e pode ser aplicado em uma ampla variedade de situações, incluindo florestas, minas e outros ambientes. Apresenta uma boa consistência nas estimativas e tende a produzir resultados precisos mesmo com dados limitados. E por fim, não apresenta problemas de instabilidade, mesmo quando os dados apresentam variações significativas (CAMARGO *et al.*, 2002).

Para a predição das variáveis dendrométricas, foram classificadas e recalculadas suas respectivas áreas representadas no talhão. Posteriormente, a área foi multiplicada pelo centro de classe conforme arquivo anexo deste trabalho.

3.2.4 Aferição do volume (m³) planejado e colhido

Conforme apresentado no GRAFICO 1, após aferição da balança da empresa, o projeto Porteira Queimada resultou em um valor superestimado de 92.435,14 m³ colhido em função dos 92.182,28 m³ estimados no inventário pré-corte tradicional. Já o projeto Prefeito teve o volume estimado no inventário pré-corte subestimado em 102.081,80 m³, comparado aos 104.372,84 m³ colhidos.

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA POR PROJETO



FONTE: A autora (2023).

Nos anos de corte raso destes dois projetos em 2020 e 2021, o inventário tradicional aplicado pela empresa utilizava como padrão o limite de erro admissível em 5% em função do volume planejado pelo IPC ao volume colhido em campo.

Considerando o novo padrão adotado pela empresa Florestal Gateados Ltda. em 2023, o limite máximo de erro admissível estabelece variações no planejamento da produção volumétrica dentro de 2%.

O projeto Porteira Queimada apresentou um erro em função do volume planejado pelo IPC comparado ao volume colhido em campo de 0,3% acima da produção esperada. Já o projeto Prefeito resultou em um erro de 2,2% a mais do volume esperado no planejamento da produção pelo IPC. Portanto, observou-se que para os dois projetos os erros apresentados estão dentro do limite admissível

utilizado pela Florestal Gateados Ltda. de 5% para os anos de corte entre 2020 a 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da interpolação realizada com a aplicação das duas metodologias geoespaciais IDW e a Krigagem Ordinária, foi possível obter a predição das variáveis dendrométricas em intervalos classes para toda a extensão dos talhões dos dois povoamentos florestais, conforme apêndices.

Os dados mensurados pelo inventário florestal são apresentados nas TABELAS 12 e 13.

TABELA 12 – DADOS INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ CORTE PROJETO PORTEIRA QUEIMADA

Parcela	Volume Comercial (m ³)	Diâmetro (cm)	Altura (m)	Área basal (m ²)
1	631,29	46,9	37,1	39,03
2	667,44	51,0	34,0	45,13
3	703,63	47,1	34,9	46,03
4	689,51	49,8	34,1	47,14
5	754,43	52,2	34,0	52,02
6	670,25	46,2	34,4	44,66
7	405,25	50,3	32,1	28,61
8	882,21	50,5	37,8	53,30
9	601,49	47,5	34,8	39,81
10	748,21	50,9	38,0	45,23
11	693,67	49,6	34,5	46,62
12	645,28	49,6	34,0	43,37
13	518,52	48,4	35,5	33,55
14	652,91	45,8	34,2	43,65
15	769,54	46,4	36,5	48,25
Média	668,91	48,8	35,1	43,44

FONTE: GATEADOS, adaptado (2023).

TABELA 13 – DADOS INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ CORTE PROJETO PREFEITO

Parcela	Volume Comercial (m ³)	Diâmetro (cm)	Altura (m)	Área basal (m ²)
1	708,76	49,3	35,3	46,92
2	724,83	47,6	35,2	47,55
3	670,01	48,0	35,2	43,98
4	655,66	49,1	35,2	42,49
5	636,35	50,9	35,4	41,45
6	764,93	48,4	34,3	52,17
7	697,90	46,7	36,8	44,72
8	794,60	48,3	37,5	48,79
10	782,04	51,8	35,4	51,34
11	711,99	49,8	35,3	47,41
12	780,02	51,6	38,5	46,35
13	851,78	48,4	38,1	52,71
14	727,88	50,8	34,4	49,01
15	630,33	47,8	33,5	43,44
16	634,99	44,3	33,8	43,92
17	525,99	46,1	33,4	37,33
18	469,76	48,4	32,0	33,89
19	477,44	46,6	32,1	34,24
20	708,34	52,5	35,2	48,52
21	739,83	51,1	34,9	50,30
22	650,72	48,0	34,1	44,08

Parcela	Volume Comercial (m ³)	Diâmetro (cm)	Altura (m)	Área basal (m ²)
23	619,61	49,0	36,7	38,73
24	621,25	49,9	36,0	39,68
25	768,51	50,3	36,6	48,82
26	650,26	50,2	33,9	45,09
27	451,49	50,5	31,9	32,38
28	630,77	49,0	35,4	42,72
29	668,46	47,5	34,3	46,81
30	744,67	49,3	35,2	50,03
31	869,64	48,7	37,6	53,31
34	822,69	52,1	39,4	47,83
42	386,87	45,5	33,7	26,38
Média	674,32	49,0	35,2	44,45

FONTE: GATEADOS, adaptado (2023).

Nas TABELAS 14 e 15 são apresentados os resultados dos diferentes métodos utilizados para a predição das quatro variáveis dendrométricas. Para o projeto Porteira Queimada a metodologia que mais se aproximou ao volume real colhido foi o método de Krigagem Ordinária. No entanto, o resultado estimado pelo inventário florestal pré-corte apresentou maior precisão quando comparado ao volume colhido aferido na balança da empresa.

Para o projeto Prefeito, a Krigagem Ordinária resultou em um volume mais próximo ao volume real colhido em campo, porém o volume estimado pelo inventário pré-corte apresentou resultado mais próximo em relação ao volume colhido.

Sendo assim, é notável que as duas metodologias de interpolação para a predição de variáveis apresentaram valores menores ao volume real colhido em campo.

TABELA 14 – RESULTADOS POR METODOLOGIAS PROJETO PORTEIRA QUEIMADA

Variável	IPC*	IDW	Krigagem Ordinária	Colhido
Volume (m ³)	92.182,28	91.190,38	91.945,87	92.435,14
Diâmetro (cm)	48,82	48,98	48,67	
Altura (m)	35,07	33,94	34,43	
Área basal (m ²)	43,76	44,01	43,77	

FONTE: A autora (2023). *Onde: LI-IC = 83.763,67 m³ e LS-IC = 100.601,30 m³.

TABELA 15 – RESULTADOS POR METODOLOGIAS PROJETO PREFEITO

Variável	IPC*	IDW	Krigagem Ordinária	Colhido
Volume (m ³)	102.081,80	101.225,90	101.417,36	104.372,84
Diâmetro (cm)	49,00	49,14	48,65	
Altura (m)	35,20	35,00	34,95	
Área basal (m ²)	44,45	43,35	43,58	

FONTE: A autora (2023). *Onde: LI-IC = 97.246,16 m³ e LS-IC = 110.054,82 m³.

Considerando o erro mínimo admissível na literatura ser de 10% para o inventário tradicional (PELLICO NETTO e BRENA, 1996), a estimativa do volume pelo IPC para o projeto Porteira Queimada apresentou erro de amostragem de 9,13% enquanto o projeto Prefeito resultou em um erro de 6,18%. Logo, o volume colhido em campo está dentro do erro de amostragem, comparado ao volume planejado pelo IPC.

Sendo assim, o desvio padronizado ponderado pelas áreas das classes de ocorrência está apresentado nas TABELAS 16 e 17.

Para o projeto Porteira Queimada, a predição da variável volume pela metodologia IDW, apresentou 0,70 desvios acima da média e -0,03 desvios abaixo para o processamento pela Krigagem Ordinária. Enquanto, o projeto Prefeito resultou em -0,07 desvios abaixo da média na metodologia IDW e 0,01 desvios acima da média na Krigagem Ordinária.

TABELA 16 – DESVIO PADRONIZADO PONDERADO PELAS ÁREAS DAS CLASSES DO PROJETO PORTEIRA QUEIMADA

Variável	Desvio IDW	Desvio Krigagem Ordinária
Volume (m ³)	0,0700	-0,0387
Diâmetro (cm)	-0,0233	-0,1079
Altura (m)	0,0363	0,1575
Área basal (m ²)	-0,0112	-0,0608

FONTE: A autora (2023).

TABELA 17 – DESVIO PADRONIZADO PONDERADO PELAS ÁREAS DAS CLASSES DO PROJETO PREFEITO

Variável	Desvio IDW	Desvio Krigagem Ordinária
Volume (m ³)	-0,0777	0,0192
Diâmetro (cm)	-0,1556	-0,0293
Altura (m)	-0,0884	0,0565
Área basal (m ²)	-0,0571	0,0520

FONTE: A autora (2023).

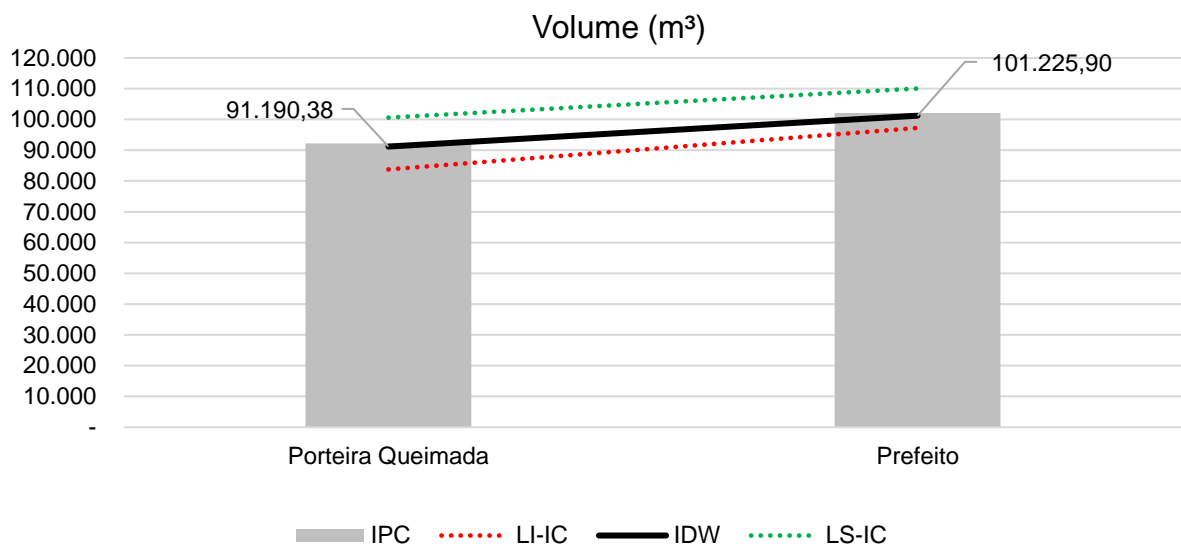
Analisando os valores estimados pelo IPC para o projeto Porteira Queimada (ou seja, 92.182,28 m³) e seus respectivos intervalos de confiança para 95% de probabilidade (ou seja, uma variação entre 83.763,67 m³ e LS-IC = 100.601,30 m³), percebe-se que tanto a interpolação pela IDW (91.190,38 m³) quanto pela Krigagem Ordinária (91.945,87 m³) estão contempladas por este intervalo de confiança.

No caso do projeto Prefeito, a estimativa pelo IPC foi de 102.081,80 m³ tendo como intervalos de confiança para 95% de probabilidade os valores de 97.246,16 m³ e 110.054,82 m³, percebe-se que tanto a interpolação pela IDW (101.225,90 m³) quanto pela Krigagem Ordinária (101.417,36 m³) estão

contempladas por este intervalo de confiança. Neste cenário, seguindo a mesma tendência do projeto anterior, tanto a estimativa da IDW (101.225,90 m³) quanto da Krigagem Ordinária (101.417,36 m³) encontraram-se contempladas pelo intervalo de confiança para 95% de probabilidade.

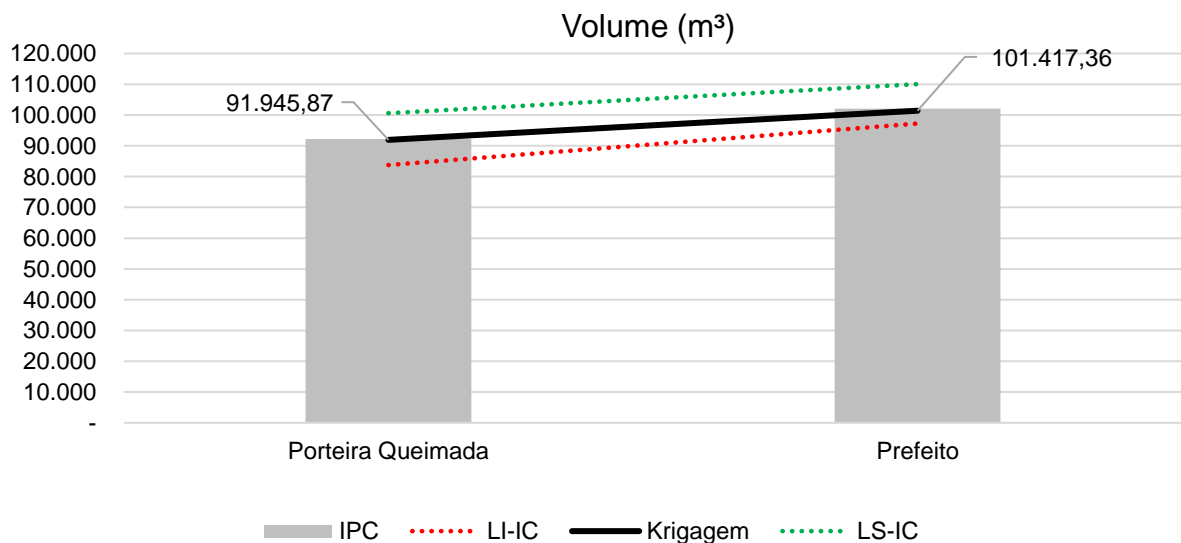
Diante das observações apresentadas nos GRÁFICOS 2 e 3, como o valor paramétrico deverá estar contemplado pelo intervalo de confiança, pode-se dizer que ambas as abordagens resultariam em valor admissíveis para utilização nos inventários florestais.

GRÁFICO 2 – PREDIÇÃO DO VOLUME PELO MÉTODO IDW



FONTE: A autora (2023).

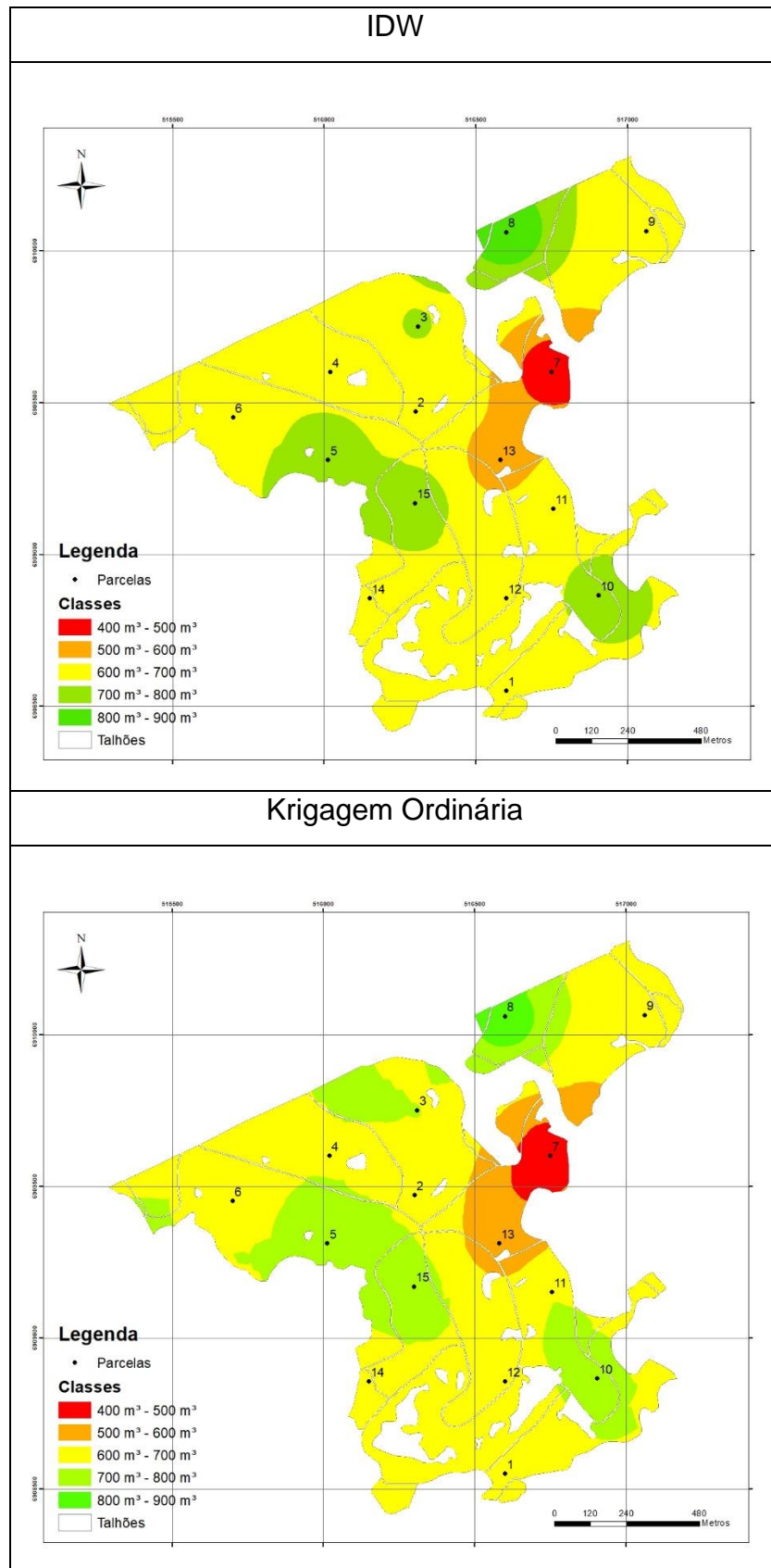
GRÁFICO 3 – PREDIÇÃO DO VOLUME PELO MÉTODO KRIGAGEM ORDINÁRIA



FONTE: A autora (2023).

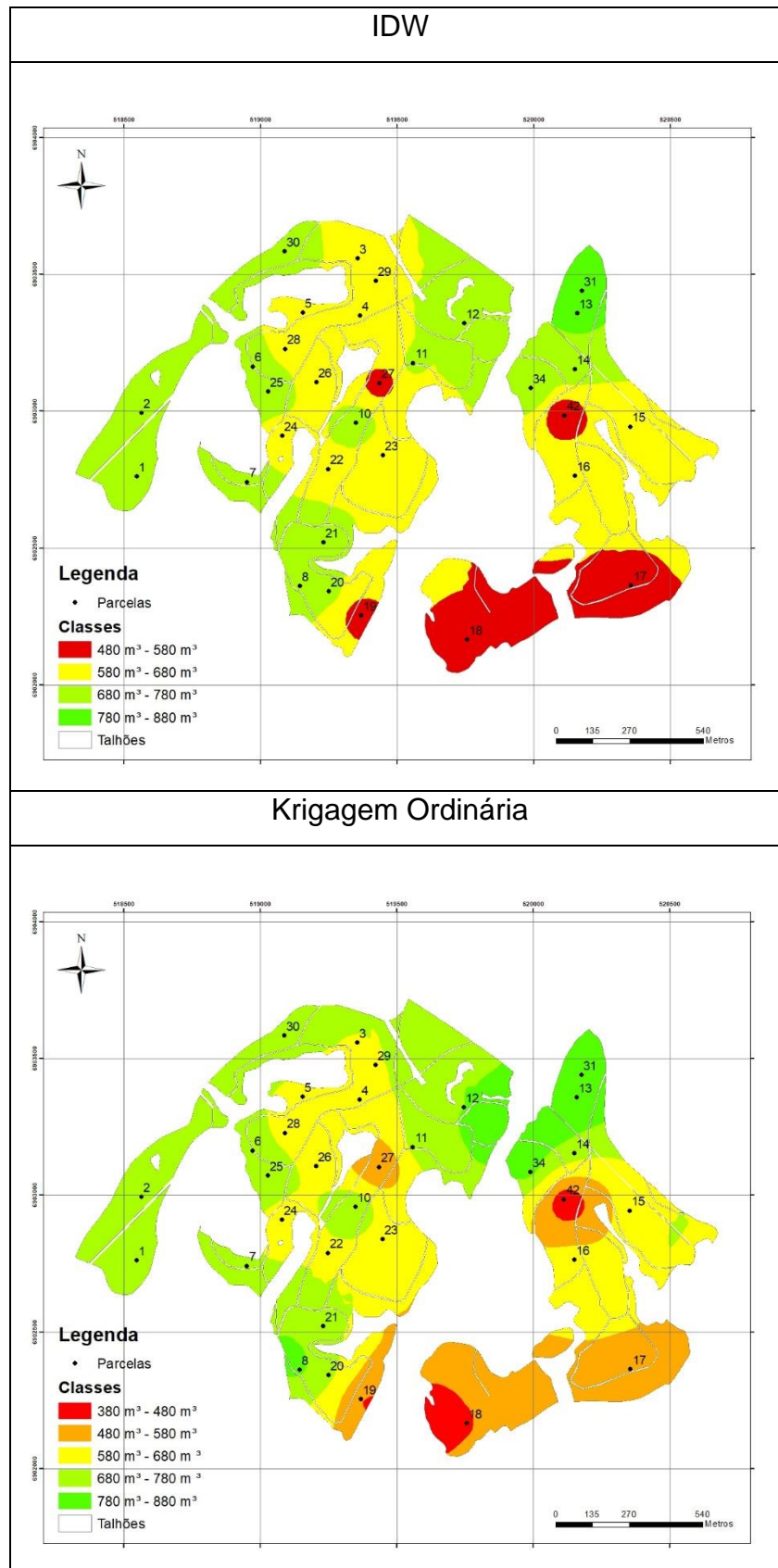
As predições pelo IDW e Krigagem Ordinária, para o volume para os dois projetos estão apresentados nas FIGURAS 11 e 12. O comportamento espacial das demais variáveis dendrométricas (diâmetro, altura e área basal) se aproximaram muito entre as metodologias testadas e estão apresentadas em intervalos de classes nos apêndices deste trabalho.

FIGURA 11 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 12 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME PARA O PROJETO PREFEITO



FONTE: A autora (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se nessa pesquisa, o potencial das abordagens espaciais e de geoestatísticas testadas como alternativas para a aplicação nos inventários pré-corte, com estimativas contempladas dentro dos intervalos de confiança resultantes das técnicas tradicionais.

Portanto, como observou-se maior facilidade da aplicação do IDW em relação a técnica de geoestatística para o caso em tela, sugere-se sua adoção em caso de necessidade de avaliação espacial de distribuição das variáveis aqui estudadas. No entanto, essas duas metodologias aplicadas não servem para todos os projetos da empresa, em função da diversidade dos povoamentos florestais em relação a idade, tamanho do talhão, distribuição das parcelas e intervenções de desbastes. Destaca-se também que o inventário florestal tradicional resultou em valores estimados mais próximos aos valores de produção volumétrica colhido em campo, demonstrando, portanto, a consistência das técnicas tradicionais utilizadas nos inventários florestais.

Contudo, o melhor método para a predição das variáveis continua sendo o inventário florestal pré-corte já adotado pela empresa, uma vez que esta metodologia apresentou maior precisão dos resultados e é eficiente para povoamentos florestais que tenham corte raso ou intervenção por desbastes.

REFERÊNCIAS

“CISAMA”. **CISAMA**. Disponível em: <<https://cisama.sc.gov.br/404>>. Acesso em 25 de janeiro de 2023.

“**Florexel**”. Optimber. Disponível em: <<https://optimber.com.br/florexel/>>. Acesso em 27 de janeiro de 2023.

“**How IDW works ArcMap Documentation**”. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>>. Acesso em 25 de janeiro de 2023.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppen’s climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart, v. 22, n. 6, p.711-728, 2013.

Ambiência Guarapuava (PR) v.8 n.1 p. 61 - 71 jan./abr. 2012.

CABACINHA, C.D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. Lavras, 2003. 116p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras.

Chiles, J. P., & Delfiner, P. (2012). **Geostatistics: modeling spatial uncertainty (Vol. 497)**. John Wiley & Sons.

Cressie, N. A. (1993). **Statistics for spatial data** (No. 613.697 C737s). John Wiley & Sons.

COHEN, W.B.; SPIES, T.A.; BRADSHAW, G.A. **Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure**. Remote Sensing of Environment, v.34, n.3, p.167-178, 1990.

Digital, Ueek Agência. “**Florestal Gateados - Referência em Manejo Florestal**”. Florestal Gateados - Referência em Manejo Florestal. Disponível em: <<https://www.gateados.com.br/>>. Acesso em 27 de janeiro de 2023.

Druszcz, João Paulo, *et al.* “**EFICIÊNCIA DE INVENTÁRIO FLORESTAL COM AMOSTRAGEM PONTO DE BITTERLICH E CONGLOMERADO EM LINHA EM PLANTAÇÃO DE *Pinus taeda***”. FLORESTA, vol. 42, no 3, outubro de 2012, p. 527–38. revistas.ufpr.br. Disponível em: <<https://doi.org/10.5380/rf.v42i3.25453>>. Acesso em 25 de janeiro de 2023.

GISGeography. “**Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation**”. GIS Geography, 22 de maio de 2016. Disponível em: <<https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>>. Acesso em 25 de janeiro de 2023.

INPE. **Análise de superfícies**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap3-superficies/>>. Acesso em 25 de janeiro de 2023.

IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. **Uso de interpoladores espaciais na estratificação estatística de *Pinus taeda***. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr117/cap08.pdf>>. Acesso em 25 de janeiro de 2023. Sci. For., Piracicaba, v. 46, n. 117, p. 87-96, mar. 2018.

MELLO, J.M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Piracicaba, 2004. 122p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.

MELLO, J.M.; OLIVEIRA, M.S.; BATISTA, J.L.F.; RIBEIRO JR, P.J.; KANEGAE JR, H. **Uso do Estimador Geoestatístico para predição volumétrica por talhão**. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 36, n. 2, mai./ago. 2006.

OSBORNE, J.G. **Sampling errors of systematic and random surveys of cover-type areas**. Journal Statistics Association, v.37, p.256-264, 1942.

PELLISSARI, A. L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; CALDEIRA, S. F.; MACHADO, S. A. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso**. Revista Brasileira de Biometria, Lavras, v. 32, n. 3, p. 430–444, 2014.

PELLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. **Inventário florestal**. Curitiba: Sylvio Pellico Netto/Doadi Antonio Brena, 1996.

PELLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. **Inventário florestal**. Curitiba: Sylvio Pellico Netto/Doadi Antonio Brena, 1997. v.1

PELLICO NETTO, S.; SANQUETTA, C.R. **Ganhos de precisão na alocação ótima em estratificação volumétrica de florestas naturais e plantações florestais**. Floresta, v.27, n.1/2, p.71-82, jun./dez.1997.

PFUTZ, I. E. **Modelagem geoestatística associada à variáveis dendrométricas e de sensoriamento remoto para predição espacial em povoamento de *Tectona grandis***. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/68507/R%20-%20D%20-%20IASMIN%20FERNANDA%20PORTELA%20PFUTZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 25 de janeiro de 2023.

SAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560p.

UFSC. **Materioteca Sustentável**. Disponível em: <<https://materioteca.paginas.ufsc.br/pinus-taeda/>>. Acesso em 27 de janeiro de 2023.

Wackernagel, H. (2003). **Multivariate geostatistics: an introduction with applications (Vol. 36)**. Springer Science & Business Media.

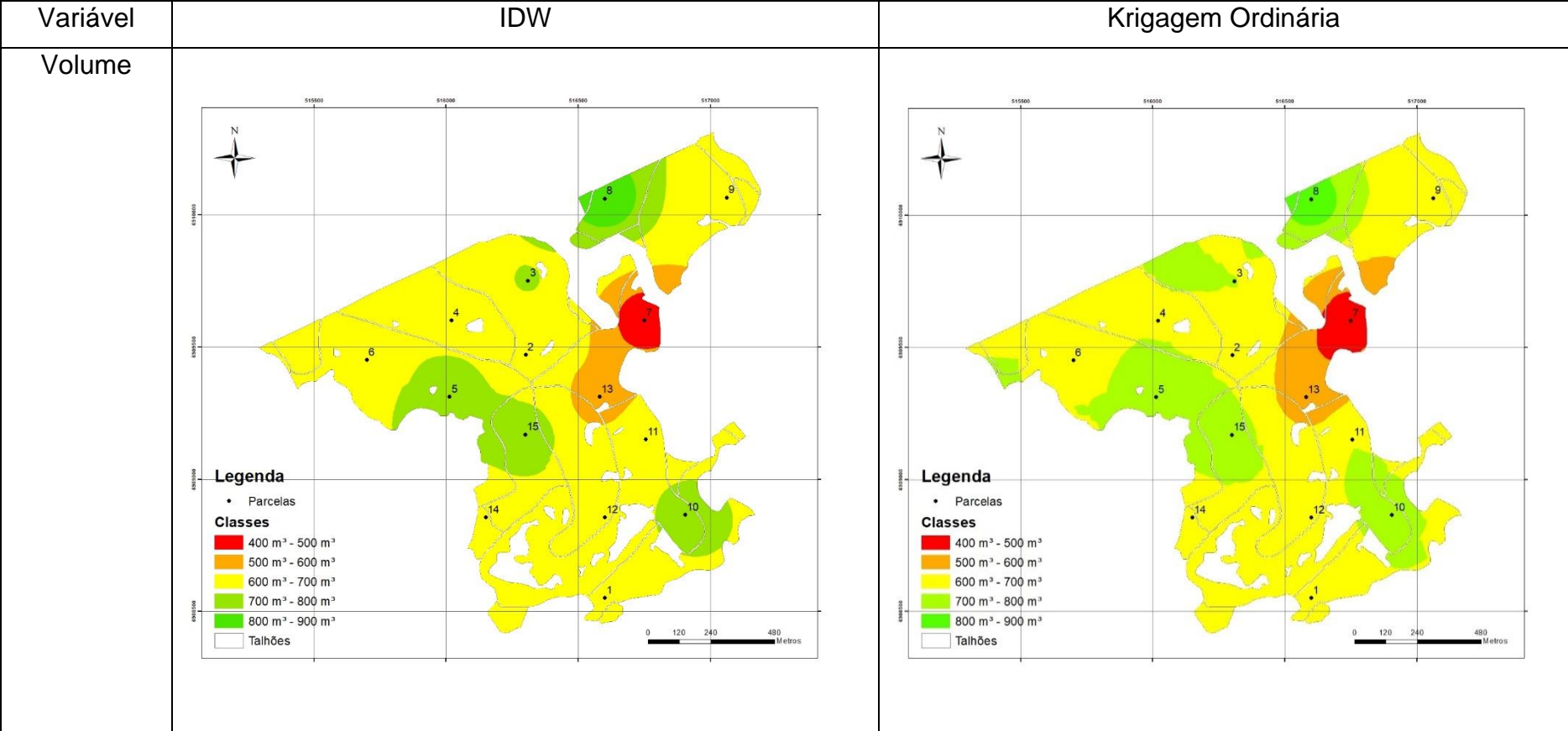
WULDER, M.; LAVIGNE, M.; FRANKLIN, S. **High spatial resolution optical image**

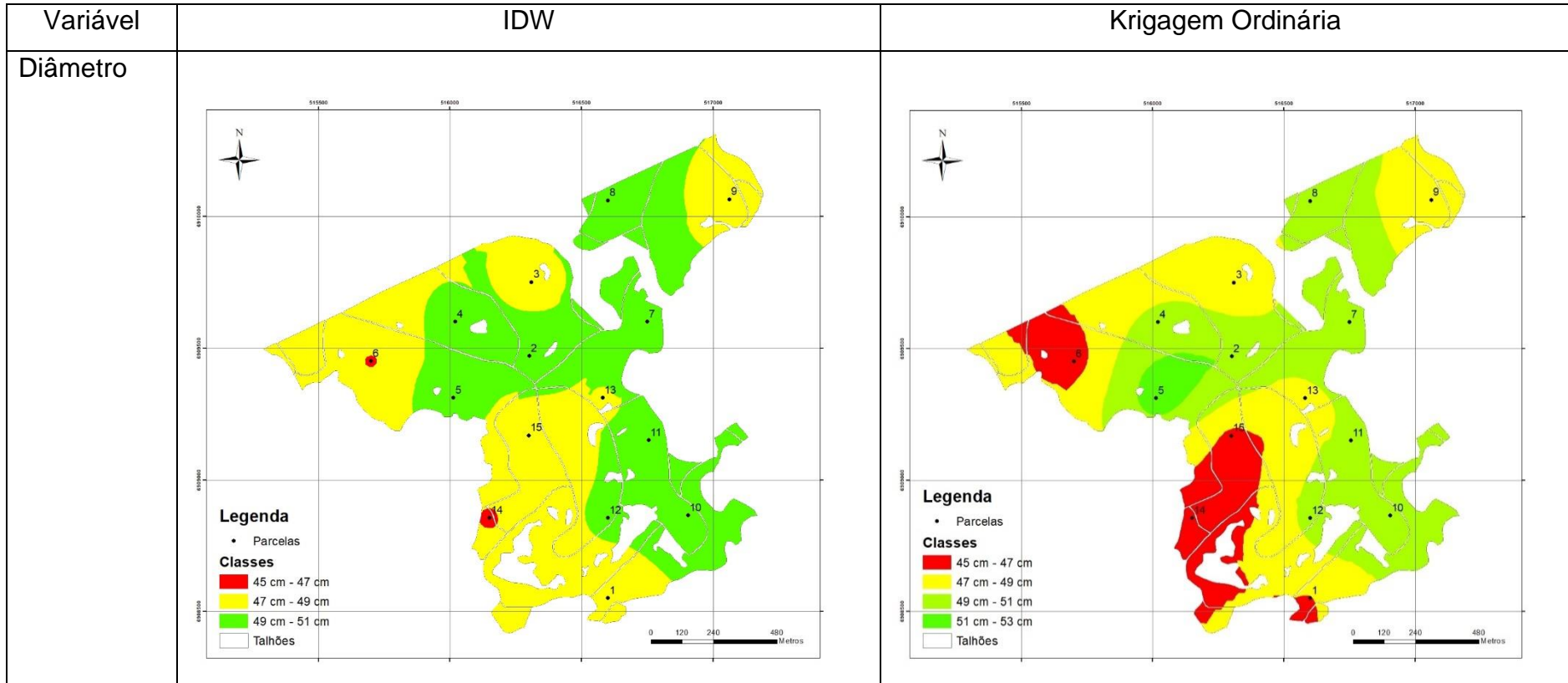
texture for improved estimation of forest stand leaf area index. Canadian Journal of Remote Sensing, v.22, n.4, p.441-449, 1996.

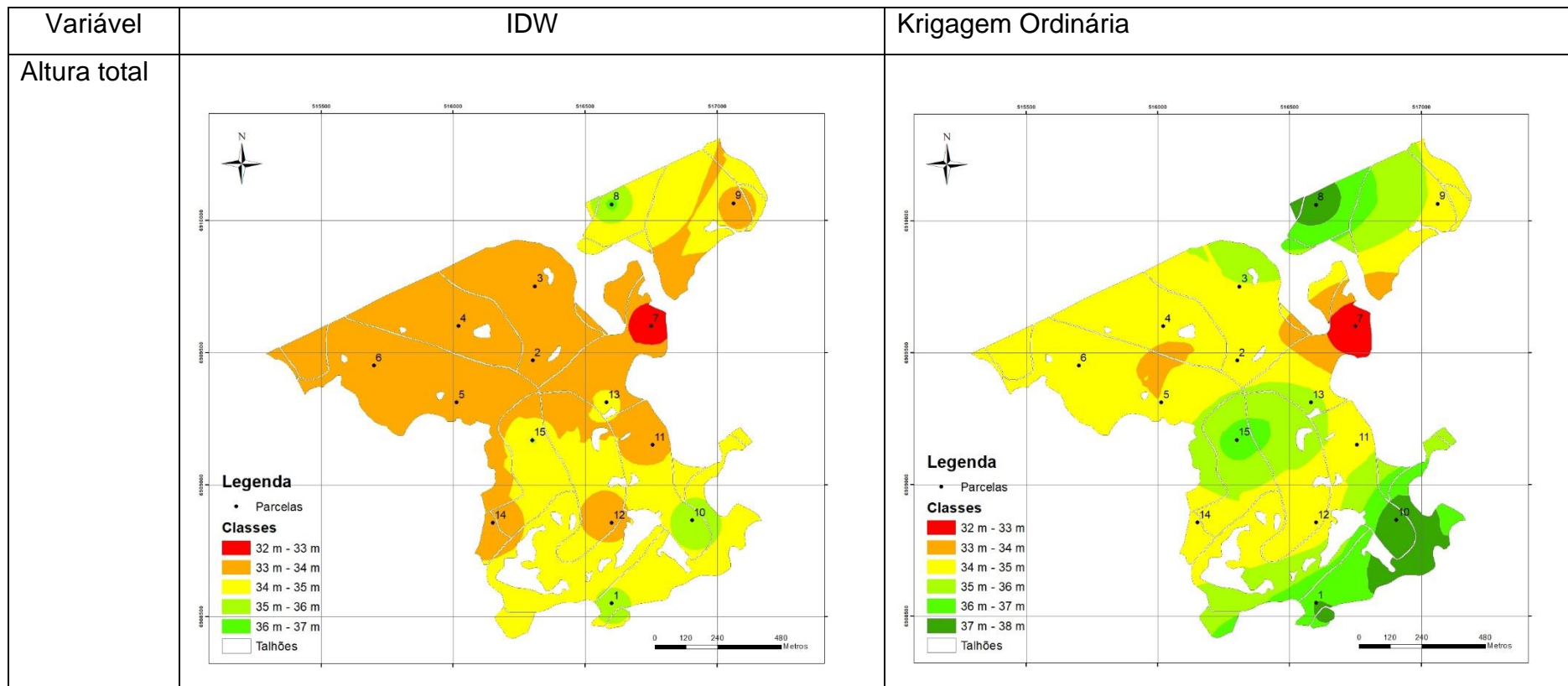
YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e classificação de reservas minerais.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. 226p.

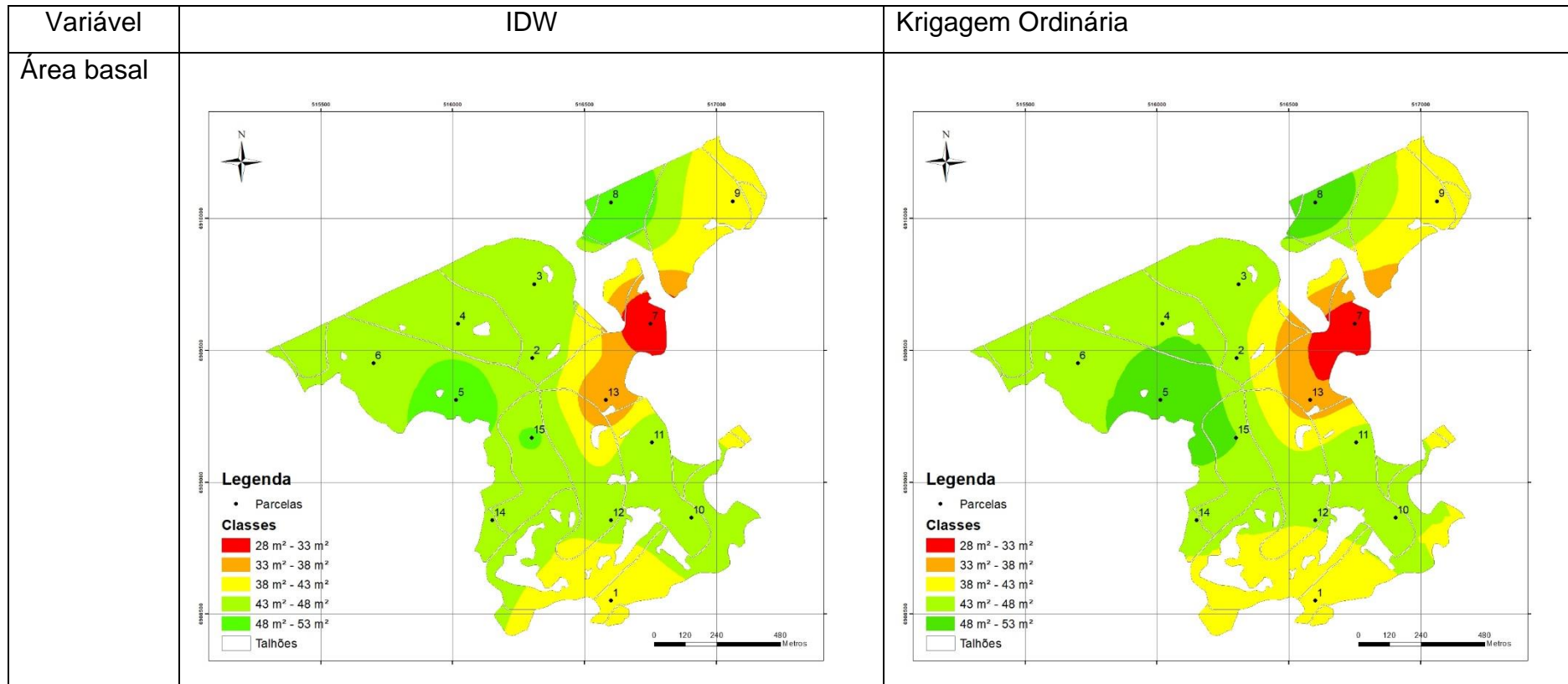
ZONETE, M. C. **Avaliação do uso de Técnicas de Interpolação para estimativa de Volume em Florestas Clonais de *Eucalyptus* sp.** Piracicaba, 2009. Dissertação - Universidade De São Paulo Escola Superior De Agricultura "Luiz De Queiroz".

APÊNDICE 1 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS PARA O PROJETO PORTEIRA QUEIMADA









APÊNDICE 2 – VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE PREDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS PARA O PROJETO PREFEITO

