

Variabilidade espacial do volume e dos atributos do solo em plantio de *Pinus taeda*

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a variabilidade espacial do volume médio das árvores de *Pinus taeda* e dos atributos físicos e químicos do solo, bem como verificar em que medida esses fatores afetam a produtividade das árvores. A coleta de dados foi realizada em um talhão de *P. taeda* de 1214,34 hectares, localizado no município de Água Doce, no oeste do estado de Santa Catarina. Foram mensuradas árvores em 64 parcelas, e amostras de solo foram coletadas para a obtenção de seus atributos físico-químicos. Foi realizada uma análise de correlação entre as variáveis e o volume médio individual das árvores. As variáveis com correlação acima de 0,20 e abaixo de -0,20 foram selecionadas para a análise geoestatística, que incluiu estatística descritiva, ajuste do semivariograma, interpolação dos pontos não amostrados por meio da Krigagem Ordinária e a produção de mapas isaritmico. Todas as variáveis utilizadas neste estudo apresentaram dependência espacial, e foi possível verificar que, em maior ou menor amplitude, as variações nos atributos físicos e químicos do solo influenciam no volume médio individual das árvores.

PALAVRAS-CHAVE: Interpolação espacial. krigagem. *Pinus taeda*.

Rorai Pereira Martins-Neto

rorai.martins@unesp.br
orcid.org/0000-0001-5318-2627
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Edmur Azevedo Pugliesi

edmur.pugliesi@unesp.br
orcid.org/0000-0003-3426-6619
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Edison Rogério Perrando

edison.perrando@ufsm.br
orcid.org/0000-0002-7602-3159
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil.

Sérgio Luiz Bostelmann

sl.bostelmann@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6831-5189
ADAMI S/A, Caçador, Santa Catarina, Brasil.

Bruno Conte

bruno.conte@adami.com.br
orcid.org/0000-0003-3324-5939
ADAMI S/A, Caçador, Santa Catarina, Brasil.

Vladimir Martarello

vladimir.martarello@adami.com.br
orcid.org/0000-0001-7757-3366
ADAMI S/A, Caçador, Santa Catarina, Brasil.

Rudinei de Marco

rudineidemarco@hotmail.com
orcid.org/0000-0003-2648-0279
Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

Mario Rodolfo Boff Burgin

marioboffburgin@hotmail.com
orcid.org/0000-0002-6471-4817
Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro), Irapati, Paraná, Brasil.

INTRODUÇÃO

O *Pinus taeda* L. é uma espécie de pinheiro originária do sudeste dos Estados Unidos e possui grande destaque entre as espécies florestais mais cultivadas no Brasil para florestamento, reflorestamento e demais atividades ligadas ao setor madeireiro, tais como serraria, laminação, celulose e resina. Em algumas regiões do Sul do Brasil, os plantios de *P. taeda* permanecem como um importante recurso financeiro garantido pela produção de papel e papelão para embalagens.

Os monitoramentos periódicos dos plantios florestais são importantes para o conhecimento da sua produtividade e, assim, a realização de práticas adequadas de manejo e intervenções silviculturais. Além das variáveis comumente analisadas nos inventários florestais, como diâmetro à altura do peito, altura e volume, as variáveis relacionadas aos solos também devem ser analisadas para verificar o quanto os atributos físicos e químicos podem alterar a produtividade e a qualidade da madeira produzida (RIGATTO et al., 2004; ROSA FILHO et al., 2011).

Os atributos do solo são espacialmente dependentes, o que quer dizer que a variância de determinada propriedade pode ser expressa como uma função da distância de separação dos pontos mensurados. Assim, quando há a alteração dessas propriedades de um local para outro com determinado grau de continuidade (dependência espacial), o uso de ferramentas geoestatísticas pode auxiliar na descrição espacial do atributo, permitindo tomadas de decisão mais acertadas sobre quais técnicas de manejo devem ser adotadas e onde, com o intuito de melhorar o sítio e a produtividade da espécie em questão (BOGNOLA et al., 2008).

A geoestatística é um ramo da estatística que utiliza o conceito de variáveis regionalizadas na avaliação da variabilidade espacial, não se limitando apenas à obtenção do modelo de dependência espacial, mas também estimando valores dos pontos em locais não amostrados por meio de uma função de correlação espacial entre os dados sem tendência e com variância mínima (VIEIRA; NOVAIS, 2000; BOGNOLA et al., 2008; GREGO et al., 2014). Um dos métodos mais utilizados para a interpolação na geoestatística é a krigagem, a qual consiste na ponderação dos vizinhos mais próximos do ponto a ser estimado sem tendenciosidade. Com isso, é possível organizar os dados disponíveis espacialmente de acordo com a semelhança entre vizinhos georreferenciados (GREGO et al., 2014).

A representatividade da variabilidade espacial pode ser obtida com a aplicação do mapeamento isarítmico, no qual a realidade é representada por quantidades com uma dada continuidade espacial. Neste tipo de mapeamento, cada valor expressa a intensidade do atributo, medido em pontos com localização conhecida (georreferenciados X, Y) em função de uma variável (Z). Esses pontos, com valor Z, serão vistos como uma superfície tridimensional contínua, representada por isolinhas e utilizando métodos de interpolação (CASTRO et al., 2004).

Dado o exposto acima, o objetivo deste trabalho foi avaliar a espacialização dos atributos físicos e químicos do solo e sua influência no volume individual das árvores de *Pinus taeda*, por meio da análise geoestatística e sua predição espacial com o uso do mapeamento isarítmico.

MATERIAL E MÉTODOS

A coleta de dados foi realizada em um plantio de *Pinus taeda* pertencente à empresa Adami S/A, localizado no município de Água Doce, região Oeste de Santa Catarina (Figura 1). O clima da região é classificado como mesotérmico úmido, com verões frescos e invernos rigorosos, ocorrendo geadas e neve, principalmente nos campos. A precipitação média é de 1930 mm, distribuídos igualmente ao longo do ano (IBGE, 2013).

Figura 1 – Localização do município de Água Doce - SC



Fonte: Autoria própria (2023).

O talhão florestal analisado possui uma área de 1214,34 hectares, e as árvores foram plantadas em 2009, obedecendo a um espaçamento de 2,5 m x 2 m, totalizando 2000 árvores por hectare. A amostragem para coleta dos dados foi sistemática, seguindo o sistema de Inventário Florestal Contínuo (IFC) da empresa, e compreendeu 64 parcelas retangulares de 600 m² (20 m x 30 m) (Figura 2).

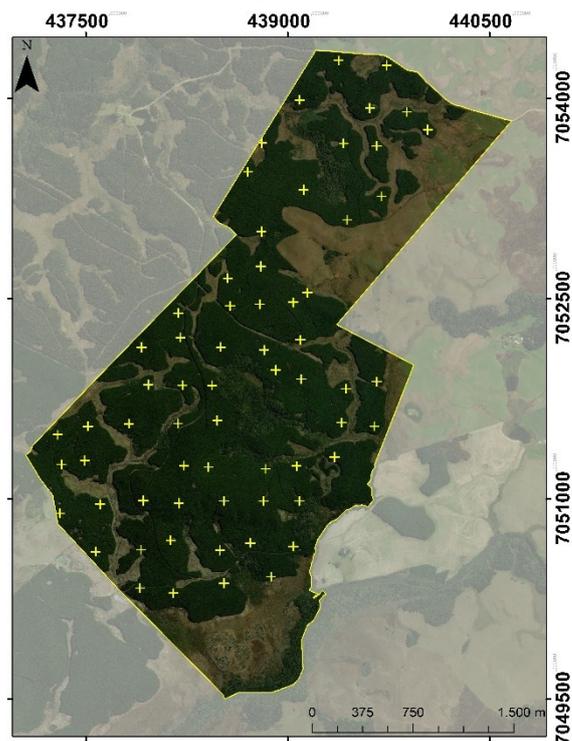
Foram coletadas as variáveis dendrométricas CAP (circunferência a altura do peito) de cada árvore com fita métrica, a altura total de 20% das árvores de cada parcela e a altura dominante das 6 árvores de maior DAP com um hipsômetro Vertex. Algumas árvores foram cubadas para o posterior ajuste de equações por meio de regressão linear, utilizando como variáveis de entrada DAP e altura total para obtenção do volume individual de cada árvore e, conseqüentemente, o volume médio das árvores por parcela. As amostras de solo foram coletadas com trado holandês até a profundidade de 25 cm e depois foram realizadas análises para obtenção dos atributos físicos (% de areia, % de silte e % de argila); e atributos químicos (pH; % de Matéria Orgânica - MO; Fósforo - P e Potássio - K em mg.dm⁻³; Alumínio - Al e Cálcio - Ca em cmolc.dm⁻³).

Foram coletadas as variáveis dendrométricas, como a Circunferência a Altura do Peito (CAP) de cada árvore com fita métrica, a altura total de 20% das árvores de cada parcela e a altura dominante das 6 árvores de maior Diâmetro à Altura do Peito (DAP) com um hipsômetro Vertex. Algumas árvores foram cubadas para o posterior ajuste de equações por meio de regressão linear, utilizando DAP e

altura total como variáveis de entrada, para obtenção do volume individual de cada árvore e, conseqüentemente, o volume médio das árvores por parcela. As amostras de solo foram coletadas com trado holandês até a profundidade de 25 cm, e em seguida, foram realizadas análises para obtenção dos atributos físicos (% de areia, % de silte e % de argila); e atributos químicos (pH; % de Matéria Orgânica - MO; Fósforo – P e Potássio – K em mg.dm³; Alumínio - Al e Cálcio – Ca em cmolc.dm⁻³).

Antes da análise geoestatística, foi realizado o teste de correlação de Pearson para medir a associabilidade dos atributos físicos e químicos do solo com a variável volume. Posteriormente, realizou-se a estatística descritiva (média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria) das variáveis que tiveram grau de correlação acima de 0,20 e abaixo de -0,20, sendo testada a normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov com 1% de probabilidade de erro. Essas análises foram realizadas por meio de programação no R (R CORE TEAM, 2014), utilizando o pacote R Pubs.

Figura 2 – Localização das 64 parcelas em que foram coletadas as variáveis dendrométricas das árvores e amostras de solo



Fonte: Autoria própria (2023).

A análise geoestatística teve como objetivo compreender a variabilidade espacial através do ajuste do semivariograma e da interpolação dos dados em pontos não amostrados. O semivariograma é uma função matemática que representa o nível de dependência entre duas variáveis (VIEIRA; NOVAIS, 2000). Foram ajustados no software GS+ (*Geostatistics for the Environmental Sciences*) quatro modelos teóricos de semivariograma: esférico (Equação 1), exponencial (Equação 2), gaussiano (Equação 3) e linear (Equação 4).

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (1)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right] \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[h \left(\frac{C}{a} \right) \right] \quad (4)$$

Os parâmetros das equações citadas são: semivariância ($\gamma(h)$); efeito pepita (C_0 – valor que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras); patamar ($C = C_0 + C_1$ – valor do semivariograma que corresponde ao seu alcance); alcance (a – distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente) e contribuição (C_1 – representa a diferença entre o patamar e o efeito pepita) e distância (h) (HOFFER et al., 2015).

Dos modelos ajustados, foi escolhido aquele com menor valor de Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e maiores valores de Coeficiente de Determinação (R) para as variáveis utilizadas no estudo. Foi também calculado o grau de dependência espacial (GDE) (Equação 5), em que valores $\leq 25\%$ indicam grau de dependência espacial fraco; de $25\% - 75\%$ um grau de dependência moderado; e $> 75\%$ indicam grau de dependência espacial forte entre as amostras (Equação 5) (ROSA FILHO et al., 2011).

$$GD = \left[\left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) \right] * 100 \quad (5)$$

Após o ajuste dos semivariogramas, os dados que apresentavam dependência espacial foram interpolados sem tendência e com variância mínima por meio da Krigagem Ordinária. Dessa forma, foi ajustado o semivariograma experimental (um modelo teórico), que foi utilizado na estimativa dos valores de atributos químicos e físicos do solo, bem como do volume médio para a produção de mapas (LOIOLA, 2016). O mapeamento utilizado foi do tipo isaritmico, ideal para a representação de fenômenos contínuos, a partir de medidas obtidas em descontinuidade (MARTINELLI, 2003). A Krigagem ordinária foi realizada na extensão GeoStatistical Analyst do ArcGIS 10.4.

RESULTADOS

A Tabela 1 mostra a matriz de correlação entre as variáveis analisadas neste estudo. Para a variável de interesse (volume médio por árvore), as variáveis matéria orgânica, alumínio, cálcio e porcentagem de argila possuem correlação acima de 0,20. Já a porcentagem de areia apresenta uma correlação negativa (inversa), indicando que quanto maior a quantidade de areia no solo, menor é o volume médio de cada árvore.

Com as variáveis que apresentaram correlação maior que 0,20 e menor que -0,20, foi realizada a estatística descritiva e aplicado o teste de normalidade de

Kolmogorov-Smirnov (Tabela 2). Entre os atributos estudados, as variáveis matéria orgânica e areia apresentaram os maiores coeficientes de variação em porcentagem (acima de 20%). Os atributos cálcio, argila e areia não mostraram uma distribuição normal e, em decorrência disso, os valores foram submetidos à transformação logarítmica.

O ajuste dos semivariogramas para os atributos físicos e químicos do solo, bem como para o volume médio individual das árvores, pode ser observado na Figura 3. Os parâmetros semivariográficos, assim como o melhor modelo ajustado para cada variável, são apresentados na Tabela 3. Importante para a interpretação dos semivariogramas, o alcance sinaliza a distância limite onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si. Neste estudo, o menor valor de alcance foi observado para o volume (167,77 m), enquanto o maior foi para a areia (3571,94 m).

Tabela 1 – Matriz de correlação dos atributos obtidos

| Atributo | pH | M.O | P | K | Al | Ca | Argila | Areia | Silte | Vol |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------|
| pH | 1,00 | | | | | | | | | |
| MO | -0,18 | 1,00 | | | | | | | | |
| P | 0,02 | 0,07 | 1,00 | | | | | | | |
| K | 0,18 | -0,10 | 0,28 | 1,00 | | | | | | |
| Al | -0,05 | 0,60 | 0,14 | -0,07 | 1,00 | | | | | |
| Ca | -0,04 | -0,01 | 0,06 | 0,49 | 0,02 | 1,00 | | | | |
| Argila | 0,07 | 0,48 | -0,03 | 0,17 | 0,26 | 0,28 | 1,00 | | | |
| Areia | 0,15 | -0,82 | 0,02 | 0,25 | -0,45 | 0,00 | -0,56 | 1,00 | | |
| Silte | -0,22 | 0,17 | 0,02 | -0,42 | 0,09 | -0,33 | -0,68 | -0,22 | 1,00 | |
| Vol. | 0,07 | 0,33 | 0,13 | 0,17 | 0,21 | 0,25 | 0,46 | -0,40 | -0,19 | 1,00 |

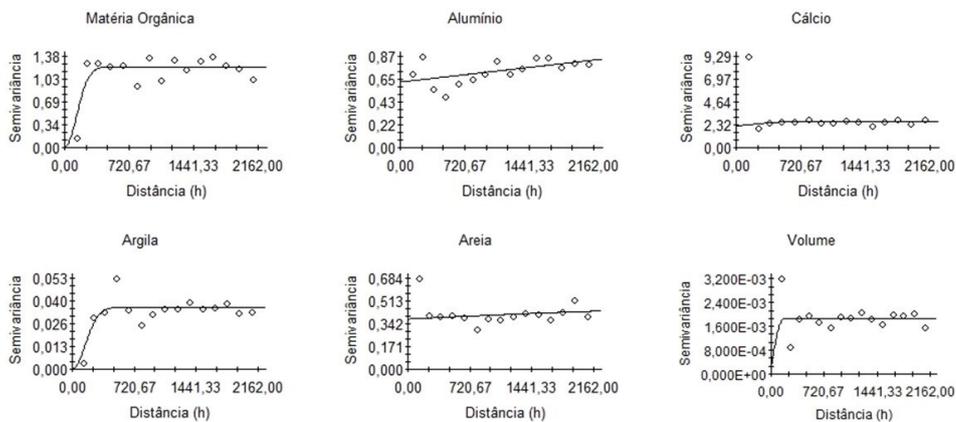
Valores destacados indicam as correlações com o volume maior que 0,20 e menor que -0,20. M.O – Matéria Orgânica; P - Fósforo; K - Potássio; Al – Alumínio; Ca – Cálcio; Vol. – Volume. Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 2 – Estatística descritiva e teste de normalidade para os atributos obtidos

| Atributo | Média | Mín. | Máx. | DP | CV | K-S |
|---|-------|-------|-------|------|-------|----------|
| MO (%) | 5,06 | 2,45 | 7,14 | 1,10 | 21,68 | 0,0733 |
| Al (cmolc dm ⁻³) | 6,18 | 4,25 | 8,12 | 0,86 | 13,97 | 0,0465 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 0,14 | 0,01 | 0,89 | 0,20 | 13,86 | 0,2512** |
| Argila (%) | 44,92 | 28,23 | 81,71 | 8,74 | 19,45 | 0,1150** |
| Areia (%) | 9,44 | 2,92 | 29,80 | 6,56 | 69,46 | 0,2200** |
| Volume (m ³ árvore ⁻¹) | 0,33 | 0,26 | 0,40 | 0,03 | 9,35 | 0,0496 |

DP: desvio – padrão; CV: coeficiente de variação em %; K-S: estatística de Kolmogorov-Smirnov. Valores seguidos de ** indicam significância a 1% de probabilidade, ou seja, com uma distribuição não normal, necessitando de transformação. Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3 – Semivariogramas ajustados para as variáveis utilizadas neste estudo



Fonte: Autoria própria (2023).

Por meio da Krigagem Ordinária, foi possível produzir mapas para visualizar a distribuição espacial das variáveis analisadas. A partir dos pontos de coleta, os valores foram interpolados para toda a área, gerando superfícies contínuas que contêm informações sobre o atributo analisado (Figura 4). Os intervalos foram representados de maneira geométrica com 10 classes, e estas foram identificadas por uma escala de cores, de tal forma que os menores valores de determinada variável foram associados a cores frias (tons azuis), e os maiores valores foram associados a cores quentes (tons de vermelho).

Tabela 3 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados e o grau de dependência espacial

| Atributo | C ₀ | C ₀ +C ₁ | Alcance (m) | GDE | Modelo |
|---------------|----------------|--------------------------------|-------------|-------|-----------------|
| M.O | 0,00100 | 1,22300 | 327,36 | 99,92 | Forte Gaussiano |
| Al | 0,62562 | 0,82892 | 2094,31 | 24,53 | Fraco Linear |
| Ca | 2,21129 | 2,68867 | 749,71 | 17,76 | Fraco Esférico |
| Argila | 0,00010 | 0,03610 | 374,12 | 99,72 | Forte Gaussiano |
| Areia | 0,37914 | 0,45245 | 3571,94 | 16,20 | Fraco Esférico |
| Volume | 0,00028 | 0,00185 | 167,77 | 84,77 | Forte Esférico |

Fonte: Autoria própria (2023).

DISCUSSÕES

Os solos mais arenosos apresentam algumas limitações, como deficiência em fertilidade, elevada susceptibilidade à erosão e deficiência hídrica (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995), o que afeta o crescimento e a produtividade das árvores (DONAGEMMA et al., 2016). Devido a isso, conforme a Tabela 1, é possível verificar a correlação negativa entre o teor de areia e o volume médio.

Segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002), os valores de CV encontrados para matéria orgânica e areia são considerados altos. Os mesmos autores classificam como médios quando o CV assume valores entre 10 e 20%, como foi o caso do alumínio, cálcio e argila, enquanto a variável volume apresentou baixo CV (<10%), conforme apresentado na Tabela 2. A alta variabilidade verificada para

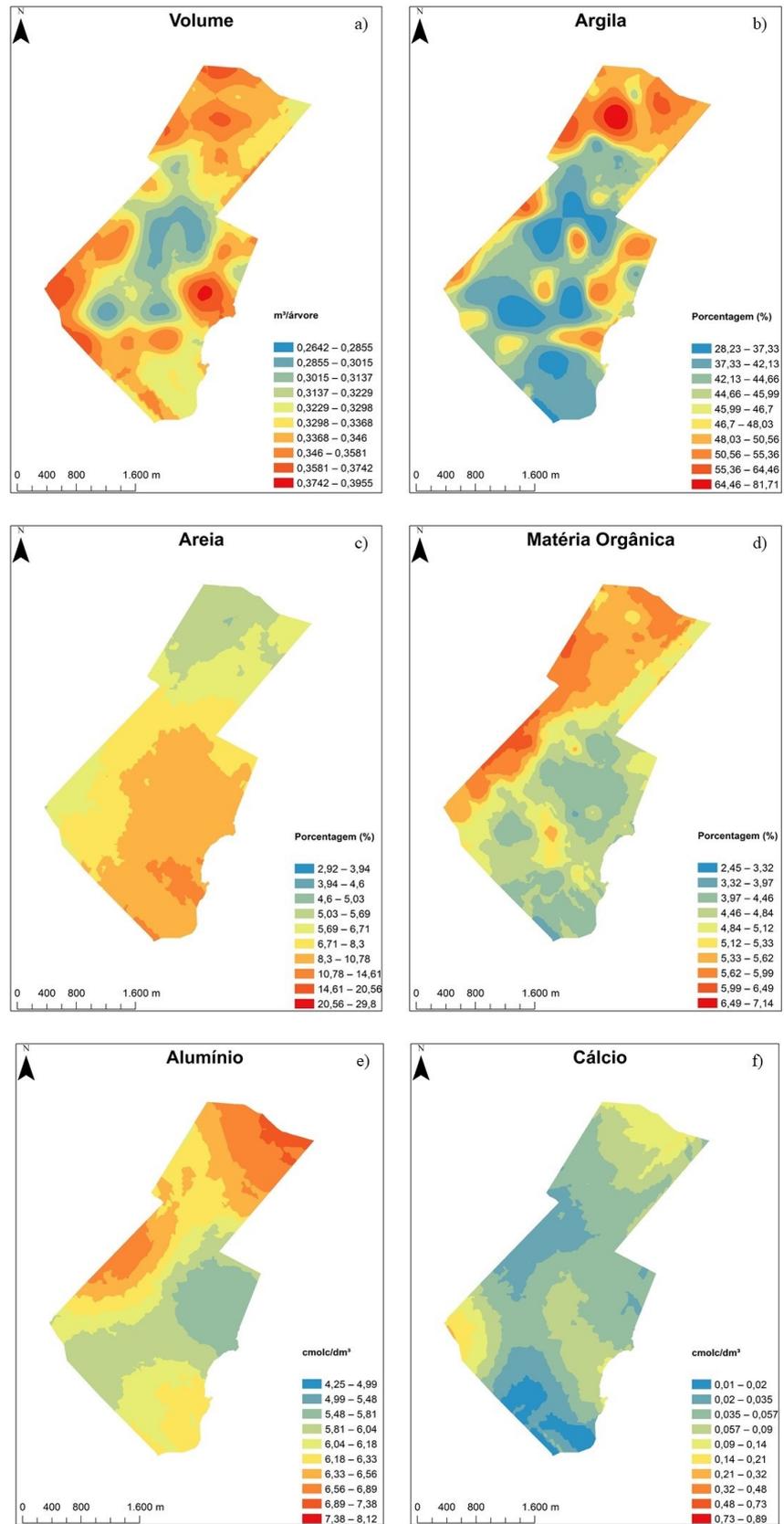
matéria orgânica e areia pode estar atrelada à alta umidade do solo no momento da coleta dos dados, decorrente de frequentes chuvas.

O modelo esférico foi o que melhor se ajustou aos semivariogramas para cálcio, areia e volume, enquanto o gaussiano foi mais eficiente para o ajuste da matéria orgânica e argila, e o linear para o alumínio (Tabela 3). Alguns estudos apontam o modelo esférico como sendo o de maior frequência para o ajuste de semivariogramas relacionados à variabilidade espacial de atributos do solo (ALVES et al., 2014; AQUINO et al., 2014; MATIAS et al., 2015; CHERUBIN et al., 2015), parcialmente corroborando com os semivariogramas ajustados no presente estudo.

Intrínseco ao fato de que a geoestatística se fundamenta como a base para estudos aplicados à silvicultura de precisão, Bottega et al. (2013) mencionam que, apesar de representar o potencial produtivo de uma determinada área, a produtividade não é homogênea, sendo observadas em uma mesma área de produção regiões com maior e menor desempenho produtivo. O estudo dessa variabilidade espacial dos atributos físicos (ALVES et al., 2014) e químicos do solo (MATIAS et al., 2015), utilizando a geoestatística, permite identificar uma detalhada distribuição espacial de tais atributos e, portanto, constitui uma importante ferramenta na análise da influência de algumas variáveis sobre a produtividade da cultura em questão.

Todas as variáveis selecionadas no estudo apresentaram dependência espacial (Tabela 3), ou seja, nenhuma delas com efeito pepita puro, o que possibilita a estimativa dos valores nos locais não amostrados por meio do interpolador geoestatístico da krigagem (CHERUBIN et al., 2015). Das variáveis analisadas, a matéria orgânica, argila e volume apresentam um grau de dependência espacial forte, indicando que a variabilidade se mantém quase constante com a distância dos pontos ajustados. De acordo com Kravchenko et al. (2006), maiores graus de dependência espacial indicam uma melhor estrutura espacial e que uma maior precisão pode ser obtida no mapeamento desta variável utilizando técnicas geoestatísticas; ou seja, o semivariograma ajustado explica quase toda a variância dos dados experimentais. A variável alumínio possui um grau de dependência espacial próximo do moderado. Deste modo, a variância aumenta com a distância entre os pontos amostrados (LOIOLA, 2016), e o semivariograma explica parte dessa variância dos dados experimentais. A dependência espacial moderada dos solos está atrelada ao manejo exercido, como, por exemplo, o preparo e a adubação (CASTRIGNANO et al., 2000). Os teores de cálcio e areia possuem fraca dependência espacial, assim, sua variância é dada por outros fatores que não são explicados pelo semivariograma.

Figura 4 – Volume das árvores e dos atributos físicos e químicos do solo



Fonte: Autoria própria (2023).

Por meio da espacialização da variável volume (Figura 4a), foi possível verificar que os menores valores estão, em sua grande parte, localizados no centro da área, aumentando radialmente para todas as direções. Com base nos resultados obtidos por Rigatto et al. (2005), a produtividade das florestas tende a ser maior em solos mais argilosos, e isso torna-se perceptível quando confrontamos os atributos argila (Figura 4b) e volume médio das árvores, em que áreas com maiores teores de argila estão associadas aos maiores volumes. O oposto é válido para os solos arenosos, em que, no geral, quanto maior o teor de areia (Figura 4c) no solo, menor o crescimento de *Pinus taeda*, pois solos dessa classe textural favorecem a alta lixiviação e a baixa capacidade de retenção de água (SANTOS FILHO; ROCHA, 1987). Diante disso, é possível compreender que a maior parte das áreas com menor valor de volume está associada a maiores teores de areia no solo.

A matéria orgânica reduz a densidade do solo, aumentando os poros e facilitando a penetração da água e das raízes, melhorando o desenvolvimento das plantas (RIGATTO et al., 2004; RIGATTO et al., 2005). Com isso, é possível verificar que há uma grande correlação (Tabela 2) entre maiores teores de matéria orgânica (Figura 4d) e o maior volume das árvores (Figura 4a). O alumínio (Figura 4e), em pequenas quantidades, pode ser benéfico para o desenvolvimento das plantas; no entanto, altas quantidades deste mineral podem ser tóxicas, além de tornarem os solos extremamente ácidos. A espécie *Pinus taeda* é adaptada a solos ácidos, que constituem a maior parte dos solos nos planaltos do sul do País (KRONKA et al., 2005). Assim, os teores de alumínio encontrados neste estudo não afetaram significativamente a produção volumétrica das árvores.

Como os solos da área estudada são ácidos (pH variando de 3,66 a 4,67), é esperado um baixo teor de cálcio (Figura 4f), os quais elevam o pH e são uma boa fonte de nutrientes, podendo limitar o crescimento das árvores. No entanto, devido à baixa exigência nutricional e tolerância da espécie, que cresce com frequência em solos extremamente pobres (REISSMANN; WISNIEWSKY, 2000), os baixos teores de cálcio não afetaram de forma significativa a variável volume. Entretanto, ao representar cartograficamente os valores interpolados para esse atributo, é possível notar que as áreas com maior conteúdo de cálcio estão associadas a maiores volumes (m^3 árvore⁻¹). Segundo Gonçalves e Mello (2000), quando a disponibilidade de água e nutrientes no solo é baixa, as árvores alocam uma maior quantidade de fotoassimilados nas raízes, reduzindo a relação entre a parte aérea e o sistema radicular e, por sua vez, a produtividade de madeira em detrimento ao maior dispêndio de energia direcionado à formação de raízes. Nesse sentido, é possível prever que se os níveis de cálcio na área estudada fossem mais elevados, possivelmente através de uma correção do pH do solo antes da implantação dos povoamentos florestais, o incremento em volume de madeira por árvore poderia ser maximizado durante a rotação florestal.

CONCLUSÕES

Por meio deste estudo, foi possível representar cartograficamente os atributos químicos e físicos do solo e verificar as relações com o volume das árvores. No plantio em questão, as variáveis edáficas que apresentaram correlação com o volume foram matéria orgânica, % de areia, % de argila, teor de

cálcio e de alumínio, e todas apresentaram dependência espacial. A espécie *Pinus taeda* é tolerante a solos de baixa fertilidade e sítios florestais pouco produtivos, porém foi possível verificar como o tipo de solo e os nutrientes do mesmo podem alterar o volume individual das árvores. Os resultados obtidos demonstram a importância de utilizar atributos do solo para prever a produtividade de florestas, bem como a importância da geoespacialização, fornecendo informações relevantes ao gestor florestal das áreas que merecem mais atenção no que tange à implementação de ações necessárias para melhoria da produção.

Spatial variability of volume and soil attributes in *Pinus taeda* plantation

ABSTRACT

This study aimed to demonstrate the spatial variability of the average volume of *Pinus taeda* trees and the physical and chemical attributes of the soil, as well as to determine how these variables affect tree productivity. Data collection was conducted in a *P. taeda* field covering 1214.34 ha, in the municipality of Agua Doce, in the western part of Santa Catarina State. Trees from 64 plots were measured, and soil samples were collected to obtain their physical and chemical attributes. A correlation analysis was performed between the variables and the average individual volume of the trees. Variables with a correlation above 0.20 and below -0.20 were selected for geostatistical analysis, including descriptive statistics, the semivariogram adjustment, the interpolation of non-sampled points using Ordinary Kriging, and the production of isarithmic maps. All variables used in this study exhibited spatial dependence, and it was observed that variations in the physical and chemical attributes of the soil influenced the average volume of the trees, albeit to varying degrees.

KEYWORDS: Geostatistics. Kriging. Productivity.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. M. F.; QUEIROZ, D. M.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 3, p. 22-30, 2014. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/14069>. Acesso em: 01 fev. 2023.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 2, p. 397-406, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200004>

BOGNOLA, I. A.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; SILVA, E. A. A.; LINGNAU, C.; HIGA, A. R. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de Pinus taeda L. *Floresta*, v. 38, n. 2, p. 373-385, 2008. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v38i2.11632>

BOTTEGA, E. L.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de soja no Cerrado brasileiro. *Agrarium*, v. 6, n. 20, p. 167-177, 2013. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/1503>. Acesso em: 01 fev. 2023.

CASTRIGNANÒ, A.; GIUGLIARINI, L.; RISALITI, R.; MARTINELLI, N. Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. *Geoderma*, v. 97, n. 2, p. 39-60, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00025-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00025-2)

CASTRO, F. V. F.; SOARES FILHO, B. S.; VOLL, E. Cartografia temática. Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/apostilacartografiatematicafredericovalle.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2023.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000200009>

DONAGEMMA, G. K et al. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. Embrapa Monitoramento por Satélite-Capítulo em livro científico (ALICE), 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1002010>. Acesso em: 01 fev. 2023.

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M; BENEDETTI, V. (Ed.) Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: ESALQ/ USP, 2000. p.219-267.

HOFFER, H.; DEBASTIANI, A. B.; MARTINS NETO, R.; MENEGATTI, R.; RAFAELI NETO, S. Variabilidade espacial do estado de compactação do solo em um sítio experimental de Mimosa scabrella Benth. Enciclopédia Biosfera, v. 11, p. 1903-1913, 2015. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/1918>. Acesso em: 01 fev. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. 2013. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 01 fev. 2023.

KRAVCHENKO, A. N.; ROBERTSON, G. P.; SNAP, S. S.; SMUCKER, J. M. Using information about spatial variability to improve estimates of total soil carbon. Agronomy Journal, v. 98, n. 3, p. 823-829, 2006. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2005.0305>

KRONKA, F. J. N et al. Monitoramento da vegetação natural e do reflorestamento no Estado de São Paulo. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 12, p. 16-21, 2005.

LOIOLA, T. M. Manejo da Paisagem em Fragmentos de Floresta de Araucária no Sul do Brasil com base no Incremento Diamétrico. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, CAV - UDESC. Lages, 2016. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/2845/DISSER_1_166507187513_65_2845.pdf Acesso em: 01 fev. 2023.

MARTINELLI, M. Cartografia Temática: Caderno de Mapas Vol. 47. EdUSP, 2003.

MATIAS, S. S. R.; BAPTISTTEL, A. C.; NÓBREGA, J. C. A.; ANDRADE, F. R.; SILVA, J. B. L. Variabilidade espacial dos atributos do solo em duas áreas de manejo convencional no Cerrado piauiense. Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, v. 58, n. 2, p. 217-227, 2015. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1687>

PIMENTEL-GOMES, F; GARCIA, C.H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientação para uso de aplicativos. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3.ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65p.

REISSMANN, C. B; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, p. 135-165, 2000.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de Pinus *taeda* para produção de celulose Kraft. Revista *Árvore*, v.28, p. 267-273, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000200013>

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de Pinus *taeda*. Revista *Árvore*, v.29, n.5, p. 701-709, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000500005>

ROSA FILHO, Gilberto et al. Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. *Bragantia*, v. 70, n. 2, p. 439-446, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000200027>

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2144573](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2144573). Acesso em: 01 fev. 2023.

SANTOS FILHO, A.; ROCHA, H. O da. Principais características dos solos que influem no crescimento de Pinus *taeda* L. no segundo planalto paranaense. Revista Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, v. 9, n. 1/2, p. 107-111, 1987.

VIEIRA, S. R.; NOVAIS, R. F de. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-53, 2000.

Recebido: 29 mar. 2023

Aprovado: 06 jun. 2024

DOI: 10.3895/rbgeo.v12n1.16555

Como citar: MARTINS-NETO, R. P.; PUGLIESI, E. A.; PERRANDO, E. R.; BOSTELMANN, S. L.; CONTE, B.; MARTARELLO, V.; MARCO, R.; BURGIM, M. R. B. Variabilidade espacial do volume e dos atributos do solo em plantio de *Pinus taeda*. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 053-068, jan./jun. 2024. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Edmur Azevedo Pugliesi

Rua Roberto Simonsen, 305, CEP: 19060-900, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

