Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Avaliação da variabilidade espacial em plantações de eucalipto

Rafael Donizetti Dias

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2021

Rafael Donizetti Dias
Engenheiro Agrícola

Avaliação da variabilidade espacial em plantações de eucalipto
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Dias, Rafael Donizetti

Avaliação da variabilidade espacial em culturas de plantações / Rafael Donizetti Dias. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2021.

87 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Agricultura de precisão 2. Colheita florestal 3. Mapa de produtividade
4. Silvicultura I. Título

AGRADECIMENTOS

Primeiramente Deus por todas as oportunidades que ele colocou em meu caminho e ao Beato Padre Donizetti Tavares de Lima o qual sou devoto.

Agradeço de maneira única aos meus pais, Donizeti e Inalva, a minha irmã Daiana e a minha Sobrinha Laura e ao meu cunhado Thiago, por me ensinarem a nunca desistir daquilo que se almeja. A essa família que sempre me apoiou e incentivou a ir em busca dos meus sonhos e que me mostrou que através do estudo tudo se torna possível. E por não medir esforços em me fazer chegar até onde cheguei. Aos esforços e dedicações dos meus pais que é um exemplo para mim de sinceridade, respeito e amor. Também deixo anotado meu carinho especial a minhas Tias e Tios, Claudia, Sandra e Rodrigo, e a minha avó Conceição e em especial a meu avô Sebastião (em memória) que compartilhou um pouco da paixão do campo comigo.

Agradeço a minha esposa Renata, por acreditarem em mim e me apoiar a buscar novos horizontes. Que mesmo com a distância de um intercâmbio sempre me incentivou e nunca mediu esforços para me fazer feliz.

Ao Professor Doutor José Paulo Molin por aceitar o desafio de me orientar mesmo em um trabalho aplicado em uma cultura pouco abordada pela temática da Agricultura de Precisão. Agradeço imensamente todo o conhecimento ensinado e à paciência ao longo do mestrado, sendo uma pessoa com um caráter inestimável e uma dedicação e amor ao que faz exemplar. Uma pessoa em qual me espelho

Agradeço à empresa Suzano S/A por incentivar e patrocinar a pesquisa, almejando sempre a inovação e não medindo esforços para transformar o setor. Especialmente agradeço aos meus amigos das áreas GPLAN, GEDOP, Colheita Florestal, Silvicultura por todo o planejamento e operacionalização do teste e ao Maurício Simões, Clayton Alcardes, Lindemberg Perpétuo e Richard Dalaqua pela tutoria na pesquisa.

De forma singular, agradeço à empresa Ponsse e aos seus colaboradores por disponibilizar o cabeçote de colheita e toda a tecnologia embarcada na máquina. Não medindo esforços para tornar a pesquisa possível. Especialmente ao Rafael Paes, Fernando Campos e ao Rodrigo Marangoni pela parceria.

Agradeço ao Professor Rubens Tabile por me indicar o caminho de cursar o mestrado na Esalq e incentivar desde o TCC a estudar a área florestal.

Agradeço aos meus amigos Marcelo Chan e Mailson Oliveira por me incentivarem a seguir em frente independente das dificuldades. Ao Marcelo pelo companheirismo em Piracicaba e ao Maison pelo companheirismo nos Estados Unidos. Ambos amigos para o resto da vida.

Agradeço a oportunidade de trabalhar com Jonas Ortiz, Timothy McDonald, Clayton Alcardes, Henrique Scolforo, Pengmin Pan e José Luís Stape, entre outras grandes referências da minha dissertação e do ramo Florestal. De uma maneira singular ao Jonas Ortiz, por ser um irmão e me ensinar na prática os macetes do SIG e me desafiar a ir além, ao Clayton Alcardes por sempre me apoiar a aplicar a agricultura de precisão no setor floresta, ao Timothy McDonald por me tutorar e me ensinar sobre a cultura florestal do Norte, além de me receber com o coração aberto em seu país e ao Henrique Scolforo por me ensinar sobre inventário florestal e seus desafios.

De maneira carinhosa, agradeço à Mariana Peccineli, Guilherme Martins, Evelyn, Franklin, Raul e Rodolfo e Leonardo por todos os momentos de amizade sincera que levamos desde a época de graduação em Pirassununga.

Aos meus amigos de laboratório, Leonardo Maldaner, Helizane Bazame, Lucas Corredo, Maurício Martelo, Orlando Daniel e Tatiana Canata agradeço aos momentos de partilha de conhecimento e aprendizado.

Aos meus amigos da minha cidade natal Tambaú, João Leonardo, José Biscaino, Demétrios e Thales pelo companheirismo de uma vida inteira. Uma amizade verdadeira de quase duas décadas.

Ao Laboratório de Agricultura de Precisão, USP-ESALQ/Piracicaba, pelo incentivo e apoio em desenvolver o meu trabalho, auxiliando nos testes de maneira dedicada. Fica meu abraço a todos os técnicos e funcionários.

A todos que os familiares, amigos e alguns que acabei não citando por me ensinarem o quão importante é ter pessoas que te ajudam independente do momento.

EPÍGRAFE

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Silvicultura	15
2.2. Agricultura de precisão no setor florestal	16
2.3. Mapeamento da produtividade	17
2.4. Possíveis causas da variabilidade da produção florestal	19
2.5. Inventário Florestal	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Caracterização das áreas experimentais	23
3.2. Colheita e mapeamento de produtividade	24
3.3. Avaliação do desempenho do sistema sensor	27
3.4. Inventário Florestal	28
3.5. Amostragem de solo	29
3.6. Análise dos dados	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Mapeamento de produtividade	31
4.2. Análise dos dados de inventário florestal	54
4.3. Variabilidades dos teores dos atributos químicos e físicos do solo	60
5. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICES	75

RESUMO

Avaliação da variabilidade espacial em plantações de eucalipto

A Agricultura de Precisão (AP) no setor florestal vem sendo impulsionada pelo avanço na mecanização, automação e desenvolvimento de tecnologias de coleta e processamento de dados. Uma das abordagens é a identificação da presença de variabilidade espacial nas áreas a partir de dados da cultura, georreferenciados e em alta resolução e então relaciona-los com os fatores de produção, especialmente do solo. Como em outras culturas, a produtividade espacializada é um dado importante no diagnóstico de causa e efeito. Porém, sistemas capazes de mapear as árvores colhidas por colhedoras florestais, possibilitando a geração do mapa de produtividade de madeira, ainda é uma demanda. Este trabalho tem como objetivo descrever a obtenção de dados georreferenciados a partir de uma colhedora florestal e gerar o mapa de produtividade para avaliar a variabilidade espacial de plantações de eucalipto. O estudo foi realizado em três áreas de produção localizadas no estado de SP-Brasil e possuem em média 15 hectares cada. Foi utilizado um cabeçote processado de árvores Ponsse modelo H77euca montado sobre uma escavadora Komatsu modelo PC200. A máquina foi equipada com um sistema de controle Ponsse Opti4G 4.715, responsável por coletar os dados de volume de madeira de cada árvore, georreferenciados por um receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) código C/A (corse acquisition) portadora L1, sem correção diferencial. Na colheita da primeira área experimental, o receptor GNSS foi alocado acima da cabine da máquina, já na segunda e terceira área o receptor foi instalado a 0,25 m do centro do cabeçote descascador a fim de melhorar a acurácia do georreferenciamento. Os dados de produtividade foram extraídos da máquina no formato Standard for Forest machine Data and Communication (StanForD) e foram decodificados para um formato compatível com um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Numa mesma grade amostral também foram coletados dados de inventário florestal e de atributos físicos e químicos do solo, por amostragem. Todos os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, análise geoestatística e especificamente para os dados de produtividade de madeira, foi definida a melhor resolução espacial para a confecção de mapas. Paralelamente foram cubadas 119 árvores a fim de avaliar a acurácia dos dados de produtividade. Por fim, todo o conjunto de dados serviu para a análise visando avaliar a existência de possíveis relações entre causas e o efeito da variabilidade espacial da produtividade de madeira. A partir dos mapas de produtividade gerados com resolução de 3m e exclusão de dados extremos com base nos valores observados de cubagem de árvore e inventário florestal, pode-se identificar áreas de transição de produtividade. Também foi observado que a acurácia média dos dados de produtividade da colhedora variou entre 11,4% a 13,5% para diâmetro médio, 3,0% a 4,1% para comprimento e de 20,6% a 22,7% para volume por tora. A variabilidade produtiva da área 2, com o maior conjunto de dados, apresentou coeficiente de variação de produtividade (m^3ha^{-1}) de 31,1%. Está correlacionada aos atributos volume por árvore, diâmetro na altura do peito e diâmetro médio do inventário florestal e alguns atributos físico-químicos do solo, com correlação superior a 0,5 para Ca, argila, areia total, altimetria e soma de bases.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, Colheita florestal, Mapa de produtividade, Silvicultura

ABSTRACT

Assessment of the spatial variability in eucalypt plantations

Precision Agriculture (AP) in the forestry sector has been driven by advances in mechanization, automation and development of data collection and processing technologies. One approach is to identify the presence of spatial variability in the areas from crop data, georeferenced and in high resolution and then relate them to the factors of production, especially the soil. As in other cultures, spatialized productivity is an important data in the diagnosis of cause and effect. However, systems capable of mapping the trees harvested by forest harvesters, enabling the generation of the wood productivity map, is still a demand. This work aims to describe the obtaining of georeferenced data from a forest harvester and generate the productivity map to assess the spatial variability of eucalyptus plantations. The study was carried out in three production areas located in the state of SP-Brasil and have an average of 15 hectares each. A processed Ponsse tree head model H77euca mounted on a Komatsu excavator model PC200 was used. The machine was equipped with a Ponsse Opti4G 4.715 control system, responsible for collecting the wood volume data from each tree, geo-referenced by a GNSS receiver (Global Navigation Satellite System) code C / A (coarse acquisition) carrier L1, without correction differential. In the harvest of the first experimental area, the GNSS receiver was placed above the machine cabin, in the second and third area the receiver was installed at 0.25 m from the center of the peeler head. This modification improved the resolution and accuracy of the georeferencing of each tree. The productivity data were extracted from the machine in the Standard for Forest machine Data and Communication (StanForD) format and were decoded into a format compatible with a Geographic Information System (GIS). In the same sample grid, forest inventory data and physical and chemical attributes of the soil were also collected, by sampling. All data were submitted to descriptive statistical analysis, geostatistical analysis and specifically for wood productivity data, the best spatial resolution was defined for making maps. In parallel, 119 trees were cubed in order to assess the accuracy of the productivity data. Finally, the entire data set was used for the analysis in order to assess the existence of possible relationships between causes and the effect of the spatial variability of wood productivity. From the productivity maps generated with 3 m resolution and exclusion of extreme data based on the observed values of tree cubing and forest inventory, it is possible to identify areas of productivity transition. It was also observed that the average accuracy of the harvester productivity data varied between 11.4% to 13.5% for medium diameter, 3.0% to 4.1% for length and from 20.6% to 22.7 % for volume per log. The productive variability in field 2, with the largest data set, showed a coefficient of variation of productivity (m^3ha^{-1}) of 31,1%. It is correlated to the attributes volume per tree, diameter at chest height and average diameter of the forest inventory and some physicochemical attributes of the soil, with a correlation greater than 0.5 for Ca, clay, total sand, altimetry and sum of bases..

Keywords: Precision agriculture, Forest harvester, Forest harvesting map, Forestry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização e formato das áreas experimentais estudadas com floresta de <i>Eucalyptus grandis</i>	23
Figura 2. Local de instalação da antena GNSS na máquina: alocado na cabine a aproximadamente 12 m do cabeçote (a); alocado a aproximadamente 0,25 m do centro do cabeçote (b)	24
Figura 3. Calibração da colhedora florestal a partir do equipamento Caliper (Ponsse): a colhedora coleta dados durante a colheita (a); o Caliper é conectado ao monitor de colheita e recebe os dados de volume das últimas 10 árvores colhidas (b); são coletados o diâmetro e comprimento das toras e ao final o Caliper é conectado ao monitor novamente para enviar os dados reais e se autocalibrar (c).	25
Figura 4. Exemplo de formato de arquivo com dados brutos no padrão StanForD.	25
Figura 5. Etapas do processo de conversão de dados brutos para dados tabulares que são legíveis em SIG.	26
Figura 6. Representação do método de cubagem utilizado em que foram coletados diâmetros a cada 1,0 m a partir do início da tora, além dos diâmetros inicial e final.	28
Figura 7. Representação da coleta de amostras de solos.	29
Figura 8. Mapa da localização dos pontos amostrais de solos e de inventário florestal.	29
Figura 9. Mapa de colheita da área experimental 1 com uma distância média entre as linhas de dados de 12 m devido à alocação do GNSS na cabine da colhedora e pontos em alta resolução equidistantes.	31
Figura 10. Mapa de colheita da área 2 onde o receptor GNSS foi alocado a 25 cm do cabeçote.	32
Figura 11. Exemplos de áreas circulares geradas a partir do ponto onde foram realizadas as coletas de dados de inventário (a); áreas circulares de pontos do mapeamento de produtividade que cada parcela abrangeu.	36
Figura 12. Mapas de pontos de atributos de colheita da Área Experimental 1.	40
Figura 13. Mapas de pontos de atributos de colheita da Área Experimental 2.	40
Figura 14. Mapas de pontos de atributos de colheita da Área Experimental 3.	41
Figura 15. Mapa de atributos de colheita interpolados, referentes às áreas experimentais 1,2 e 3 com tamanhos de pixel de 3, 5, 10 e 15 m.	43
Figura 16. Mapa de produtividade da Área Experimental 1 gerados com pixel de 3 e 5 m.	44
Figura 17. Mapa de produtividade da Área Experimental 2 gerados com pixel de 3 e 5 m.	45
Figura 18. Mapa de produtividade da Área Experimental 3 gerados com pixel de 3 e 5 m.	46
Figura 19. Histograma dos dados de produtividade originais (A) e dos dados remanescentes da exclusão de dados discrepantes da área 2 (B).....	48
Figura 20. Histograma dos dados de produtividade originais (A) e dos dados remanescentes da exclusão de dados discrepantes da área 3 (B).....	49
Figura 21. Mapa dos atributos de produtividade da área 2 gerados a partir de dados filtrados.	52
Figura 22. Mapa dos atributos de produtividade da área 3 gerados a partir de dados filtrados.	53
Figura 23. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 2.	57
Figura 24. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 3.	58
Figura 25. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 2.	59
Figura 26. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 3.	60
Figura 27. Mapa dos atributos de solo da Área Experimental 2.	64
Figura 28. Mapa dos atributos de solo da Área Experimental 3.	65
Figura 29. Mapa de produtividade e mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 2 que apresentaram alta correlação linear.	67

Figura 30. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 3. H Dominante- Altura Dominante; H Estimada – Altura Estimada	67
Figura 31. Semivariogramas dos atributos de produtividade a partir de dados puros de colheita da Área Experimental 1.....	75
Figura 32. Semivariogramas dos atributos de produtividade a partir de dados puros de colheita da Área Experimental 2.....	75
Figura 33. Semivareograma dos atributos de produtividade a partir de dados puros de colheita da Área Experimental 3.....	76
Figura 34. Semivareograma dos atributos de produtividade a partir de dados filtrados de colheita da Área Experimental 2.....	76
Figura 35. Semivareograma dos atributos de produtividade a partir de dados filtrados de colheita da Área Experimental 3.....	77
Figura 36. Semivareograma dos atributos de inventário florestal da Área Experimental 2.	78
Figura 37. Semivareograma dos atributos de inventário florestal da Área Experimental 3.	79
Figura 38. Semivareograma dos atributos de análise de solo da Área Experimental 2.....	80
Figura 39. Semivareograma dos atributos de análise de solo da Área Experimental 3.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores limites das variáveis de produtividade aplicados na exclusão de valores discrepantes.	27
Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de cubagem por tora referente aos dados obtidos nas áreas 2 e 3.	34
Tabela 3. Estatística descritiva dos dados de cubagem por árvore.	35
Tabela 4. Estatística descritiva dos dados de cubagem por árvore para as diferentes áreas amostrais, referentes os os raios de 11,28 m, 16,92 m e 22,56 m.	37
Tabela 5. Estatística descritiva dos dados de produtividade por tora, referente às três áreas experimentais.	38
N- número de amostras; VC- coeficiente de variação, DM- diâmetro médio; VI- volume por árvore.	38
Tabela 6. Estatística descritiva dos dados de produtividade por árvore, referente às três áreas experimentais.	39
Tabela 7. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de dados de mapeamento de produtividade da área 1, 2 e 3.	42
Tabela 8. Estatística descritiva dos dados de produtividade gerados pela colhedora florestal.	50
Tabela 9. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de dados de mapeamento de produtividade das áreas 2 e 3.	51
Tabela 10. Estatística descritiva dos dados de inventário florestal referente às áreas 2 e 3.	55
Tabela 11. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de dados de inventário florestal das áreas 2 e 3.	56
Tabela 12. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R ²) entre os dados de inventário e produtividade da área experimental 2.	58
Tabela 13. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R ²) entre os dados de inventário e produtividade da área experimental 3.	59
Tabela 14. Estatística descritiva dos dados advindos das análises laboratoriais das amostras de solo.	61
Tabela 15. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de P, K, pH, M.O., SB, CTC, V, Mg, Ca, argila, areia total e silte da área 2 e 3.	63
Tabela 16. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R ²) entre os dados solo e produtividade da área experimental 2.	66
Tabela 17. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R ²) entre os dados solo e produtividade da área experimental 3.	66
Tabela 18. Matriz de correlação linear entre os atributos de produtividade, inventário e solo da área experimental 2.	82
Tabela 19. Matriz de correlação linear entre os atributos de produtividade, inventário e solo da Área Experimental 3.	84
Tabela 20. Resultado das análises de regressão simples entre a produtividade gerada pela colhedora florestal com os dados de inventário florestal e análise de solo da Área Experimental 2.	86
Tabela 21. Resultado das análises de regressão simples entre a produtividade gerada pela colhedora florestal com os dados de inventário florestal e análise de solo da Área Experimental 3.	87

1. INTRODUÇÃO

A silvicultura tem como objetivo extrair produtos de florestas, sendo que sua gestão requer a interface de diferentes áreas de conhecimento. O Brasil possui aproximadamente 14,5% da superfície florestal mundial (FAO,2020). Dentro desse valor, parte da madeira é advinda de florestas plantadas para fins industriais, sendo parte essencial da economia brasileira. No Brasil, a silvicultura de eucalipto se destaca das demais culturas florestais. O eucalipto é um gênero arbóreo nativo da Austrália, mas que possui adaptação e alta produtividade no território brasileiro, tornando o país em um dos líderes mundiais em produção de celulose. Nas florestas implantadas, dentre as ações estão o manejo e genética de mudas, transplântio, adubação, controle de pragas e doenças, corte e processamento da matéria-prima.

Florestas de pinus e eucalipto são as mais cultivadas no Brasil com destaque para o eucalipto. Os números de florestas plantadas tendem a aumentar motivados pela expansão de mercado de papel e celulose brasileiro, aumento da demanda de bens de consumo da sociedade moderna, necessidade de maior aproveitamento das áreas e o surgimento de novas tecnologias aplicadas à silvicultura, impulsionam o setor florestal para buscar maior eficiência na produção, atentando à sustentabilidade ambiental.

Dentre a busca pela melhoria da eficiência florestal, as áreas de mecanização e automação florestal e inventário florestal lideram como temas mais discutidos. A mecanização florestal apresenta maiores evoluções tecnológicas na etapa de colheita. O destaque está no sistema de abate e processamento das árvores, caracterizado por um cabeçote que realiza o corte, descascamento e fracionamento da árvore e que permite gerar dados de geolocalização e dendrometria de cada árvore. Por outro lado, atividades de manejo, como preparo de solo, plantio e aplicação de insumos, possuem baixa mecanização e automações, isso devido às características das áreas de cultivo, consideradas ótimas para máquinas convencionais utilizadas em outras culturas agrícolas. As áreas geralmente possuem altas quantidades de resíduos, galhos e tocos provindo da etapa de colheita anterior. Choques constantes em tocos, galhos e resíduos, geram dificuldade nas operações mecanizadas, sendo que em várias situações a intervenção manual é a única maneira de realizá-la.

O inventário florestal é considerado uma das atividades primordiais para o monitoramento e manutenção das florestas, gerando dados quantitativos e qualitativos por meio de coletas de parcelas nos talhões. É uma atividade que deve ser realizada em densidade razoavelmente alta ao longo das grandes extensões de plantio e, no entanto, ainda é conduzida com baixo nível de automação, com coleta de dados predominantemente manual.

A Agricultura de Precisão (AP) no setor florestal surge como uma área que possui um ideal inovador de modificar o enfoque dado à silvicultura, principalmente por abordar o detalhamento com dados georreferenciados e em alta resolução e não com a abordagem das áreas de produção de maneira uniforme. Essa abordagem diferenciada abre a possibilidade de definir unidades de manejo conforme as variabilidades espaciais e temporais, otimizando o uso racional dos recursos disponíveis, melhorando a rastreabilidade das atividades e melhor alocação dos materiais genéticos conforme os ambientes mais propícios.

Os recentes avanços na AP estão direcionados à coleta de dados georreferenciados de cada árvore colhida pela colhedora florestal, propiciando novas visões em como se realizar a gestão florestal e ao mesmo tempo obter o mapa de produtividade de madeira. Entretanto, nenhuma solução voltada ao uso efetivo do mapa de produtividade é encontrada em utilização no setor florestal, sendo este o principal produto para a identificação da variabilidade espacial das áreas de produção e consequentes desdobramentos na gestão diferenciada da floresta, considerando essas variabilidades.

Com a disponibilidade do mapeamento de produtividade é possível investigar a variabilidade presente nas áreas, relacionando-a com as variáveis físicas, hídricas e químicas do solo local, dentre outras. As possíveis relações podem revelar causadores que sejam espacialmente gerenciáveis, otimizando processos, diminuindo custos, aproveitando melhor os recursos naturais, promovendo o uso mais racional dos insumos para que se tenha melhor rendimento econômico e ambiental. Contudo, ainda são necessárias etapas cruciais que permitam desenvolver metodologias consistentes para a construção de mapas de produtividade e assim utilizá-los como dado inicial para análises de variabilidade e a literatura nessa área é escassa. Senso assim, o estudo teve como objetivo geral analisar a variabilidade espacial da cultura de eucalipto a partir do mapa de produtividade com dados obtidos da colhedora florestal e investigar possíveis causadores dessa variabilidade. Os objetivos específicos foram: 1. desenvolvimento de uma metodologia para a configuração e processamento de dados para a geração de mapas de produtividade a partir dos dados coletados pela colhedora florestal; 2. confrontar os dados obtidos pela colhedora, em alta resolução espacial, com aqueles de inventário florestal prévio; 3. investigar possíveis causadores da variabilidade espacial da produção de madeira a partir da coleta de atributos físicos e químicos do solo e do relevo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Silvicultura

A silvicultura é uma ciência dedicada ao estudo de métodos que promovem o plantio e regeneração de florestas, em função não apenas de interesses econômicos, mas também sociais, culturais e ecológicos (IBA, 2016). O Brasil é o maior fornecedor mundial de produtos florestais madeireiros e não-madeireiros e também é referência no fornecimento de serviços ambientais, graças às funções ecossistêmicas como sequestro e armazenamento de carbono, manutenção da água no sistema, regulação do clima local, provisão de matéria-prima, provisão de alimento e prevenção da erosão (VALVERDE *et al.*, 2012). No mundo, as florestas cobrem cerca de 31% da área terrestre (quatro bilhões de hectares), sendo 36% florestas primárias, 57% florestas naturalmente regeneradas e 7% florestas plantadas. De toda área florestal mundial, o Brasil possui a segunda maior área de florestas do mundo, ficando atrás apenas da Rússia (FAO, 2020).

A silvicultura é um setor economicamente importante para o Brasil, refletindo diretamente na economia brasileira, sendo que em 2019 a participação no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro foi de 1,6% do total da riqueza gerada no país, 6% do PIB industrial e gerou cerca de 3,75 milhões de empregos diretos e indiretos. A madeira produzida pelo setor é empregada basicamente no processamento mecânico para a constituição de móveis (painéis reconstituídos, compensados e laminados), madeira para energia (siderurgia a carvão vegetal) e madeira industrial (papel e celulose). O cultivo de florestas plantadas para o abastecimento é predominantemente composto de plantios de pinus e eucalipto, sendo o Eucalipto a espécie mais cultivada, representando 77% do total de área de florestas plantadas (6,97 milhões de hectares). Já o *Pinus* ocupa 18% de área (1,64 milhão de hectares) (IBÁ 2020).

O eucalipto é uma planta de origem australiana, presente tanto em regiões montanhosas quanto em regiões próximas ao mar (WILLIAMS & WOINARSKI, 1997). Chegou ao Brasil no início do XVIII e foi utilizado para plantações florestais devido seu rápido crescimento, alta produtividade e capacidade de adaptação. Por volta de 1950 passou a ser utilizado como matéria-prima nas fábricas de papel e celulose. Atualmente existem aproximadamente 700 espécies com diferentes adaptações climáticas e fisiológicas (CASTRO, 2017). As maiores áreas de plantio de eucalipto estão localizadas nos estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%) (IBÁ, 2020).

O Brasil apresenta a silvicultura mais avançada do mundo e ocupa o primeiro lugar na produção de celulose de eucalipto devido às boas práticas de manejo, ao melhoramento genético e às condições edafoclimáticas, possibilitando alcançar produtividades de 33,3 m³ha⁻¹ ao ano (IBÁ, 2020). Este valor é dez vezes maior do que a produtividade de países concorrentes como Estados Unidos e Canadá. Um comparativo é a produção florestal do hemisfério norte, com ciclo de corte de 40 anos, enquanto no Brasil os ciclos em média são de 6 a 7 anos (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 2005). O processo de produção florestal é considerado complexo, envolvendo etapas de planejamento do sistema de produção, produção de mudas, preparo do solo, transplante, tratos culturais e colheita (WILCKEN *et al.*, 2008).

Mesmo com a alta produtividade, a silvicultura brasileira ainda possui potencial de crescimento, principalmente pela alta variabilidade espaço temporal do ambiente e baixa mecanização das atividades, sendo que grande parte do manejo florestal é realizado de forma manual e com baixo ou sem controle de processo. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo são de grande importância para entender a produtividade vegetal. Portanto, é necessário conhecer e quantificar a variação dos atributos vegetais, pois os solos são sistemas dinâmicos e abertos e estão em constantes modificações (MONTANARI *et al.* 2015). Historicamente, o monitoramento dos plantios é feito

a partir de dados amostrais e dentre as técnicas, o inventário florestal é a principal ferramenta para se obter dados e informações dos componentes de produtividade e entender a variabilidade dos plantios florestais.

2.2. Agricultura de precisão no setor florestal

A AP tem como objetivo gerenciar o ambiente agrícola com base na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva. Segundo WHELAN & MCBRATNEY (2000), suas estratégias visam à racionalização da aplicação dos insumos e a gestão das lavouras com base nas necessidades das culturas, tendo como premissa a variações destes atributos no tempo e espaço. Uma vez que os talhões não são homogêneos, torna-se necessário práticas de gestão diferenciada para o melhor aproveitamento de cada porção da lavoura. MOLIN *et al.* (2015) definem a AP como uma forma de gestão a partir da constatação da variabilidade espacial das lavouras. BALASTREIRE (1998) aponta que essa variabilidade espacial pode ser correlacionada aos níveis de nutrientes disponíveis, compactação do solo, intensidade da presença de ervas daninhas, capacidade de armazenamento de água do solo, drenagem, etc. Contudo, deve-se buscar soluções para otimizar a utilização dos insumos e melhorar a eficiência produtiva da lavoura.

Segundo MOLIN *et al.* (2015) os relatos de trabalhos que adotam a gestão detalhada das lavouras para o manejo datam do início do século XX, mas só foi intensificado em meados de 1980 na Europa, com a geração dos primeiros mapas de produtividade. No mesmo período, foram realizadas nos Estados Unidos as primeiras adubações automatizadas em doses variadas. Entretanto ainda se discute sobre as vantagens da aplicação da AP em uma lavoura quando comparada a áreas que são tratadas como se fossem homogêneas, sendo essa a realidade atual da agricultura brasileira. A maioria das propriedades agrícolas no Brasil tratam as áreas como se fossem homogêneas, praticando um manejo pela média (exemplo: média da dose de insumo para todo o talhão), sendo um modelo de aplicação de insumo que pode gerar maior desuniformidade na lavoura. Segundo MOLIN *et al.* (2015), as práticas de AP podem contribuir para aumentar a produtividade de uma lavoura, pois tratam as áreas sendo heterogêneas, utilizam tecnologias que auxiliam no melhor aproveitamento da área, com potencial para reduzir custos de produção.

A implementação e difusão da AP foi influenciada diretamente pelo advento dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS - Global Navigation Satellite System) e o primeiro mapa de produtividade gerado a partir de dados de GNSS foi na década de 1980 (PEDERSEN & LIND, 2017). Embora o GNSS seja uma ferramenta essencial para a AP, o uso de um software específico para manipulação dos dados é de igual importância. Para isso são utilizados softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a geoestatística, que permitem a análise e organização de dados espaciais e a geração de mapas para o entendimento das variabilidades locais e definição de zonas de manejo (MIRANDA, 2017).

Uma maneira de tornar a AP operacional é a partir da identificação das unidades de gestão diferenciada (UGD). As UGDs são regiões dentro dos talhões que apresentam mínima variabilidade espacial e com estabilidade temporal. Ao identificar estas zonas, torna-se possível a delimitação de áreas de transição produtiva, permitindo o uso de técnicas específicas e produtividades uniformes quando em ambientes semelhantes (SANCHEZ *et al.* 2012). Mapas de fatores não antrópicos e permanentes, tais como parâmetros de solo e relevo, bem como da variabilidade espacial das culturas, podem ser uma maneira de demarcação de UGDs. Camadas de dados eficientes para se demarcar áreas de potenciais produtivos distintos podem ser obtidas a partir da biomassa estimada via imagens orbitais, condutividade elétrica aparente do solo e produtividade (SCHEPERS *et al.*, 2004).

Mesmo com a maior difusão da AP e do manejo direcionado de acordo com a variabilidade espaço-temporal em culturas como grãos e cana-de-açúcar, a silvicultura também apresenta um potencial de tratamento diferenciado de

suas áreas conforme a variabilidade. No entanto, a aplicação da AP na silvicultura é dificultada pois as operações silviculturais são realizadas com equipamentos ainda com baixa rastreabilidade do trabalho realizado. Contudo, o cenário contrasta quando comparado à operação de colheita florestal, realizada normalmente com equipamentos dedicados (BENEDETTI, 2012).

Recentes mudanças de comportamento são visíveis e empresas de tecnologia têm buscado soluções para o desenvolvimento de equipamentos que possibilitem a automação e monitoramento das máquinas em operações de implantação e cultivo florestais. Soluções para o controle eletrônico de atividades mecanizadas que controlam a quantidades de insumos aplicadas tais como a aplicação de insumos, controle de ervas daninhas e combate a formigas, já são utilizados e possuem a capacidade de aplicar insumos a taxas variáveis, abrindo uma oportunidade para a operacionalização da AP (MAEDA *et al.* 2014).

Em termos de tratamento diferenciado das áreas, a silvicultura se mostra altamente apta, visto que a variabilidade espaço-temporal é recorrente. BARBOSA *et al.* (2012) citam um efeito significativo na produtividade do *Pinus* quando comparados diferentes níveis de pH do solo. Numa investigação realizada por BRODBECK *et al.* (2007), no Alabama, EUA, em uma área de 3,6 ha de *Pinus taeda* foram identificadas quatro zonas com produtividades distintas, a partir da medição manual do volume de cada árvore. Entretanto, não foram avaliados os possíveis causadores da variabilidade. Já ORTIZ *et al.* (2006), mostraram a relação entre a variabilidade na produtividade e as propriedades do solo em clones de *Eucalyptus grandis*. Tais resultados indicam que a produção em florestas implantadas não difere de outras culturas quanto a abordagem relacionada à variabilidade espaço-temporal, o que pode reverter em processo silvicultural mais eficiente e ao mesmo tempo reduzindo custos e impactos ambientais negativos.

2.3. Mapeamento da produtividade

Os mapas de produtividade são considerados como camadas de informação primordiais para a análise da variabilidade das lavouras e identificação de regiões com oscilações de produtividade, investigando seus possíveis causadores por meio de correlações com dados históricos e fatores de produção da área e cultura, visando assim o entendimento das causas e consequências das heterogeneidades (MOLIN, 2000).

O trabalho de OLIVEIRA *et al.* (2016) é um dos poucos exemplos de artigo publicado, em que foi analisada a acurácia do mapeamento de produtividade de uma colhedora florestal a partir da geração de mapas que sumarizavam o volume das árvores georreferenciadas. Os autores utilizaram diferentes resoluções espaciais para gerar mapas que minimizassem erros que impactavam no resultado.

A colhedora florestal é um equipamento constituído por um cabeçote que possui a função de derrubar, desgalhar, descascar e traçar árvores montado sobre um veículo com sistema rodante de esteiras ou pneus (FERNANDES *et al.*, 2013). A colhedora pode ser equipada com sistema capaz de mapear os dados de colheita, para tanto, é necessário um conjunto de sensores capazes de medir as variáveis dendrométricas e quantitativas das árvores. Através dos sensores, para cada árvore são gerados dados de número de toras geradas, diâmetro médio por tora, comprimento médio por tora, volume de cada tora e diâmetro na altura do peito por árvore. Também é necessário um receptor GNSS para informar as coordenadas geográficas de cada árvore no momento do corte. Normalmente o receptor GNSS fica alocado na parte superior da cabine da colhedora, a uma distância de até 12 m do cabeçote, responsável por processar as árvores. Todos os dados coletados seguem um padrão específico conhecido como StanForD. StanForD é a abreviatura de Standard for Forest Machine Data and Communication, sendo um padrão

para dados e comunicação de colhedoras florestais desenvolvido nos anos 1980 pelo Instituto de Pesquisa Florestal Skogforsk, na Suécia (SKOGFORSK, 2014).

O sistema de mapeamento de produtividade registra dados de volume por árvore por árvore colhida, número de toras, diâmetro na altura do peito (DAP), seções de diâmetro medidas em intervalos de dez cm ao longo da tora, volume do caule e volume por árvore de cada tora. Uma característica relevante do conjunto de dados é que eles são expressos em volume por coordenada de cada árvore, diferindo-se de colhedoras agrícolas, onde os dados são expressos em termos de massa por unidade de área (WHELAN & TAYLOR, 2013).

Assim como ocorre na coleta de dados em monitores de colheita embarcados em colhedoras de grãos, o mapa de produtividade gerado pela colhedora florestal pode conter pontos de estimativas errôneas, causados por manobras de corte, sobreposições de linhas colhidas, estreitamento de linhas de plantio, velocidade da máquina, erros de posicionamento e espaços vazios (BLACKMORE & MARSHALL, 1996). Em LYLE *et al.* (2014), é relatado que os erros encontrados estão relacionados às características físicas da colhedora, ao sistema de medição da produtividade, a variações dentro do talhão, ao operador e, ainda, devido ao procedimento de obtenção do mapa.

No caso da colhedora florestal, segundo ROBINSON *et al.* (2004), os dados estão sujeitos a erro de localização, pois o receptor GNSS está montado na cabine da máquina e a árvore é derrubada pelo cabeçote que está montado no final de um braço mecânico de até 12 m de comprimento. Portanto, a localização da árvore será definida incorretamente por uma distância equivalente à extensão do braço. Além disso, há a limitação de acurácia do receptor GNSS. Um receptor GNSS pode possuir recurso para correção diferencial em tempo real ou após a coleta dos dados e existem vários tipos de receptores com amplo espectro de exatidão. Entretanto, o receptor GNSS com código C/A (corse aquisition), que não possui recursos de correção diferencial, é o mais utilizado em monitores de colheita. A acurácia alcançada nas correções do código C/A pode ser de 1 a 5 m (HOFMANN *et al.*, 1994). Essa incerteza no posicionamento do dado faz com que a avaliação da distribuição de volume por unidade de área, em pequena escala, seja uma tarefa desafiadora. Portanto, antes do desenvolvimento de mapas, é preciso definir uma resolução espacial que supere as limitações na exatidão da localização das árvores.

Os dados errôneos devem ser identificados e removidos, tornando essa uma etapa importante para melhorar a qualidade da informação contida nos mapas (MENEGATTI & MOLIN, 2003). Na sequência, esses dados devem passar por análise geoestatística para o entendimento do grau de dependência espacial que apresentam (GREGO *et al.*, 2014). Por último, os dados devem ser interpolados para a obtenção de mapas e alguns dos métodos mais utilizados para interpolação de dados de alta densidade a krigagem, inverso da distância e vizinho mais próximo (MENEGATTI & MOLIN, 2004).

A krigagem ordinária consiste em um dos métodos de interpolação mais flexíveis e complexos e exige o tratamento preliminar dos dados para a obtenção do semivariograma, que resume as características da variabilidade espacial dos dados. No método do inverso do quadrado da distância, os pontos mais distantes possuem menor efeito em relação ao valor derivado, sendo ele proporcional ao inverso da distância entre cada ponto e o ponto do valor estimado. Este método é considerado de rápido processamento por não requerer nenhuma modelagem prévia. O método do vizinho mais próximo é frequentemente utilizado para conversão de uma massa de dados obtidos em espaços regulares ou em grade, ou quando a grade de pontos apresenta poucos vazios. Este método se comporta positivamente quando utilizado em dados brutos com pequenos raios de atuação, consequentemente, quanto maior o raio, maior a deterioração da correlação espacial, podendo inibir a interpolação entre pontos (MENEGATTI & MOLIN, 2003).

Os dados resultantes podem ser espacializados em mapas, normalmente em um ambiente de sistema de informação geográfica (SIG). O SIG permite que diferentes camadas possam ser comparadas e correlacionadas (produtividade e atributos como relevo, biomassa, pedologia, etc). A partir da correta interpretação, é possível identificar regiões da área estudada onde o fenômeno de variabilidade espacial ocorre com maior frequência ou não. Dessa forma, o uso da geoestatística e de SIG amparam tecnicamente as decisões complexas e estratégicas em relação as informações analisadas, aos efeitos ambientais e na produtividade da cultura (GREGO *et al.*, 2014).

2.4. Possíveis causas da variabilidade da produção florestal

A variabilidade espacial e temporal é um assunto abordado constantemente na silvicultura e o seu entendimento já proporcionou grandes ganhos na produtividade florestal brasileira das últimas décadas. Aplicações de práticas silviculturais adequadas e de materiais genéticos direcionados e adaptados às condições sítio-específicas de clima e solo são alguns dos pontos estudados e que contribuíram para avanços no manejo (BRANDI, 1981). Com relação à variabilidade dos atributos do solo, GAVA (2005) encontrou variabilidade na produtividade de eucalipto relacionadas a teores de argila, onde as altas produtividades ocorreram em locais com maiores teores de argila, justificada pela maior capacidade de retenção de água de solos argilosos. Outras relações positivas diretamente ligadas à produtividade apontadas por CAMPINHOS (1999) são relacionadas à matéria orgânica do solo e a quantidade de nitrogênio disponível. NOVAIS *et al.* (1986) citam que a produtividade de plantios de eucalipto está relacionada diretamente com a fertilidade do solo, principalmente com os teores de P, K, Ca e Mg. Juntamente com as questões de retenção hídrica do solo, o fator precipitação também é apontado como determinante para o bom desenvolvimento de culturas de eucalipto. STAPE (2002) estudou povoamentos de *Eucalyptus* no norte da Bahia e encontrou que, em áreas de alta precipitação (média de 1411 mm ano⁻¹), a produtividade média foi de 24 Mgha⁻¹ ano⁻¹, já em áreas de baixa precipitação (média de 897 mm ano⁻¹) a produtividade foi em média 12 Mgha⁻¹ ano⁻¹.

O melhoramento genético no Brasil vem contribuindo diretamente para resolver as questões de variabilidades em diferentes locais, pois cada clone tem habilidade diferente no comportamento de um ou outro nutriente que será absorvido (BARROS *et al.*, 1990). BOTREL *et al.* (2007) encontraram ganhos de 4,2% no rendimento gravimétrico de carvão a partir da seleção de clones para diferentes locais. GRESPLAN (1997) observou em clones de eucalipto no norte do Espírito Santo que seu comportamento está diretamente ligado a eficiência nutricional, onde os materiais genéticos com maiores produtividades necessitavam de uma quantidade maior de nutrientes. A maximização da expressão da qualidade do material genético e do potencial intrínseco do sítio está ligada ao correto manejo silvicultural, pois só o correto manejo possibilita aumento da disponibilidade de recursos essenciais para o crescimento da planta, como água, luz e nutrientes (ALLEN, 2003). GONÇALVES *et al.* (2004) mencionam que a evolução da produtividade em florestas plantadas no Brasil é resultado das boas práticas de manejo de resíduos florestais, da determinação do espaçamento de plantio, do correto preparo e conservação de solo, da fertilização adequada e controle de plantas daninhas.

É notável que todos os trabalhos aqui citados mostram que a produtividade é o dado essencial para toda e qualquer correlação espaço-temporal, entretanto em todos os estudos citados o método utilizado para a coleta de dados de produtividade foi a partir do inventário florestal, que apresenta uma baixa resolução espacial. Faz-se necessário a utilização de dados de produtividade de alta resolução para otimizar a avaliação da relação entre potenciais causas e o efeito, manifestado na variabilidade espacial da produtividade.

2.5. Inventário Florestal

O inventário florestal é a base para o planejamento do uso dos recursos florestais. Sua função é caracterizar uma determinada área e conhecer quantitativamente e qualitativamente as espécies que a compõe, possibilitando definir o estoque de madeira e gerando dados para a melhor definição clonal e manejo silvicultural (CONFLO, 2012). Os objetivos do inventário serão definidos conforme a utilização da área, podendo ser área de manutenção da vida silvestre, área de reserva florestal e áreas florestais de plantio comercial. Quando a finalidade é voltada à aplicação em áreas florestais de plantios comerciais, o inventário florestal coleta dados da qualidade do fuste, estado fitossanitário, classe de copas, potencial de crescimento da espécie florestal e avaliação da dendrometria. A coleta de dados de dendrometria possui grande enfoque, tendo como finalidade a coleta de dados de comprimento e diâmetro das árvores para determinar ou estimar variáveis de volume e consequentemente o estoque de madeira presente nas áreas de plantio. O estoque de madeira é um dado de grande importância para empresas florestais, pois é a partir deste dado que as empresas planejam sua colheita, produção de papel e celulose e plantios futuros (DE BARROS, 2013).

O Inventário Florestal Contínuo (IFC) é a prática mais utilizada por empresas e institutos de pesquisas. Nesse caso o objetivo é avaliar a densidade populacional e executar planos de manejo, possibilitando estimar a produção corrente e elaborar projeções para curtos períodos de tempo, aplicando os resultados diretamente no ajuste de equações que expressem a produtividade média do povoamento ao decorrer do ciclo (SCOLFORO, 1998). Os dados de produtividade gerados no IFC também auxiliam na classificação de áreas em unidades homogêneas, tendo como objetivo o manejo do sítio de maneira específica (HAKAMADA, 2012).

A metodologia de coleta de dados do IFC é baseada na medição de parcelas amostrais com densidade previamente definida, de acordo com as características de variabilidade da área, sendo que a densidade pode aumentar conforme a variabilidade espacial ou clonal da área. SCOLFORO *et al.* (1993) indicam que a unidade amostral deve representar a variabilidade da população, além de fornecer estimativas precisas e não tendenciosas dos parâmetros de interesse. AVERY & BURKHART (1983) apontam que a decisão de implantação das parcelas não pode ser baseada nas preferências pessoais do executor, mas sim apoiadas em pesquisas específicas que determinem tamanho, forma e o número ideal de parcelas que retratem a real característica da região. Cada parcela possui um raio de amostragem e todas as árvores dentro desse raio passam por medição métricas e de classificação visual, que se dá por meio de atribuição de notas ou grau de impacto, gerando majoritariamente dados de fitossanidade.

Em empresas florestais, o fator custo muitas vezes define a quantidade de parcelas a serem instaladas pois a manutenção e o processamento de parcelas permanentes geram um alto custo durante o ciclo. Não obstante, tais informações obtidas não são suficientes para gerar números realistas de volume, motivado pelo erro do inventário por talhão gerado ao longo dos anos de coleta. Isso gera a necessidade de se efetuar o Inventário Pré-Corte (IPC) com o objetivo de gerar informações mais exatas por talhão, a partir da instalação de um maior número de parcelas, aumentando ainda mais o custo do processo (MELLO *et al.*, 2006).

Com o avanço tecnológico, os inventários florestais têm diversificado as estratégias de coletas de dados e já não se limitam à simples quantificação de volume de madeira total a partir de medições manuais. Diversas técnicas têm sido usadas para criar alternativas ao método convencional, tais como LiDAR (Light Detection and Ranging), radar e variáveis derivadas de imagens de satélite (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Dentre as alternativas que surgem, há o mapeamento de produtividade com dados coletados automaticamente pela colhedora florestal, quando corta e processa uma árvore. Apesar da existência dos dados de produtividade no setor florestal, eles ainda são pouco utilizados pelos tomadores de decisão, diferente do que acontece ao se tratar de culturas anuais (TAYLOR *et al.*, 2006). Embora seja

uma informação tardia para possíveis intervenções durante o ciclo, trata-se de uma camada de dados fundamental para a investigação da variabilidade espacial de qualquer cultivo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização das áreas experimentais

O estudo foi realizado em três áreas experimentais pertencente à empresa Suzano S/A localizadas no estado de São Paulo (Figura 1). A área 1 está situado no município de Itapetininga (coordenadas geográficas 23°42'31" de latitude sul e 48°22'21" de longitude oeste), a área 2 está situada no município de Anhembi (coordenadas geográficas 22°54'57" de latitude sul e 48°14'33" de longitude oeste) e a área 3 está situada no município de São Miguel Arcanjo (coordenadas geográficas 23°52'59" de latitude sul e 47°56'50" de longitude oeste). As áreas eram povoadas por floresta de *Eucalyptus grandis* implantada. A área 1 foi implantado em 2010 com um espaçamento entre linhas de 3,30 m e entre plantas de 2,27 m, possui 11,07 ha, tem como solo predominante o latossolo, foi colhida entre 11/01/2018 e 22/01/2018 com comprimento de tora de 7,20 m. A área 2 foi implantada em 2011 com um espaçamento entre linhas de 3,80 m e entre plantas de 2,10 m, possui 18,56 ha, tem um solo predominante de neosolo, foi colhida entre 10/12/2018 e 07/01/2019, com comprimento de tora de 3,60 m. A área 3 foi implantada em 2013 com um espaçamento entre linhas de 3,00 m e entre plantas de 2,20 m, possui 18,12 ha, tem um solo predominante de latossolo, foi colhida entre 11/09/2019 e 11/10/2019, com comprimento de tora de 7,20 m. O comprimento de corte entre toras foi definido previamente pela empresa parceira.

Figura 1. Localização e formato das áreas experimentais estudadas com floresta de *Eucalyptus grandis*.

3.2. Colheita e mapeamento de produtividade

A colheita e mapeamento da produtividade foi realizada por com um cabeçote descascador e picador de árvores modelo H77euca (Ponsse, Vieremä, Finlândia) montado em uma escavadora PC200 (Komatsu, São Paulo, Brasil). O cabeçote é composto por um sistema sensor embarcado, modelo Opti4G 4.715 (Ponsse, Vieremä, Finlândia), responsável por registrar os dados de volume de cada árvore em metros cúbicos e georreferenciar o posicionamento individual de cada árvore a partir de um receptor GNSS código C/A instalada na parte superior da cabine (Figura 2a). Após a coleta dos dados de produtividade na área 1, notou-se que há uma coordenada única para várias árvores abatidas quando o GNSS está alocado na cabine. Para melhorar o dado de geoposicionamento das árvores, realocou-se o receptor GNSS para o cabeçote descascador (Figura 2b). A coleta de dados na área 1 ocorreu com o receptor alocado na cabine e nas áreas 2 e 3 ocorreram com o receptor posicionado próximo ao cabeçote.

Figura 2. Local de instalação da antena GNSS na máquina: alocado na cabine a aproximadamente 12 m do cabeçote (a); alocado a aproximadamente 0,25 m do centro do cabeçote (b)

Para garantir a acurácia dos dados de volume, diariamente foi realizada a calibração do sistema. A calibração é o ajuste a partir da medição real do que está sendo colhido e o que o monitor de colheita aponta. No caso da colhedora florestal, a calibração ocorre a partir do equipamento suta eletrônica, fornecido pela fabricante do cabeçote Ponsse. A suta é responsável por receber os dados de produtividade do monitor de colheita das últimas dez árvores e gravar diâmetros e comprimentos de toras, que são então mensuradas de forma manual. No processo de calibração (Figura 3), o operador colhe dez árvores, conecta a suta eletrônica ao monitor de colheita, que envia os dados; posteriormente coleta o diâmetro ao longo de vários pontos e comprimento total das toras das árvores colhidas. Ao final, a suta é conectada ao monitor novamente para enviar os dados reais e se auto calibrar. A calibração ocorreu todos os dias em que a máquina operou, antes do início das atividades.

StanForD para um formato legível em SIG, com todos os atributos de dendrometria. O software R (RStudio Team, 2019) foi utilizado para o desenvolvimento de um script responsável por realizar a conversão, extraindo variáveis de latitude, longitude, número de toras (N Toras), diâmetro médio de cada tora (DM), diâmetro na altura do peito (DAP), comprimento e volume por árvore (VI). Os dados por tora foram sumarizados para se obter o volume total de cada árvore e o dado de volume por unidade de área ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) foi gerado pela divisão entre o VI de cada árvore e sua área correspondente advinda do espaçamento de plantio. A Figura 5 mostra as etapas de conversão de dados necessárias até a obtenção de um dado a ser utilizado em SIG.

Figura 5. Etapas do processo de conversão de dados brutos para dados tabulares que são legíveis em SIG.

Foram identificados e eliminados pontos com coordenadas e valores de produtividade nula e de valor discrepante. Para definir os valores limites de discrepância, foram avaliados todos os dados de dendrometria do inventário florestal e da cubagem. Os valores mínimos e máximos de DAP, DM, comprimento e VI foram definidos como valores de corte para as variáveis de produtividade coletados pela colhedora florestal. Na Tabela 1 encontram-se os valores limites de cada atributo.

Tabela 1. Valores limites das variáveis de produtividade aplicados na exclusão de valores discrepantes.

Variável	Valor Limite	
	Menor que	Maior que
DAP (cm)	13,6	28,6
DM (cm)	9,5	20,0
Comprimento (m)	12,27	29,70
VI (m ³)	0,07	1,73

DAP- diâmetro na altura do peito; DM- diâmetro médio; VI- volume por árvore.

3.3. Avaliação do desempenho do sistema sensor

Foram coletados dados de cubagem de árvores das áreas experimentais a fim de comparar os valores gerados pela colhedora florestal e os valores reais de volume de cada árvore. CAMPOS (2014) cita que a cubagem de árvores é a divisão do fuste da árvore em n seções e ao longo das seções são realizadas medições de diâmetros em alturas pré-estabelecidas. A partir dos diâmetros e o comprimento das toras, determinam-se os volumes de um sólido geométrico circular do fuste da árvore ou parte dele. Nas áreas 2 e 3 utilizou-se o método de para cálculo de volume real de árvores segundo a metodologia de Smalian, com medições a cada 1,0 m a partir do início da tora, até o seu final, medindo também o diâmetro final (Figura 6). Em adicional, foram coletados dados de altura do toco. As equações 1 e 2 (CAMPOS, 2014) foram utilizadas para calcular o volume de cada seção do tronco. Posteriormente gerou-se o volume total de cada árvore a partir do somatório das toras que constituem cada árvore e calculou-se o erro absoluto entre os atributos.

Figura 6. Representação do método de cubagem utilizado em que foram coletados diâmetros a cada 1,0 m a partir do início da tora, além dos diâmetros inicial e final.

Na área 2 foi gerada a análise entre os dados de inventário pré-corte de cada parcela e os dados de produtividade. A metodologia consistiu em criar três áreas circulares, com raio igual ao utilizada no inventário (11,28 m), 1,5 vezes (16,92 m) e 2 vezes (22,56 m) o raio da parcela. Todas as árvores dentro da área circular foram sumarizadas e por fim foram calculados o erro absoluto e a regressão linear a fim de definir o melhor tamanho de área circular. As unidades de volume por área tanto no inventário florestal quanto nas áreas circulares foram geradas a partir do volume total pela área de cada parcela.

3.4. Inventário Florestal

Foram coletados os dados de inventário pré-corte nas áreas 2 e 3, com o mesmo arranjo e localização da amostragem de solo (duas amostras por ha). O inventário é realizado dentro de uma parcela com raio de 11,28 m e são mensurados o diâmetro e altura de todas as árvores dentro do perímetro. Assim são gerados dados de produtividade, volume por árvore (VI), número de fustes (N Fustes), diâmetro na altura do peito (DAP), altura média, altura média de árvores dominantes, índice de uniformidade (PV50), porcentagem de árvores mortas, porcentagem de falhas, porcentagem de árvores bifurcadas, porcentagem de árvores quebradas e porcentagem árvores dominadas. Segundo o Instituto Brasileiro de Florestas (2020), as árvores dominantes são aquelas com copas que atingem níveis mais elevados de cobertura do solo, recebendo luz diretamente e lateralmente, atingindo dimensões maiores do que as árvores médias do povoamento. Por outro lado, as árvores dominadas são bem menores e quase não recebem luz em suas copas. O índice PV50 é um indicador de uniformidade proposto por STAPE, ROCHA E DONATTI (2006) e utilizado por HAKAMADA (2012); representa a porcentagem acumulada do volume de 50% das menores árvores (Equação 3).

(3)

$$PV50 = \frac{\sum_{k=1}^{n/2} V_{ij}}{\sum_{k=1}^n V_{ij}}$$

em que:

PV50 = porcentagem acumulada do volume por árvore das 50% menores árvores plantadas

V = volume por árvore da parcela i na idade j

n = número de árvores plantadas ordenadas (da menor para a maior)

3.5. Amostragem de solo

As amostragens de solo foram realizadas nas áreas 2 e 3, seguindo o método adotado pela empresa Suzano, mostrado na Figura 7. A densidade amostral foi de duas amostras por ha, sendo, cada ponto amostral composto por quatro sub amostras e coletados com um trado manual na profundidade de 0 – 0,20 m. As amostras foram alocadas no mesmo ponto da parcela do inventário florestal, com duas sub amostras coletadas entre as linhas de árvores e outras duas sub amostras entre as árvores (Figura 7).

Figura 7. Representação da coleta de amostras de solos.

As amostragens foram georreferenciadas com o auxílio de um tablet Tablet Samsung Galaxy Tab A 8 (SAMSUNG, Campinas, Brasil) que possui um GNSS com receptor código C/A. A distribuição dos pontos amostrais ao longo das áreas experimentais é representada pela Figura 8. Na área 2 coletou-se 54 pontos amostrais e na área 3 foram coletados 40 pontos amostrais. As amostras foram encaminhadas para um laboratório independente, responsável por realizar análises químicas e físicas do solo. As análises químicas geraram dados de P resina, K, Ca, Mg, H+Al, MO, Ph, SMP, Al³⁺, SB, CTC, V, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn e análise física gerou dados de textura do solo.

Figura 8. Mapa da localização dos pontos amostrais de solos e de inventário florestal.

Os dados para a geração do mapa de altimetria foram fornecidos pela empresa Suzano, já processados, com resolução espacial de 3 x 3 m.

3.6. Análise dos dados

Foi realizada a análise estatística descritiva dos dados coletados de mapeamentos de produtividade, solo, e inventário a fim de verificar o comportamento das medidas estatísticas de posição e de dispersão, antes da análise geoestatística. As análises estatísticas, correlação e regressão foram realizadas no software PyCharm (JetBrains, República Tcheca, 2019). A classificação de WARRICK & NIELSEN (1980) foi utilizada para definir o grau de variabilidade dos atributos. A classificação considera CV entre 12% e 60% como de média variabilidade, valores abaixo e acima desse intervalo são classificados como de baixa e alta variabilidade, respectivamente. A análise geoestatística também foi realizada em todos os atributos resultados das análises de solo, inventário e produtividade utilizando o software Vesper 1.6 (MINASNY *et al.*, 2002).

Foram gerados os semivariogramas experimentais que foram ajustados conforme os semivariogramas teóricos. O ajuste dos semivariogramas teóricos proporcionam a máxima correlação entre os pontos dos semivariogramas experimentais. A escolha do melhor modelo do semivariograma teórico foi baseada no menor valor da soma dos quadrados dos resíduos (RMSE). O grau da dependência espacial (GD) do atributo amostrado foi gerado a partir da Equação 4 que é a relação entre o efeito pepita e o patamar para cada modelo ajustado, sendo classificado como: forte, quando o semivariograma apresentar efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderado quando esta relação estiver entre 25% e 75%, e fraco, quando o efeito pepita é superior a 75% do patamar. Assim, quanto menor esta relação, menos o efeito pepita está afetando a dependência espacial dos dados. Como última etapa, foram realizadas as interpolações e gerados os mapas das variáveis estudadas (CAMBARDELLA *et al.*, 1994),

$$GD = \frac{Co}{C1+Co} \times 100 \quad (3)$$

em que:

Co = efeito pepita

C1 + Co = patamar

Para a análise de relação entre os dados de produtividade e os dados de inventário e análise de solo, foi montada a matriz de correlação de Pearson. Posteriormente foram efetuadas as modelagens das regressões lineares simples para identificar as correlações significativas entre os atributos. As análises foram realizadas no software PyCharm (JetBrains, República Tcheca, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Mapeamento de produtividade

4.1.1. Mapeamento de produtividade com o GNSS acoplado na cabine e acoplado próximo ao cabeçote

A colheita da área 1 ocorreu com o receptor GNSS alocado na cabine da colhedora. Devido à colhedora trabalhar em uma linha de plantio e colher as árvores dentro do seu raio de alcance, nota-se na Figura 9 que a colhedora gera sempre a localização da árvore na linha de tráfego, sendo que as árvores colhidas na linha de plantio à direita ou esquerda da máquina estão associadas à localização da linha de tráfego da colhedora, com localização errônea dos pontos de colheita. O raio médio de trabalho da máquina é de 12,0 m, possibilitando a colheita de até três linhas laterais à linha de tráfego. O raio de colheita reflete diretamente no mapa de colheita, sendo que cada linha de plantio está separada por uma distância média de 14 m. O deslocamento do ponto mapeado ocasiona uma degradação na localização do dado de produtividade das árvores, podendo assim gerar um mapa de produtividade errôneo. Além disso, evidencia-se a limitação imposta pela resolução dos dados de coordenadas geográficas, da ordem de x m, evidenciado por pontos equidistantes.

Figura 9. Mapa de colheita da área experimental 1 com uma distância média entre as linhas de dados de 12 m devido à alocação do GNSS na cabine da colhedora e pontos em alta resolução equidistantes.

Com o intuito de melhorar a acurácia da localização de cada árvore colhida, alterou-se o local do receptor GNSS a 0,25 m do centro do cabeçote. A decisão de não instalar o receptor GNSS no cabeçote foi da empresa fabricante do cabeçote pois havia grandes riscos de danos, devido à quantidade de choque que o cabeçote sofre e pela alta temperatura do local.

Após a realocação do receptor, realizou-se a colheita e coleta de dados nas áreas 2 e área 3 (Figura 10). É notável a maior dispersão dos pontos georreferenciados de cada árvore nas áreas. Entretanto, devido ao fato de ser um receptor código C/A e portadora L1, com incerteza da ordem de 5 m, a linha de plantio não pode ser identificada com exatidão. A área 3 foi colhida completamente, entretanto o GNSS foi danificado por um choque entre o cabeçote e um galho, quebrando o GNSS. Não houve tempo hábil para a substituição do equipamento, portanto, foi estudado apenas a área que possui pontos de produtividade, totalizando 2,73 ha. Vale ressaltar que as fabricantes de máquinas florestais devem trabalhar para que sejam disponibilizados receptores GNSS com proteções mais robustas e melhorar seu ponto de alocação, visto que o ambiente de trabalho sofre com choques constantes de troncos e árvores, podendo danificar os sensores com frequência. O georreferenciamento de cada árvore deve melhorar em exatidão e a resolução das coordenadas não deve ter limitações, para que a informação de posição seja otimizada.

Figura 10. Mapa de colheita da área 2 onde o receptor GNSS foi alocado a 25 cm do cabeçote.

4.1.2. Desempenho dos dados de produtividade

Durante o experimento, foram coletados dados de cubagem de 22 e 97 árvores e 148 e 356 toras nas áreas 2 e 3, respectivamente, totalizando 119 árvores e 504 toras. A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva por tora das

variáveis dendrométricas e o erro absoluto entre elas. Na Tabela 3 são apresentados os resultados da estatística descritiva por árvore das variáveis dendrométricas e seus erro absoluto por árvore.

A estatística descritiva por tora e árvore indicam que a distribuição dos dados não é normal. Os resultados por tora de diâmetro médio e volume por tora possuem alto coeficiente de variação, variando entre 29,4% e 58,2%, pois o diâmetro das toras tende a diminuir conforme estão mais distantes da base de corte, a variação impacta diretamente no volume visto que para o cálculo de volume, a variável diâmetro é elevada ao quadrado. Já quando se observa as variáveis por árvore de diâmetro médio, diâmetro na altura do peito e volume por árvore, as variações estão entre 12,9% a 38,9%.

As variáveis de altura, tanto para tora quanto para árvore, possuem o menor CV entre os atributos, variando entre 3,0% e 22,7%. Quanto aos erros absolutos dos atributos volumétricos, os erros médios variaram entre 7,3% a 22,9% para atributos de tora e entre 2,6% e 25,8% para atributo de árvore. O coeficiente de variação entre os erros absolutos de tora e árvore variam entre 40,8% e 244,4%. O alto coeficiente de variação pode ser explicado pelas falhas de processamento do cabeçote, pois foi observado que em alguns momentos o rolo descascador rodou em falso, isso pode ter ocasionado valores discrepantes de diâmetro e comprimento, consequentemente de volume. O aumento no número de calibrações ao longo do dia pode auxiliar na diminuição dos erros de medição. É importante salientar que a alta variação dos dados diminui quando se analisa os dados por árvore, entretanto ainda se encontra coeficiente de variação na ordem de 100%. Isso se deve pela diluição dos erros quando se sumariza as toras a fim de se obter o volume por árvore.

Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de cubagem por tora referente aos dados obtidos nas áreas 2 e 3.

Área	Variável	Unidade	N	Média	Desvio	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose	Variância	CV (%)
Área 2	DM Observado	m	148	0,13	0,04	0,04	0,13	0,21	0,03	-0,71	0,00	30,7
	DM Colhedora	m	148	0,13	0,04	0,03	0,13	0,22	-0,63	-0,28	0,00	34,4
	Comprimento Observado	m	148	3,59	0,13	3,05	3,61	4,25	0,15	7,58	0,016	3,6
	Comprimento Colhedora	m	148	3,69	0,41	3,23	3,61	7,09	5,96	39,86	0,168	11,1
	VI Observado	m ³	148	0,05	0,03	0,01	0,05	0,12	0,52	-0,42	0,001	56,0
	VI Colhedora	m ³	148	0,06	0,03	0,00	0,06	0,16	0,34	0,54	0,001	49,7
	Erro Absoluto DM	%	148	13,5	22,9	0,1	5,2	114,3	2,90	8,21	0,05	169,7
	Erro Absoluto Comprimento	%	148	3,0	7,3	0,0	1,1	52,5	4,97	26,51	0,01	244,4
	Erro Absoluto VI	%	148	20,6	20,4	0,1	16,6	179,0	3,90	25,35	0,04	98,7
Área 3	DM Observado	m	356	0,12	0,04	0,05	0,12	0,26	0,26	-0,32	0,00	29,6
	DM colhedora	m	356	0,11	0,03	0,06	0,11	0,26	0,31	-0,07	0,00	29,4
	Comprimento Observado	m	356	5,98	0,56	3,59	6,19	6,80	-2,58	5,81	0,312	9,3
	Comprimento colhedora	m	356	6,23	0,58	3,78	6,21	16,24	14,17	246,45	0,341	9,4
	VI Observado	m ³	356	0,08	0,05	0,01	0,07	0,27	0,74	0,54	0,002	58,2
	VI colhedora	m ³	356	0,08	0,04	0,02	0,08	0,39	1,72	8,67	0,002	52,3
	Erro Absoluto DM	%	356	11,4	10,5	0,1	8,7	79,4	1,88	6,08	0,01	92,0
	Erro Absoluto Comprimento	%	356	4,1	9,6	0,0	0,5	73,9	3,32	12,92	0,01	232,0
	Erro Absoluto VI	%	356	22,7	22,1	0,0	18,1	211,1	3,27	18,69	0,05	97,2

N- número de amostras; CV- coeficiente de variação; DM- diâmetro médio; VI- volume por árvore.

Tabela 3. Estatística descritiva dos dados de cubagem por árvore.

Área	Variável	Unidade	n	Média	Desvio	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose	Variância	CV
Área 2	Altura do Toco	m	22	0,26	0,08	0,11	0,26	0,47	0,96	1,67	0,01	31,7
	DM Observado	m	22	0,12	0,02	0,10	0,12	0,16	0,36	-0,66	0,00	12,9
	DM Colhedora	m	22	0,12	0,02	0,09	0,13	0,17	0,13	-0,21	0,00	15,1
	DAP Observado	m	22	0,19	0,03	0,14	0,20	0,24	0,10	-0,41	0,00	13,5
	DAP Colhedora	m	22	0,17	0,02	0,13	0,17	0,23	0,78	1,15	0,00	13,5
	Comprimento Observado	m	22	24,14	3,81	14,01	25,21	29,70	-1,10	1,27	14,49	15,8
	Comprimento Colhedora	m	22	24,80	4,11	14,21	25,30	29,79	-1,04	0,76	16,90	16,6
	VI Observado	m ³	22	0,33	0,11	0,12	0,32	0,59	0,44	0,20	0,01	35,2
	VI Colhedora	m ³	22	0,38	0,14	0,14	0,40	0,74	0,72	1,06	0,02	36,3
	Erro Absoluto DM	%	22	3,7	3,4	0,2	2,4	12,4	1,29	0,96	0,001	92,6
	Erro Absoluto DAP	%	22	11,0	4,5	1,9	10,8	18,6	-0,08	-0,34	0,002	40,8
	Erro Absoluto Comprimento	%	22	2,6	3,5	0,1	0,9	13,4	1,88	3,16	0,001	135,9
	Erro Absoluto VI	%	22	14,2	6,0	6,0	13,3	30,7	1,04	1,22	0,004	41,9
Área 3	Altura do Toco	m	97	0,12	0,03	0,05	0,12	0,20	0,16	0,17	0,00	24,0
	DM Observado	m	97	0,12	0,02	0,10	0,12	0,20	1,31	4,95	0,00	13,1
	DM Colhedora	m	97	0,11	0,02	0,07	0,11	0,19	0,86	2,39	0,00	16,0
	DAP Observado	m	97	0,18	0,02	0,14	0,18	0,29	0,99	4,11	0,00	12,5
	DAP Colhedora	m	97	0,15	0,03	0,08	0,15	0,30	1,24	5,87	0,00	20,3
	Comprimento Observado	m	97	21,96	2,67	12,40	22,94	25,12	-0,87	0,00	7,14	12,2
	Comprimento Colhedora	m	97	22,85	3,34	12,47	24,76	36,45	-0,09	1,92	11,17	14,6
	VI Observado	m ³	97	0,29	0,09	0,12	0,28	0,76	1,74	8,82	0,01	30,1
	VI Colhedora	m ³	97	0,29	0,11	0,09	0,29	0,93	1,95	9,39	0,01	38,9
	Erro Absoluto DM	%	97	9,1	7,1	0,3	7,7	36,5%	1,52	3,19	0,005	77,2
	Erro Absoluto DAP	%	97	25,8	17,0	2,0	21,7	97,4%	1,47	2,94	0,029	66,0
	Erro Absoluto Comprimento	%	97	3,8	5,1	0,0	1,6	38,2%	3,65	21,69	0,003	133,8
	Erro Absoluto VI	%	97	12,6	11,8	0,3	9,3	64,9%	1,98	4,57	0,014	94,1

N- número de amostras; CV- coeficiente de variação; DM- diâmetro médio; VI- volume por árvore; DAP- diâmetro na altura do peito.

Como segunda etapa da análise de desempenho dos dados de produtividade obtidos pela colhedora, a Figura 11 apresenta os mapas da área 2 com as áreas circulares geradas a partir do ponto onde foram realizadas as coletas de dados de inventário e os pontos do mapeamento de produtividade que cada parcela abrangueu.

Figura 11. Exemplos de áreas circulares geradas a partir do ponto onde foram realizadas as coletas de dados de inventário (a); áreas circulares de pontos do mapeamento de produtividade que cada parcela abrangueu.

A Tabela 4 apresenta os valores de erro absoluto gerados pelos gráficos de regressão linear entre as variáveis de produtividade e os dados de inventário pré-corte. Os valores dependentes da área (volume - m^3ha^{-1} ; número de árvores ha^{-1}) possuem maiores coeficiente de variação, entre 96,2% e 22,8%, visto que os pontos georreferenciados das árvores muitas vezes não estão dentro do círculo definido, motivado pela falta de acurácia do GNSS e assim contabilizando um número questionável de árvores em cada círculo. Já valores que são calculados por média (volume por árvore, DAP e comprimento), apresentam menores variações (entre 49,2% e 17,3%). A área circular com raio de 22,56 m apresentou os menores valores de erro, entretanto quando foi calculada a regressão linear, a área circular com 16,92 m possui os melhores resultados. Para os atributos de volume por árvore e comprimento, tanto a metodologia de validação de dados por cubagem quanto pela análise de pontos nas áreas circulares, apresentou valores próximos.

Tabela 4. Estatística descritiva dos dados de produtividade por árvore para as diferentes áreas amostrais, referentes os raios de 11,28 m, 16,92 m e 22,56 m e correlação linear entre os dados de produtividade e inventário pré-corte.

Variável	Raio 11,28 m	Raio 16,92 m	Raio 22,56 m
Erro Absoluto Volume	96,2	53,5	35,8
Erro Absoluto VI	20,9	18,4	17,3
Erro Absoluto Número de Árvores	66,6	39,5	22,8
Erro Absoluto DAP	22,6	22,3	22,5
Erro Absoluto Comprimento	49,2	46,9	45,7
R ² Volume	0,00002	0,01	0,01
R ² VI	0,34	0,35	0,29
R ² Número de Árvores	0,0001	0,02	0,002
R ² DAP	0,18	0,18	0,16
R ² Comprimento	0,12	0,10	0,07

AC- área circular; VI- volume por árvore; DAP- Diâmetro na altura do peito

4.1.3. Geração de mapas de produtividade

A partir dos dados de mapeamento de produtividade, foi calculada a estatística descritiva dos atributos de cada tora. Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos atributos por tora de diâmetro médio, comprimento e volume por árvore. Na Tabela 6 encontram-se os resultados dos atributos de número de tora, diâmetro médio, diâmetro na altura do peito, comprimento, volume por árvore e produtividade.

Analisando a estatística descritiva dos dados referentes às três áreas colhidas, os valores da assimetria e curtose dos atributos indicam que a distribuição não é normal, com os valores médios influenciados pelos valores extremos. Ao avaliar os valores da mediana, ela se aproxima quando relacionada ao valor da média aritmética, já os valores de mínimos e máximos se afastam em ambas as áreas. Ao avaliar o coeficiente de variação (CV) dos atributos de tora e volume, os valores variam de 24,0% a 85,3%. Para a variável produtividade, encontrou-se CV entre 60,6% e 85,3%. Altas variações do CV são consideradas os primeiros indicadores de heterogeneidade nos dados (RIBEIRO JUNIOR, 1995).

Quando se analisa os dados de número de toras por árvore, encontra-se um desvio padrão de uma tora, não possuindo grandes variações. Isso indica que na maior parte do tempo a colhedora trabalhou com um número constante de toras por árvore. Ressalta-se que a diferença entre as médias de tora encontrada, quatro, seis e três toras respectivamente para as áreas 1, 2 e 3, está ligada ao tamanho de corte das toras adotado em cada área.

Os valores com grandes variações também podem estar ligados a falha no processamento das árvores pelo cabeçote, uma vez que o rolo descascador pode girar em falso e gerar um valor de produtividade errôneo. Entretanto, é notável que os resultados estatísticos referentes as áreas 2 e 3 possuem uma maior linearidade e homogeneidade, principalmente porque o regime de calibração do cabeçote foi plenamente entendido pelos operadores em campo, tornando os dados de mapeamento mais precisos.

Tabela 5. Estatística descritiva dos dados de produtividade por tora, referente às três áreas experimentais

Área	Variável	Unidade	N	Média	Desvio	Mínimo	Mediana	Máximo	Amplitude	Assimetria	Curtose	Variância	CV (%)
Área 1	DM	cm	61802	8,13	3,72	1,10	6,60	78,30	77,20	1,76	8,60	78,30	45,7
	Comprimento	m	61802	5,64	1,43	0,10	6,21	29,39	29,29	-0,49	15,84	2,05	25,4
	VI	m ³	61802	0,05	0,05	0,00	0,03	1,56	1,56	3,76	44,09	0,00	104,5
Área 2	DM	cm	129027	11,34	4,04	2,80	11,50	39,00	36,20	0,10	-0,12	16,34	35,6
	Comprimento	m	129027	3,55	0,85	0,10	3,61	28,78	28,68	4,78	81,54	0,73	24,0
	VI	m ³	129027	0,05	0,03	0,00	0,04	1,34	1,34	3,42	70,52	0,00	68,1
Área 3	DM	cm	13860	10,57	3,64	5,90	10,00	29,70	23,80	0,59	-0,14	13,28	34,5
	Comprimento	m	13860	5,98	1,27	0,10	6,21	26,43	26,33	1,24	26,60	1,62	21,3
	VI	m ³	13860	0,07	0,05	0,00	0,06	0,42	0,42	1,13	2,00	0,00	68,1

N- número de amostras; CV- coeficiente de variação, DM- diâmetro médio; VI- volume por árvore.

Tabela 6. Estatística descritiva dos dados de produtividade por árvore, referente às três áreas experimentais.

Área	Variável	Unidade	N	Média	Desvio	Mínimo	Mediana	Máximo	Amplitude	Assimetria	Curtose	Variância	CV (%)
Área 1	N Toras	n	16728	4	1	1	4	8	7	-0,28	0,28	1,12	28,6
	DM	cm	16728	7,73	2,44	1,10	7,10	28,70	27,60	1,27	2,39	28,70	31,6
	DAP	cm	16728	12,86	5,18	1,90	12,50	199,90	198,00	4,49	113,65	199,90	40,3
	Comprimento	m	16728	20,85	6,38	1,58	22,22	49,99	48,41	-0,30	0,40	40,68	30,6
	VI	m ³	16728	0,17	0,15	0,00	0,13	1,64	1,64	1,69	4,64	0,02	85,3
	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	16728	214,49	182,87	1,88	159,90	2056,89	2055,01	1,69	4,64	33442,90	85,3
Área 2	N Toras	n	23235	6	2	1	6	10	9	-0,79	-0,38	4,08	35,9
	DM	cm	23235	10,95	2,90	2,80	11,11	31,74	28,94	0,02	1,40	8,42	26,5
	DAP	cm	23235	14,54	4,29	2,80	14,70	38,60	35,80	-0,05	0,24	18,37	29,5
	Comprimento	m	23235	19,73	7,24	1,50	21,67	49,92	48,42	-0,76	-0,32	52,38	36,7
	VI	m ³	23235	0,25	0,15	0,00	0,25	2,13	2,13	0,65	1,84	0,02	60,6
	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	23235	337,64	204,73	1,47	332,80	2840,74	2839,27	0,65	1,84	41914,67	60,6
Área 3	N Toras	n	4819	3	1	1	4	9	8	-0,78	0,23	1,11	31,9
	DM	cm	4819	10,15	2,70	5,90	10,43	54,73	48,83	1,09	14,93	7,31	26,6
	DAP	cm	4819	14,18	4,17	5,90	14,80	57,90	52,00	0,11	2,28	17,42	29,4
	Comprimento	m	4819	19,75	6,45	1,56	22,05	49,99	48,43	-0,62	0,45	41,57	32,7
	VI	m ³	4819	0,23	0,15	0,01	0,24	3,35	3,34	2,28	37,78	0,02	64,2
	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	4819	355,90	228,58	9,24	366,21	5070,30	5061,06	2,28	37,78	52247,48	64,2

N- número de amostras; CV- coeficiente de variação; N Toras- número de toras; DM- diâmetro médio; DAP- diâmetro na altura do peito; VI- volume por árvore.

Os atributos de produtividade das áreas 1, 2 e 3, de cada árvore são apresentados em mapas em forma de pontos de volume por área ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), volume por árvore (m^3), comprimento (m), diâmetro na altura do peito - DAP (cm), diâmetro médio (cm) e número de toras (n), respectivamente, pelas Figuras 12, 13 e 14. A alta variabilidade dos dados em cada ponto prejudica a identificação de tendências e de agrupamentos. Para a melhor interpretação dos mapas, os dados de árvore individualizadas foram submetidos à geoestatística e posteriormente interpolados de acordo com o melhor método.

Figura 12. Mapas de pontos de atributos de colheita da Área Experimental 1.

Figura 13. Mapas de pontos de atributos de colheita da Área Experimental 2.

Figura 14. Mapas de pontos de atributos de colheita da Área Experimental 3.

Com base na Tabela 7, verifica-se que todas as variáveis da área 1 e as variáveis volume por árvore, comprimento, diâmetro na altura do peito, diâmetro médio e número de toras da área 3 apresentam efeito pepita puro. Isso significa que os dados possuem uma distribuição espacial aleatória e a aplicação da estatística clássica é a maneira correta de analisar os dados (VIEIRA, 2000). O modelo teórico que apresentou melhor ajuste para o semivariograma dos atributos foi o gaussiano (Apêndice – Figura 31, 32 e 33). De acordo com BOTTEGA *et al.* (2013), o modelo gaussiano representa um elevado prosseguimento da variabilidade espacial. Os parâmetros do semivariogramas que foram melhores ajustados e consequentemente apresentaram os menores valores de soma dos quadrados dos resíduos (RMSE) são volume por árvore (0,0004), número de toras (0,0237) e diâmetro médio (0,093) na área 2; e na área 3 foram os dados de produtividade (1103,2).

O alcance é uma variável importante no planejamento e na avaliação experimental, auxiliando na definição de procedimento de amostragem. O parâmetro representa a distância em que os pontos amostrais estão correlacionados. É a partir do conhecimento do alcance da dependência espacial que se define o raio de amostragem ideal (SOUZA *et al.*, 2014). KERRY & OLIVER (2004) propõe que a definição do tamanho da grade amostral deve ser metade do alcance encontrado na modelagem do semivariograma. Avaliando o alcance dos atributos, nenhum parâmetro possuiu alcance inferior a 70 m, valor este necessário para a modelagem dos semivariogramas e para possuir o tamanho da grade amostral ideal (2 amostras ha^{-1}). Avaliando grau de dependência espacial, apenas o atributo de diâmetro médio apresentou dependência fraca, os demais apresentaram dependência espacial forte ou moderada.

Tabela 7. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de dados de mapeamento de produtividade das áreas 1, 2 e 3.

Área	Dados	Modelo	C ₀	C ₁	A	RMSE	GD	Classificação GD
Área 1	Produtividade	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	VI	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	Comprimento	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	DAP	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	DM	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	N Toras	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
Área 2	Produtividade	Gaussiano	36534	50000	877,8	749,100	0,58	Moderado
	VI	Gaussiano	0,0206	3,211	10000,0	0,0004	0,99	Fraco
	Comprimento	Gaussiano	51,0400	3,0300	288,4	0,458	0,06	Forte
	DAP	Gaussiano	16,92	4,573	403,1	0,1706	0,21	Forte
	DM	Gaussiano	7,02	977,3	9113	0,093	0,99	Fraco
	N Toras	Gaussiano	3,953	0,3053	334,5	0,0237	0,07	Forte
Área 3	Produtividade	Gaussiano	49049	10000	253,5	1103,2	0,17	Forte
	VI	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	Comprimento	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	DAP	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	DM	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	N Toras	Gaussiano	0	-	-	-	-	-

VI- volume por árvore; DAP- diâmetro na altura do peito; DM- diâmetro médio; GD- grau de dependência espacial.

Para definir o melhor tamanho de pixel e melhor resolução dos mapas, gerou-se mapas com tamanhos de pixel de 3, 5, 10 e 15 m (Figura 15). Os mapas mostram que quanto maior o tamanho dos pixels, menor a área de transição de valores, motivado pela perda de resolução dos mapas. Os mapas com pixel entre 3 e 5 m apresentam melhores resoluções espaciais, sem mudanças bruscas na coloração. As Figuras 16, 17 e 18 apresentam os mapas de todos os atributos de produtividade gerado pela colhedora, e partir disto avaliar como a resolução espacial se comporta de acordo com o tamanho do pixel. Ressalta-se que cada pixel de 3 m representa em média uma árvore, visto que a área real de uma árvore é de 7 m². Como os mapas com pixel de 3 m foram os que possuíram melhor resolução em ambas as áreas e atributos de produtividade, o valor foi definido com tamanho padrão de pixel adotado para as demais espacializações.

Figura 15. Mapa de atributos de colheita interpolados, referentes às áreas experimentais 1,2 e 3 com tamanhos de pixel de 3, 5, 10 e 15 m.

Figura 16. Mapa de produtividade da Área Experimental 1 gerados com pixel de 3 e 5 m.

Figura 17. Mapa de produtividade da Área Experimental 2 gerados com pixel de 3 e 5 m.

Figura 18. Mapa de produtividade da Área Experimental 3 gerados com pixel de 3 e 5 m.

4.1.4. Análise dos dados de produtividade

Com a finalidade de explorar a variância dos dados discrepantes de produtividade, foram gerados histogramas com curva de distribuição normal dos atributos de produtividade da área 2 e 3 e são apresentados nas Figuras 19 e 20. Os dados apresentam uma grande discrepância para valores à direita e à esquerda do centro da curva

de distribuição normal, caracterizando uma distribuição anormal com assimetria. A eliminação de dados discrepantes com base na Tabela 1, reduziu a amplitude dos dados de número de toras, volume por árvore e produtividade, ocasionando a redução considerável dos valores de variância em relação aos dados originais tanto para área 2 quanto para a área 3, diminuindo a assimetria e curtose. Já para os atributos de DAP e comprimento, não houve diferença significativa nos resultados obtidos. Ao total foram excluídos 10618 pontos (45,7% dos pontos) da área 2 e 2911 pontos (60,4% dos pontos) da área 3.

A Tabela 9 apresenta a estatística descritiva dos dados de produtividade coletados nas áreas 2 e 3 após a eliminação de dados discrepantes. Ao contrário da baixa variação de produtividade encontrada nos dados de inventário florestal (CV entre 8,2% a 8,6%), o CV de produtividade é de 31,2% e 27,8% respectivamente para a área 2 e 3. Mas ressalva-se que esta variação era de 60,6 e 64,2 % antes da eliminação de dados discrepante. Não é possível afirmar qual atributo influencia mais na variação da produtividade, visto que os dados de número de toras, diâmetro médio, diâmetro na altura do peito e comprimento apresentam CV semelhantes, variando entre 12,7% a 16,4%.

Comparando a estatística descritiva dos dados sem exclusão e com exclusão de dados discrepantes, nota-se uma diminuição contundente do CV de todos os atributos. O comportamento é motivado pela presença de valores muito baixos e muito acima da média, aumentando consequentemente os valores de variância, assimetria e curtose. Contudo, é evidente que os valores médios de produtividade filtrados aumentaram consideravelmente quando comparados com os não filtrados. Comparando apenas os dados da área 2, da qual há dados de inventário florestal e produtividade gerado pela colhedora para toda a área, os valores de produtividade média eram de $337,64 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ antes da filtragem, enquanto o inventário florestal indicava $364,05 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, uma diferença de 7,3%. Após a filtragem, o novo valor foi de $481,96 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, aumentando a diferença para 32,4%. A discrepância nos valores pode estar relacionada à acurácia da colhedora, indicando que os sensores precisam evoluir para gerar dados mais realistas.

Figura 19. Histograma dos dados de produtividade originais (A) e dos dados remanescentes da exclusão de dados discrepantes da área 2 (B)

Figura 20. Histograma dos dados de produtividade originais (A) e dos dados remanescentes da exclusão de dados discrepantes da área 3 (B)

Tabela 8. Estatística descritiva dos dados de produtividade gerados pela colhedora florestal

Área	Variável	Unidade	n	Média	Desvio	Mínimo	Mediana	Máximo	Amplitude	Assimetria	Curtose	Variância	CV (%)
Área 2	N Toras	n	23235	6	2	1	6	10	9	-0,79	-0,38	4,08	35,9
	DM	cm	23235	10,95	2,90	2,80	11,11	31,74	28,94	0,02	1,40	8,42	26,5
	DAP	cm	23235	14,54	4,29	2,80	14,70	38,60	35,80	-0,05	0,24	18,37	29,5
	Comprimento	m	23235	19,73	7,24	1,50	21,67	49,92	48,42	-0,76	-0,32	52,38	36,7
	Volume por árvore	m ³	23235	0,25	0,15	0,00	0,25	2,13	2,13	0,65	1,84	0,02	60,6
	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	23235	337,64	204,73	1,47	332,80	2840,74	2839,27	0,65	1,84	41914,67	60,6
Área 2 Filtrada	N Toras	n	12617	7	1	1	7	10	9	-0,86	1,00	1,21	16,4
	DM	cm	12617	12,51	1,68	9,50	12,34	20,00	10,50	0,76	0,96	2,83	13,4
	DAP	cm	12617	17,42	2,62	13,60	17,10	28,60	15,00	0,89	0,68	6,88	15,1
	Comprimento	m	12617	23,55	3,64	12,27	24,74	29,70	17,43	-0,85	0,35	13,24	15,5
	Volume por árvore	m ³	12617	0,36	0,11	0,13	0,35	1,03	0,90	1,02	2,02	0,01	31,1
	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	12617	481,96	149,87	172,74	462,82	1375,52	1202,78	1,02	2,02	22462,29	31,1
Área 3	N Toras	n	4819	3	1	1	4	9	8	-0,78	0,23	1,11	31,9
	DM	cm	4819	10,15	2,70	5,90	10,43	54,73	48,83	1,09	14,93	7,31	26,6
	DAP	cm	4819	14,18	4,17	5,90	14,80	57,90	52,00	0,11	2,28	17,42	29,4
	Comprimento	m	4819	19,75	6,45	1,56	22,05	49,99	48,43	-0,62	0,45	41,57	32,7
	Volume por árvore	m ³	4819	0,23	0,15	0,01	0,24	3,35	3,34	2,28	37,78	0,02	64,2
	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	4819	355,90	228,58	9,24	366,21	5070,30	5061,06	2,28	37,78	52247,48	64,2
Área 3 Filtrada	N Toras	n	1908	4	0	2	4	6	4	-1,63	5,22	0,23	12,4
	DM	cm	1908	11,94	1,52	9,50	11,75	19,47	9,97	0,98	1,46	2,31	12,7
	DAP	cm	1908	17,05	2,34	13,60	16,50	28,50	14,90	1,29	2,25	5,48	13,7
	Comprimento	m	1908	22,98	2,78	12,30	23,57	29,64	17,34	-1,47	3,22	7,74	12,1
	Volume por árvore	m ³	1908	0,34	0,09	0,14	0,32	0,87	0,72	1,29	2,72	0,01	27,8
	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	1908	511,63	142,16	219,09	484,02	1314,70	1095,61	1,29	2,72	20208,65	27,8

VI- volume por árvore; DAP- diâmetro na altura do peito; N Toras- número de toras.

As variáveis utilizadas para análise da dependência espacial das áreas 2 e 3, a partir da confecção dos semivariogramas, foram produtividade, volume por árvore, comprimento, diâmetro na altura do peito, diâmetro médio e número de toras. Na Tabela 9 é apresentado os parâmetros do efeito pepita (C_0), patamar (C_1), alcance (A - em metros), soma dos quadrados dos resíduos (RMSE), grau de dependência (GD) e classificação de grau de dependência (classificação GD).

Tabela 9. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de dados de mapeamento de produtividade das áreas 2 e 3.

Área	Dados	Modelo	C_0	C_1	A	RMSE	GD	Classificação GD
Área 2	Produtividade	Gaussiano	18511	10000	443,0	514,000	0,35	Moderado
	VI	Gaussiano	0,01	0,0062	481,1	0,0002	0,38	Forte
	Comprimento	Gaussiano	12,6000	2,9510	567,8	0,211	0,19	Forte
	DAP	Gaussiano	5,998	2,046	372,3	0,077	0,25	Moderado
	DM	Gaussiano	2376	1350	493,3	0,041	0,36	Moderado
	N Toras	Gaussiano	1,15	0,2886	656,0	0,0119	0,20	Forte
Área 3	Produtividade	Gaussiano	17742,000	19245	305,2	590,100	0,52	Moderado
	VI	Exponencial	0,007	0,1642	10000	0,00028	0,96	Fraco
	Comprimento	Exponencial	6,914	0,911	26,63	0,1274	0,12	Forte
	DAP	Exponencial	4,415	506,6	50000	0,1652	0,99	Fraco
	DM	Gaussiano	2,075	0,6269	148,1	0,0327	0,23	Forte
	N Toras	Exponencial	0,2019	0,0329	25,73	0,0037	0,14	Forte

VI- volume por árvore; DAP- diâmetro na altura do peito; DM- diâmetro médio; N Toras- número de toras.

A partir da análise da Tabela 9, cita-se os dados de porcentagem de árvores mortas e observa-se que não foi encontrado efeito pepita puro, diferentemente dos resultados obtidos a partir dos dados puros (Tabela 7) onde todos os atributos da área 3, com exceção da produtividade, não havia apresentado dependência espacial. O modelo teórico que apresentou melhor ajuste para a semivareograma dos atributos foi o gaussiano e exponencial (Apêndice – Figura 34 e 35). Os parâmetros do semivariogramas que foram melhores ajustados e consequentemente apresentaram os menores valores de soma dos quadrados dos resíduos (RMSE) na área 2 foram volume por árvore (0,0002), diâmetro médio (0,041) e diâmetro na altura do peito (0,077), na área 2. Na área 3 os menores valores de RMSE foram de volume por árvore (0,00028), número de toras (0,0037) e diâmetro médio (0,0327). Ao avaliar o alcance dos atributos, apenas os dados comprimento (26,63 m) e número de toras (25,73 m) da área 3 estavam com alcance inferior a 70 m (2 amostras ha^{-1}). Ao comparar as dependências espaciais dos dados puros e dados filtrados, todos os atributos apresentaram melhores dependências espaciais para os dados filtrados.

Como nenhum atributo apresentou efeito pepita puro, todos os mapas foram gerados por meio da interpolação dos dados pelo método da krigagem ordinária. As Figuras 21 e 22 apresentam o comparativo entre os mapas gerados com dados puros e com dados filtrados. Embora a estatística descritiva entre apresentem grandes diferenças, as zonas de transição dos atributos de produtividade permaneceram semelhantes, sendo apenas suavizadas. É possível identificar regiões visualmente similares de volume por árvore na área 2, diâmetro na altura do peito, altura estimada e altura dominante nas manchas ao noroeste e ao sudeste do talhão. Os atributos de produtividade se relacionam com os dados de diâmetro na altura do peito e diâmetro médio. O atributo número de toras não mostra variabilidade, reforçando a exatidão do fracionamento realizado pelo cabeçote.

Os dados de produtividade de madeira feita pelo conjunto de sensores do cabeçote da colhedora florestal permitiram a geração de mapas que expressam a variabilidade espacial da produtividade das áreas estudadas. A

resolução espacial de 3 m se mostrou adequada para a visualização, sendo que a exclusão de dados discrepantes, como apontado por MENEGATTI & MOLIN (2004) para outras culturas, é uma etapa essencial para a melhor espacialização dos dados e geração dos mapas. No entanto, esse tema deve merecer mais estudos para que seja possível consolidar critérios de corte de dados extremos em florestas. O receptor GNSS utilizado demonstrou acurácia abaixo da necessária para o georreferenciamento adequado e que permita a individualização de cada árvore abatida. Esse fato ficou evidente, inclusive não permitindo a visualização das linhas de plantio. A qualidade da informação de posição de cada planta deveria permitir a identificação de falhas, o que é relevante para o pleno entendimento do desempenho da cultura em cada porção da área.

Figura 21. Mapa dos atributos de produtividade da área 2 gerados a partir de dados filtrados.

Figura 22. Mapa dos atributos de produtividade da área 3 gerados a partir de dados filtrados.

4.2. Análise dos dados de inventário florestal

A Tabela 10 apresenta a estatística descritiva dos dados de inventário florestal coletados nas áreas 2 e 3. A produtividade das áreas 2 e 3 variam de 8,2% a 8,6%, indicando uma baixa variação produtiva em cada área. Os baixos valores de produtividade refletem diretamente nos valores de DAP, comprimento e volume por árvore, onde se encontram valores de CV variando entre 2,1% e 8,1%. Quando comparados estes parâmetros com os mesmos das Tabelas 2 e 3, observa-se grandes diferenças, com CV entre 12,5% e 38,9%. Isso em função do método de cálculo do inventário florestal, que utiliza a média das árvores nas parcelas e posteriormente as médias entre parcelas, diluindo dados com alta variabilidade.

Os dados de número de fustes, porcentagem de árvores mortas, porcentagem de falhas, porcentagem de árvores dominadas, porcentagem de árvores bifurcadas e porcentagem de árvores quebradas quando apresentam altos valores de média, diminuem a produtividade de área. Entretanto todos estes atributos apresentaram baixos valores, variando entre 0,2% e 5,9.

Tabela 10. Estatística descritiva dos dados de inventário florestal referente às áreas 2 e 3.

Área	Variável	Unidade	n	Média	Desvio	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose	Variância	CV (%)
Área 2	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	54	364,05	31,16	262,71	364,48	442,34	-0,48	1,61	970,823	8,6
	VI	m ³	54	0,29	0,02	0,24	0,30	0,35	0,19	0,09	0,001	8,1
	Número de Fustes	n	54	1240,89	88,96	1025,62	1250,47	1500,23	-0,07	0,79	7914,71	7,2
	DAP	cm	54	17,97	0,63	16,50	17,97	19,35	0,05	-0,12	0,40	3,5
	Altura Estimada	m	54	28,13	0,81	26,23	28,14	29,66	-0,47	-0,13	0,65	2,9
	Altura Dominante	m	54	31,95	0,66	30,43	31,96	32,92	-0,71	-0,26	0,44	2,1
	PVAR50	m ³	54	30,79	4,68	18,02	30,47	39,04	-0,50	0,35	21,91	15,2
	A Mortas	%	54	0,3	0,8	0,0	0,0	3,8	2,75	7,17	0,64	273,0
	A Falhas	%	54	5,9	5,0	0,0	5,1	21,2	1,39	1,79	25,00	84,9
	A Dominadas	%	54	0,7	1,1	0,0	0,0	4,0	1,36	0,87	1,31	159,5
	A Bifurcadas	%	54	2,4	2,7	0,0	1,9	11,1	1,33	1,84	7,22	112,4
	A Quebradas	%	54	0,6	1,3	0,0	0,0	4,2	1,77	1,89	1,59	193,8
Área 3	Produtividade	m ³ ha ⁻¹	40	277,51	22,84	240,50	274,64	334,13	0,56	-0,12	521,569	8,2
	VI	m ³	40	0,19	0,01	0,16	0,19	0,22	0,44	0,32	0,000	7,3
	Número de Fustes	n	40	1484,39	75,78	1300,00	1496,68	1702,34	-0,18	1,75	5743,19	5,1
	DAP	cm	40	15,42	0,54	13,37	15,47	16,54	-1,32	4,63	0,29	3,5
	Altura Estimada	m	40	24,90	0,94	21,53	24,92	26,74	-1,11	3,35	0,89	3,8
	Altura Dominante	m	40	29,12	1,13	26,77	29,10	32,90	0,75	2,24	1,28	3,9
	PVAR50	m ³	40	28,45	5,73	10,16	29,68	35,49	-1,39	1,98	32,83	20,1
	A Mortas	%	40	0,2	0,7	0,0	0,0	3,3	3,50	12,69	0,44	323,8
	A Falhas	%	40	3,7	3,3	0,0	3,3	16,4	1,68	4,21	11,06	89,4
	A Dominadas	%	40	1,8	4,3	0,0	0,0	21,9	3,58	13,99	18,11	241,2
	A Bifurcadas	%	40	0,4	0,8	0,0	0,0	3,3	1,68	2,14	0,68	184,3
	A Quebradas	%	40	0,3	0,6	0,0	0,0	1,7	1,78	1,23	0,40	219,9

VI- volume individual; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Mortas- porcentagem de árvores mortas; A Falhas- porcentagem de falhas; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; A Quebradas- porcentagem de árvores quebradas.

As variáveis utilizadas para análise da dependência espacial nas áreas 2 e 3, a partir da confecção dos semivariogramas, foram produtividade, volume por árvore, número de fustes, diâmetro na altura do peito, altura estimada, altura dominante, índice de uniformidade, porcentagem de árvores mortas, porcentagem de falhas, porcentagem de árvores dominadas, porcentagem de árvores bifurcadas e porcentagem de árvores quebradas. Na Tabela 11 é apresentado os parâmetros do efeito pepita (C_0), patamar (C_1), alcance (A - em metros), soma dos quadrados dos resíduos (RMSE), grau de dependência (GD) e classificação de grau de dependência (classificação GD).

Tabela 11. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de dados de inventário florestal das áreas 2 e 3.

Área	Dados	Modelo	C_0	C_1	A	RMSE	GD	Classificação GD
Área 2	Produtividade	Gaussiano	473,90	590,80	285,3	141,9	0,55	Moderado
	VI	Gaussiano	0,0003	0,0002	277,9	0,00004	0,40	Moderado
	Número de Fustes	Gaussiano	6676,6000	4100,5000	423,0	618,0	0,38	Moderado
	DAP	Gaussiano	0,2091	0,178	218,5	0,029	0,46	Moderado
	Altura Estimada	Gaussiano	0,5352	0,1491	286,9	0,079	0,22	Forte
	Altura Dominante	Gaussiano	0,3117	0,15	315,5	0,0613	0,32	Moderado
	PVAR50	Gaussiano	16,79	8,68	150,3	2,7620	0,34	Moderado
	A Mortas	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	A Falhas	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	A Dominadas	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	A Bifurcadas	Gaussiano	6,10	3,935	669,2	1,2020	0,39	Moderado
	A Quebradas	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
Área 3	Produtividade	Gaussiano	376,6	10000	2509,2	153,300	0,96	Fraco
	VI	Gaussiano	0,0002	0,0001	412,0	0,0001	0,33	Moderado
	Número de Fustes	Gaussiano	3535,6000	1876,5000	71,9	868,600	0,35	Moderado
	DAP	Gaussiano	0,1976	107,6	10000	0,0661	1,00	Fraco
	Altura Estimada	Gaussiano	0,6134	273,7	10000	0,286	1,00	Fraco
	Altura Dominante	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	PVAR50	Gaussiano	25,71	7799,4	10000	7,043	1,00	Fraco
	A Mortas	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	A Falhas	Gaussiano	3,31	7,948	55,89	1,732	0,71	Moderado
	A Dominadas	Gaussiano	13,47	46427	25930	3,532	1,00	Fraco
	A Bifurcadas	Gaussiano	0	-	-	-	-	-
	A Quebradas	Gaussiano	0,001	0,425	50,95	0,125	1,00	Fraco

VI- volume por árvore; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Mortas- porcentagem de árvores mortas; A Falhas- porcentagem de falhas; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; A Quebradas- porcentagem de árvores quebradas; GD- grau de dependência espacial.

Analisando a Tabela 11, cita-se os dados de porcentagem de árvores mortas, porcentagem de falhas, porcentagem de árvores dominadas e porcentagem de árvores quebradas da área 2 e os dados de altura dominante, porcentagem de árvores mortas e porcentagem de árvores bifurcadas na área 3, apresentaram efeito pepita puro. O modelo teórico que apresentou melhor ajuste para a semivariograma dos atributos foi o gaussiano (Apêndice – Figura 36 e 37), já os parâmetros do semivariogramas que foram melhores ajustados e consequentemente apresentaram os menores valores de soma dos quadrados dos resíduos (RMSE) são volume por árvore (0,00004), diâmetro na altura do peito (0,029) e altura estimada (0,079), na área 2. Na área 3 os menores valores de RMSE foram de volume por árvore (0,0001), diâmetro na altura do peito (0,0661) e porcentagem de árvores mortas (0,125). Ao avaliar o alcance dos

atributos, apenas os dados de porcentagem de árvores quebradas (50,95 m) da área 3 estavam com alcance inferior a 70 m (2 amostras ha^{-1}).

Os mapas foram gerados por meio da interpolação dos dados pelo método da krigagem ordinária e são apresentados nas Figuras 23 e 24. A partir dos mapas, identificou-se áreas similares visualmente dos atributos da área 2 de volume por árvore, diâmetro na altura do peito, altura estimada e altura dominante nas manchas ao noroeste e ao sudeste do talhão. Os atributos de produtividade, número de fustes, porcentagem de árvores bifurcas, porcentagem de falhas e porcentagem de árvores mortas possuem semelhança nas manchas centrais, ao sudeste e ao noroeste dos talhões. Na área 3 as manchas dos atributos de produtividade, diâmetro na altura do peito, índice de uniformidade e porcentagem de árvores dominadas se assemelham em todo o talhão.

Figura 23. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 2.

Figura 24. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 3.

As Tabelas 12 e 13 foram geradas a partir dos resultados da correlação de Pearson (r) que apresentaram significância de 1 e 5% (Apêndice – Tabela 18 e 19) e resultados da regressão linear (R^2) (Apêndice – Tabela 20 e 21). Avaliando as correlações e regressão dados, os atributos de inventário de volume por árvore ($r = 0,7333$; $R^2 = 0,5378$; $f = 24070,18$), produtividade ($r = 0,6801$; $R^2 = 0,4625$; $f = 17804,10$) e diâmetro na altura do peito ($r = 0,6442$; $R^2 = 0,4151$; $f = 14680,23$) na área 2. Na área 3 a maior correlação encontrada foi com volume por árvore ($r = 0,6008$; $R^2 = 0,361$; $f = 1717,02$).

Os resultados mostram que mesmo com a menor resolução de dados do inventário florestal, eles ainda são correlacionáveis aos dados de alta densidade da colhedora florestal. Atributos qualitativos de porcentagem de falhas, porcentagem de árvores mortas, bifurcadas e quebradas, mostram que o plantio possui bons resultados nos indicadores qualitativos, não influenciando na produtividade.

Tabela 12. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R^2) entre os dados de inventário e produtividade da área experimental 2.

Dependente de Produtividade da Colhedora	Correlação de Pearson	R^2
Altura Dominante	0,3722*	0,0013
Altura Estimada	0,223*	0,1385
A Bifurcadas	-0,1219*	0,0147
DAP IN	0,101*	0,0102
A Dominadas	-0,1*	0,0111
A Falhas	-0,2569*	0,066
A Mortas	0,2686*	0,0724
N Fustes	0,3453*	0,1196
PVAR50	0,1458*	0,0213
Produtividade IN	-0,0361**	0,0013
VI IN	0,6008*	0,361

VI- volume por árvore; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; *, ** correlação de Pearson (r) com significância de 1 e 5%.

Tabela 13. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R^2) entre os dados de inventário e produtividade da área experimental 3.

Dependente de Produtividade da Colhedora	Correlação de Pearson	R^2
Altura Dominante	0,5139*	0,3165
Altura Estimada	-0,5083*	0,2641
A Bifurcadas	0,1275*	0,0162
DAP IN	0,6442*	0,4151
A Dominadas	0,1585*	0,0251
A Falhas	0,2159*	0,0466
N Fustes	-0,1707*	0,0291
PVAR50	-0,5328*	0,2839
Produtividade IN	0,6801*	0,4625
VI IN	0,7333*	0,5378

VI- volume por árvore; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; *, ** correlação de Pearson (r) com significância de 1 e 5%.

Comparando os mapas de produtividade e os dados de inventário que possuíram correlação de Pearson maiores que 0,5 (Figuras 25 e 26), a relação visível entre as manchas e transição confirmam os resultados encontrados nas análises de correlação e regressão. Na área 2, as manchas de baixa e alta produtividade ao norte e ao sudeste do talhão se comparam com as manchas dos mapas de inventário. A área 3 possui apenas uma correlação, justificado principalmente pelo pequeno tamanho do talhão.

Figura 25. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 2.

Figura 26. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 3.

É evidente que o mapa de produtividade gerado pela colhedora florestal possui informações mais detalhadas sobre as áreas de transição de produtividade quando comparadas a de inventário. Tal fato é motivado pela baixa densidade de dados utilizados pelo inventário florestal. Isso é ainda mais contundente em áreas pequenas, como na área 3, onde o único atributo dendrométrico que possuiu correção foi o volume por árvore, sendo que visualmente, as manchas de transição ainda sim são diferentes. Com tudo, para a aplicação da AP são necessários dados de alta resolução, o que só se tornará viável a partir do uso do mapa de produtividade gerado pelas colhedoras florestais.

4.3. Variabilidades dos teores dos atributos químicos e físicos do solo

A partir da análise da estatística descritiva dos atributos de solo (Tabela 14), nota-se a alta variabilidade do P, com valores de CV entre 62,8% e 119,0%. A MO apresentou média variabilidade, com valores entre 20,6 e 12,8% e, para o pH a variabilidade foi média, com CV entre 10,4% e 3,9%. Os teores de K, Ca, Mg e Al apresentaram variabilidade alta, variando entre 33,2 e 79,9%. Segundo REIS *et al.* (2018), as variações dos atributos químicos do solo podem ser causadas por manejos silviculturais irregulares ou alocação de clones não específicos para a área. De maneira geral, é retratada alta heterogeneidade dos atributos químicos nas áreas avaliadas.

Observa-se que os teores médios encontrados para o P (6,83 e 9,38 mg dm^{-3}), MO (0,91 e 3,25 g dm^{-3}), K (0,08 e 1,24 mmolc dm^{-3}), pH (4,4, e 3,96 mmolc dm^{-3}) Ca (1,42, e 0,74 mmolc dm^{-3}) e Mg (0,23 e 0,60 mmolc dm^{-3}) respectivamente, apresentaram baixos teores. Estes valores estão abaixo das faixas de teores recomendados por RAIJ (2011) para culturas agrícolas e por GONÇALVES *et al.* (2002) para a cultura do eucalipto. No entanto, os teores de fósforo e K da área 2 estão de acordo com SILVEIRA *et al.* (2001), que definem valores médios para solos arenosos cultivados com eucalipto, onde teores de fósforo (5,6 mg dm^{-3}), MO (12,00 g dm^{-3}), pH (3,8), K (0,4 mmolc dm^{-3}), Ca (2,8 mmolc dm^{-3}) e Mg (0,9 mmolc dm^{-3}) são médios ou bons para o desenvolvimento da espécie. Os eucaliptos clonais são considerados espécies de pouco necessidade de nutrientes, quando comparados à maioria das culturas agrícolas ou em relação as espécies arbóreas de rápido crescimento, como o pinus (RODRIGUES *et al.*, 2016). Mas isso não descarta a necessidade de corrigir a fertilidade do solo quando os níveis dos nutrientes estiveram abaixo do adequado para a espécie (GUIMARÃES *et al.*, 2015).

Tabela 14. Estatística descritiva dos dados advindos das análises laboratoriais das amostras de solo.

Área	Dados	Unidade	n	Média	Desvio	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose	Variância	CV (%)
Área 2	P	mgdm ⁻³	54	6,83	4,29	2,49	5,22	20,58	1,70	2,58	18,37	62,8
	K	cmolcdm ⁻³	54	0,08	0,03	0,04	0,07	0,19	1,43	2,88	0,00	37,6
	Ca	cmolcdm ⁻³	54	1,45	1,16	0,60	1,20	8,64	4,82	28,61	1,34	79,9
	Mg	cmolcdm ⁻³	54	0,23	0,08	0,09	0,22	0,50	1,03	1,93	0,01	33,2
	H+Al	cmolcdm ⁻³	54	2,45	0,67	0,68	2,51	4,75	0,44	2,30	0,45	27,4
	MO	g dm ⁻³	54	0,91	0,19	0,47	0,88	1,49	0,43	1,20	0,03	20,6
	pH	CaCl ₂	54	4,40	0,46	3,88	4,31	6,45	1,95	6,21	0,21	10,4
	SMP	-	54	6,55	0,29	5,88	6,49	7,72	1,27	4,22	0,08	4,4
	Al	cmolcdm ⁻³	54	0,33	0,25	-0,02	0,31	1,02	0,83	0,32	0,06	75,2
	SB	mmolcdm ⁻³	54	17,62	11,67	8,08	14,91	88,37	4,49	25,79	136,08	66,2
	CTC	mmolcdm ⁻³	54	42,11	10,11	26,79	39,56	95,21	2,98	13,78	102,13	24,0
	V	%	54	40,35	13,94	19,08	37,43	92,82	1,25	2,41	194,34	34,6
	S	mgdm ⁻³	54	5,13	1,34	3,90	4,79	13,03	4,22	22,82	1,80	26,2
	B	mgdm ⁻³	54	0,29	0,04	0,17	0,30	0,38	-0,79	1,18	0,00	14,4
	Cu	mgdm ⁻³	54	0,54	0,69	0,06	0,33	3,88	2,96	10,59	0,48	127,9
	Fe	mgdm ⁻³	54	47,91	15,91	9,72	45,50	114,75	1,36	5,81	253,09	33,2
	Mn	mgdm ⁻³	54	4,18	2,47	1,08	3,41	14,16	1,55	3,58	6,12	59,2
	Zn	mgdm ⁻³	54	0,55	0,74	0,05	0,35	4,99	4,23	23,81	0,55	134,8
	Areia Grossa	gKg ⁻¹	54	358,80	107,52	139,00	365,00	632,00	0,10	-0,27	11560,84	30,0
	Areia Fina	gKg ⁻¹	54	556,91	109,13	291,00	549,50	769,00	0,03	-0,31	11909,75	19,6
	Areia Total	gKg ⁻¹	54	915,63	13,79	884,00	915,50	955,00	0,37	0,49	190,28	1,5
	Argila	gKg ⁻¹	54	82,30	13,95	38,00	84,00	109,00	-0,82	1,11	194,48	16,9
	Silte	gKg ⁻¹	54	2,07	4,08	0,00	0,00	17,00	2,30	4,80	16,64	196,7
	Altimetria	m	20900	579,74	10,63	532,24	581,61	595,00	-1,09	1,54	112,91	1,8

Área 3	P	mgdm ⁻³	40	9,38	11,16	3,48	6,12	57,17	3,70	13,64	124,58	119,0
	K	cmolcdm ⁻³	40	0,24	0,10	0,12	0,20	0,51	1,11	0,44	0,01	42,2
	Ca	cmolcdm ⁻³	40	0,74	0,44	0,22	0,67	1,79	0,79	-0,32	0,19	58,9
	Mg	cmolcdm ⁻³	40	0,60	0,26	0,25	0,52	1,23	0,90	-0,07	0,07	43,3
	H+Al	cmolcdm ⁻³	40	10,96	2,40	6,31	10,63	18,09	0,53	0,60	5,78	21,9
	MO	g dm ⁻³	40	3,25	0,42	2,43	3,23	4,20	0,03	-0,11	0,17	12,8
	pH	CaCl ₂	40	3,96	0,15	3,65	3,91	4,40	0,92	1,54	0,02	3,9
	SMP	-	40	5,04	0,21	4,54	5,05	5,54	0,12	0,04	0,04	4,1
	Al	cmolcdm ⁻³	40	1,82	0,62	0,62	1,85	3,53	0,26	0,42	0,38	34,1
	SB	mmolcdm ⁻³	40	15,77	6,54	6,26	14,83	29,03	0,47	-0,95	42,81	41,5
	CTC	mmolcdm ⁻³	40	125,38	23,77	91,06	122,06	191,70	0,70	0,27	565,12	19,0
	V	%	40	12,93	6,00	5,37	11,61	30,71	1,07	0,78	36,03	46,4
	S	mgdm ⁻³	40	8,34	5,88	2,82	7,12	37,34	3,23	14,79	34,59	70,5
	B	mgdm ⁻³	40	0,69	0,10	0,54	0,70	0,92	0,26	-0,66	0,01	14,1
	Cu	mgdm ⁻³	40	1,44	1,27	0,29	1,07	6,87	2,56	8,44	1,60	87,6
	Fe	mgdm ⁻³	40	71,08	14,27	40,60	70,62	102,37	0,14	-0,37	203,70	20,1
	Mn	mgdm ⁻³	40	1,56	1,77	0,09	1,09	8,10	2,58	6,79	3,14	113,7
	Zn	mgdm ⁻³	40	0,85	0,82	0,15	0,55	3,53	1,86	3,49	0,68	96,7
	Areia Grossa	gKg ⁻¹	40	158,25	95,72	34,00	131,00	415,00	1,01	0,32	9161,78	60,5
	Areia Fina	gKg ⁻¹	40	157,08	66,93	48,00	139,50	306,00	0,68	-0,27	4479,81	42,6
	Areia Total	gKg ⁻¹	40	315,43	155,28	82,00	274,50	694,00	0,68	-0,51	24112,87	49,2
	Argila	gKg ⁻¹	40	514,98	83,02	278,00	545,00	609,00	-1,10	0,31	6892,13	16,1
	Silte	gKg ⁻¹	40	169,60	85,68	28,00	166,50	351,00	0,34	-0,68	7340,86	50,5
	Altimetria	m	20154	686,71	10,69	664,95	686,07	709,81	0,22	-0,82	114,37	1,6

P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; H⁺/Al³⁺- potencial hidrogeniônico; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SMP- Acidez trocável; Al alumínio; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; S- soma de bases; B- boro; Cu- cobre; Fe- ferro; Mn- manganês; Zn- zinco;

Para a análise da dependência espacial, os semivariogramas foram obtidos para as variáveis P, K, pH, M.O., SB, CTC, V, Mg, Ca, argila, areia total e silte na área 2 e área. Nas Tabela 15 é apresentado os parâmetros do efeito pepita (C_0), patamar (C_1), alcance, soma dos quadrados dos resíduos (RMSE), grau de dependência (GD) e classificação de grau de dependência (classificação GD).

Tabela 15. Parâmetros geoestatísticos dos modelos ajustados dos semivariogramas de P, K, pH, M.O., SB, CTC, V, Mg, Ca, argila, areia total e silte da área 2 e 3.

Área	Dados	Modelo	C_0	C_1	A (m)	RMSE	GD	Classificação GD
Área 2	P	Gaussiano	13,99	14,59	358,5	2,5620	0,51	Moderado
	K	Gaussiano	0,00032	0,00034	81,3	0,0001	0,52	Moderado
	Ca	Gaussiano	0,5767	1,9690	531,8	0,2730	0,77	Fraco
	Mg	Gaussiano	0,0042	0,0022	407,3	0,0008	0,34	Moderado
	MO	Gaussiano	0,0165	0,0201	110,1	0,0034	0,55	Moderado
	pH	Gaussiano	0,1482	0,1448	470,3	0,0230	0,49	Moderado
	SB	Gaussiano	39,04	173,50	384,4	33,5800	0,82	Fraco
	CTC	Gaussiano	52,33	98,34	416,8	16,33	0,65	Moderado
	V	Gaussiano	148,50	61,84	293,8	23,8500	0,29	Moderado
	Argila	Gaussiano	102,8	321,4	615,9	18,2600	0,76	Fraco
	Areia Total	Gaussiano	120,40	120,1	311,0	22,7500	0,50	Moderado
	Silte	Gaussiano	3,593	18,750	351,4	2,4660	0,84	Fraco
Área 3	Altimetria	Gaussiano	0,00	-	-	-	-	-
	P	Gaussiano	0,00	-	-	-	-	-
	K	Gaussiano	0,0041	0,0096	259,9	0,001	0,70	Moderado
	Ca	Gaussiano	0,1497	0,0923	326,7	0,024	0,38	Fraco
	Mg	Gaussiano	0,0367	0,0546	248,9	0,008	0,60	Moderado
	MO	Gaussiano	0,0001	0,1746	51,48	0,054	1,00	Fraco
	pH	Exponencial	0,0095	0,4906	10000	0,005	0,98	Fraco
	SB	Gaussiano	30,54	20,47	196,7	4,342	0,40	Moderado
	CTC	Gaussiano	284,5	1058,8	496,5	58,720	0,79	Fraco
	V	Gaussiano	25,38	17,21	229,4	5,069	0,40	Moderado
	Argila	Gaussiano	1490,3	10000	245,7	884,200	0,87	Fraco
	Areia Total	Gaussiano	2990,2	50000	317,6	2434,200	0,94	Fraco
	Silte	Gaussiano	462,2	10000,000	256,9	631,500	0,96	Fraco
	Altimetria	Gaussiano	0	-	-	-	-	-

P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; GD- grau de dependência espacial.

Com base na Tabela 15, verifica-se que o P da área 3 e a altimetria da área 2 e 3 apresentações efeito pepita puro. O modelo teórico que apresentou melhor ajuste para a semivareograma dos atributos foram o gaussiano e o exponencial (Apêndice – Figura 38 e 39). Os parâmetros do semivariogramas que foram melhor ajustados e consequentemente apresentaram os menores valores de soma dos quadrados dos resíduos (RMSE) são K (0,0001), Mg

(0,0008) e M.O. (0,0034), na área 2 e na área 3 foram os dados de Ca (0,38), SB (0,4) e V (0,40). Avaliando o alcance dos atributos, apenas M.O. (51,48) estavam com alcance inferior a 70 m, valor este necessário para a modelagem dos semivariogramas e para possuir o tamanho da grade amostral ideal (2 amostras ha^{-1}). Avaliando grau de dependência espacial, todos os atributos da área um e dois possuíram majoritariamente grade de dependência moderado, com exceção do Ca, argila e silte na área 2 e M.O., pH, argila, areia total e silte na área 3.

Foram confeccionados mapas por meio da interpolação dos dados pelo método da krigagem ordinária e são apresentados nas Figuras 27 e 28. Em relação aos resultados, verifica-se um arranjo de distribuição espacial dos atributos bem definidos nas áreas avaliadas, identificando-se zonas homogêneas e distintas para a maioria dos atributos estudados. A área 2 possuem grande semelhança ao norte onde apresentam os menores valores de concentração de nutriente e ao sudeste os maiores valores. A argila se assemelha inversamente proporcional aos demais dados e a altimetria mostra que a área é plana, sem altas correlações visuais com os demais atributos. Na área 3, novamente se encontra relações visuais entre os mapas entre os dados de CTC, argila e silte de maneira diretamente proporcional, inversamente proporcional tem-se os mapas de areia total e altimetria, sendo todos esses atributos com manchas semelhantes na extremidade norte. Quando se compara regiões centrais do talhão, os atributos de K, SB, V, Mg, Ca altimetria e se equiparam.

Figura 27. Mapa dos atributos de solo da Área Experimental 2.

Figura 28. Mapa dos atributos de solo da Área Experimental 3.

As Tabelas 16 e 17 apresentam os resultados da matriz de correlação linear (Apêndice – Tabela 18 e 19) e regressão linear (Apêndice – Tabela 20 e 21) entre os atributos de produtividade e solo. Avaliando os resultados, observa-se alta correção nos atributos de produtividade da colhedora com SB ($r = 0,8105$; $R^2=0,6569$; $f= 39611,05$), argila ($r = -0,789$; $R^2= 0,6237$; $f= 34290,72$), Ca ($r = -0,7890$; $R^2= 0,6101$; $f= 32373,07$) e areia total ($r=0,6769$; $R^2= 0,4581$; $f= 17491,76$) na área 2. Na área 3 a principal correlação foi Ca ($r = 0,5933$; $R^2=0,352$; $f= 1651,17$). Os resultados estão de acordo aos encontrados por GAVA (2005), NOVAIS *et al.* (1986) e. STAPE (2002), citando que os atributos Ca, K, Mg, P argila e areia estão correlacionadas à produtividade e aos fatores de retenção hídrica do solo, precipitação, manejo silvicultura correto e assertiva alocação de clones. A correlação com altimetria também é encontrada na área 2 ($r = -0,5083$; $R^2= 0,2583$; $f= 7206,01$), sendo ela uma correlação inversa, onde menores declividades possuíram maiores produtividades. Tal cenário foi encontrado por ORTIZ *et al.* (2006) onde é justificado pela maior retenção hídrica de área com menores declividades. Nas Figuras 29 e 30, são apresentados os mapas de produtividade que possuíram correlação de Pearson maiores que 0,5 com os dados de solo, mostrando as semelhanças visuais entre as manchas de transição entre os atributos.

Tabela 16. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R^2) entre os dados solo e produtividade da área experimental 2.

Dependente de Produtividade CO	Correlação de Pearson	Equação	R^2
Altimetria	0,5626*	-1,6145x + 1412	0,2583
Areia Total	0,6769*	3,4639x - 2692,3	0,4581
Argila	-0,7897*	-3,6702x + 782,64	0,6237
Ca	0,7811*	207,24x + 178,57	0,6101
CTC	0,2848*	4,1622x + 300,8	0,0811
K	0,2653*	591,12x + 428,43	0,0704
Mg	0,6485*	1056,6x + 232,4	0,4206
MO	-0,1214*	-46,729x + 518,85	0,0147
pH	0,5262*	172,48x - 282,2	0,2769
P	0,0906*	2,7125x + 457,52	0,0082
SB	0,8105*	16,028x + 196,12	0,6569
Silte	0,6477*	11,095x + 456,6	0,4195
V	0,5364*	4,8108x + 282,37	0,2877

CO – Colhedora; P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; GD- grau de dependência espacial.

Tabela 17. Resultados da correlação de Pearson (r) e da regressão linear (R^2) entre os dados solo e produtividade da área experimental 3.

Dependente de Produtividade CO	Correlação de Pearson	Equação	R^2	p-valor
Argila	-0,0366**	-0,1944x + 464,4	0.0429	<0,0001
Altimetria	0,084*	0,6949x - 117,71	0.0505	<0,0001
Areia Total	-0,2072*	0,0322x + 347,57	0.0071	<0,0001
Ca	0,5933*	392,03x + 131,34	0.352	<0,0001
CTC	-0,0204ns	-	-	0.2618
K	-0,0262ns	-	-	0.1483
Mg	0,1442*	33,38x + 336,64	0.0208	<0,0001
MO	0,0853*	8,6027x + 327,78	0.0073	<0,0001
pH	0,0861*	75,301x + 62,203	0.0074	<0,0001
P	-0,0715*	-0,7383x + 361,39	0.0051	<0,0001
SB	0,215*	2,7422x + 318,48	0.0462	<0,0001
Silte	0,1613*	0,1106x + 334,5	0.026	<0,0001
V	0,2825*	6,4613x + 288,72	0.0798	<0,0001

CO – Colhedora; P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; GD- grau de dependência espacial.

Figura 29. Mapa de produtividade e mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 2 que apresentaram alta correlação linear.

Figura 30. Mapa dos atributos de inventário florestal da área experimental 3. H Dominante- Altura Dominante; H Estimada – Altura Estimada

5. CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida para a geração de mapas de produtividade a partir dos dados coletados pela colhedora florestal mostrou-se adequada e permite identificar áreas com variabilidade de produtividade. Os mapas de melhor resolução espacial foram gerados a partir de pixels de 3 m.. A exclusão de dados discrepantes mostrou-se eficaz para a realçar área de transição de produtividade. O receptor GNSS utilizado demonstrou não ser adequado, indicando a necessidade de redução do erro de posicionamento para permitir a individualização de cada árvore abatida e a consequente identificação de falhas. Com uma melhor acurácia, análises de dominância e falhas por linhas poderão ser realizadas, entretanto o bloqueio da penetração do sinal de GNSS causado pelas copas das árvores ainda pode ser um fator limitante.

Ao confrontar os dados obtidos pela colhedora, em alta resolução espacial, com dados de inventários florestais, observa-se que as produtividades da colhedora (m^3ha^{-1}) estão correlacionados aos atributos volume por árvore, diâmetro na altura do peito e diâmetro médio do inventário florestal, com correlação de até 0,73 para atributos de volume individual. Entretanto, dados qualitativos não apresentaram altos valores de correlação com os dados de produtividade.

Faz-se necessário utilizar dados de alta resolução para a aplicação de práticas de AP, o que pode ser atingido quando se utiliza o mapa de produtividade de colhedoras florestais, com alta resolução de dados. Tal diferença fica evidente ao se comparar os mapas da variabilidade da produtividade de madeira obtida por este método e por meio do inventário florestal.

Na análise de possíveis causadores da variabilidade espacial da produção de madeira, com coeficiente de variação de produtividade (m^3ha^{-1}) de 31,1% para a área 2, que dispunha do maior conjunto de dados, observou-se correlação considerável para SB, argila, Ca, areia total e altimetria, apontando para fatores perenes, relacionados à textura e outros gerenciáveis, por meio de correções.

REFERÊNCIAS

- EVERY, T.E.; BURKHART, H.E. Forest measurements. 3rd ed. New York: McGrawHill, 1983. 331p.
- BARBOSA, C. E. M.; FERRARI, S.; CARVALHO, M. P.; PICOLI, P. R. F.; CAVALLINI, M. C.; BENETT, C. G. S.; et al. Relationship between pine wood yield and physical and chemical traits of a Brazilian cerrado oxisoil. *Revista Árvore*, v. 36, p. 25–35, 2012.
- BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N. F. & NOVAIS, R. F., eds. *Relação solo-eucalipto*. Viçosa-MG: Ed. Folha de Viçosa, p. 99-186, 1990.
- BALASTREIRE, L. A. Agricultura de precisão / Luiz Antonio Balastreire, -- Piracicaba: L. A. Balastreire, 1998.
- BASSANEZI, R. B.; MONTESINO, L.H.; GASPAROTO, M.C.G.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. Yield
- BENEDETTI, V. Precisamos fazer o dever de casa antes da silvicultura de precisão. *Addubare*, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 8, jul./dez. 2012. Disponível em: . Acesso em: 20 jan. 2021
- BLACKMORE, B.S.; MARSHALL, C.J.; Yield mapping; errors and algorithms. In: *International Conference On Precision Agriculture*, Minneapolis, Proceedings, Madison, WI, p.403-415, 1996.
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, v.44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- BRODBECK, C.; FULTON, J.; SHAW, J.; MCDONALD, T.; RODEKOH, D.; Timber mapping for site-specific forest management. Paper presented at the ASABE Annual International Meeting, Minneapolis, Minnesota, USA. Disponível em: <<http://www.legal-ethics-courses.bece.auburn.edu/files/file1049.pdf>>; Acesso em: 22 mar. 2020.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, L. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa, soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAMPOS, O. J. Cubagem De Árvores. 2014. 87 F. Dissertação. (Mestrado Profissional Em Matemática), Florianópolis, Sc, 2014.
- CONFLOR. O que é inventário florestal? Disponível em: <<http://www.conflor.com.br/index.php/faq/54-o-que-e-inventario-florestal-.html>>. Acesso em: 25 out. 2019.
- DE BARROS, B. S. X. 2013. “ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE EUCALIPTO ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITES NA REGIÃO DE BOTUCATU/SP.”
- FAO. 2020. REFORMING CHINA’S HEALTHCARE SYSTEM MAIN REPORT.
- FERNANDES, H. C.; H. C.; BURLA, E. R.; LEITE, E. S.; MINETTE, L. J.; Avaliação técnica e econômica de um “Harvester” em diferentes condições de terreno e produtividade da Floresta. *Sci. For*, v. 41, n. 97, p. 145-151, 2013.
- GAVA, J.L. Relações entre atributos do solo e qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* para produção de celulose. 2005. 55p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura —Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- GUIMARÃES, C.C.; FLORIANO, E.P.; VIEIRA, F.C.B. Limitações químicas ao crescimento inicial de *Eucalyptus saligna* em solos arenosos do Pampa Gaúcho: estudo de caso. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.45, n.7, p.1183-1190, 2015.

- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J. L. Manejo de resíduos vegetais e preparo do solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Eds.). Conservação e cultivo de solos para plantações florestais. Piracicaba: IPEF, 2002. 498 p.
- GONÇALVES, J.L.M. ; STAPE, J.L. ; LACLAU, J-P.; SMETHURST, P; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantation. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 193, p. 45–61, 2004.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R.; Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/boletim-tecnico-agricultura-de-precisao-2013.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2020.
- GRESPLAN, S. L. Produção e eficiência nutricional de clones de eucalipto no norte do Espírito Santo e suas relações com características do solo. 1996. 81 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1997.
- HAKAMADA, RODRIGO EIJI. 2012. “Universidade De São Paulo Escola Superior De Agricultura ‘Luiz De Queiroz’ .Uso Do Inventário Florestal Como Ferramenta De Monitoramento Da Qualidade Silvicultural Em Povoamentos Clonais De Eucalyptus. Piracicaba,Brasil.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, J.; COLLINS, J. GPS:Teory and Practice. 3rd ed. New York:s.l.: 1994. s.n.
- IBÁ. 2020. “Brazilian tree industry annual report - base year 2019.” Associação brasileira de árvores: 160. <HTTP://ABPA-BR.ORG/RELATORIOS/>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS; Relatório de atividade 2020. Disponível em: <<https://conteudo.ibflorestas.org.br/relatorio-de-atividades-2020>>; Acesso em 21/10/2020
- KERRY, R.; OLIVER, M.A. Average variograms to guide soil sampling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.5, p.307-325, 2004.
- LYLE, G.; BRYAN, B. A.; OSTENDORF, B.; Post-processing methods to eliminate erroneous grain yield measurements: review and directions for future development. *Precision Agriculture*, v. 15, n. 4, p. 377–402, 2014.
- MAEDA, SHIZUO; et al. 2014. “Agricultura de precisão para culturas perenes e semi-perenes | 467 silviculturas de precisão.” *Agricultura de precisão resultados de um novo olhar*: 11. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/108756/1/2014-s.maeda-agriculturaprecisao-silvicultura.pdf>>; Acesso em 19/09/2021
- MELLO, J. M; BATISTA J.L.F.; OLIVEIRA, M. S.; BATISTA, J. L. F., JUSTINIANO JÚNIOR, P. R.; KANEGAE JÚNIOR, H. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. *Floresta*, Curitiba, PR, V. 36, N. 2, mai. /ago. 2006.
- MENEGATI, L. A. A.; MOLIN, J. P.; Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.367-374, 2003.
- MENEGATI, L. A. A.; MOLIN, J. P.; Algoritmo para redução de erros em mapas de produtividade para agricultura de precisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, n.1, p.5-10, 2004. Minasny, B.; Mcbratney, A. B.; Whelan, B. M. (2006) *Vesper version 1.6*. Sidney: Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW.
- Miranda, A. C. C.; Veríssimo, A. M.; Ceolin, A. C. (2017) *Revista Gestão.Org*, v. 15, Edição Especial, 2017. p. 129-137 ISSN 1679-1827.

- MOLIN, J.P.; Geração interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. Agricultura de precisão. p.237-258, 2000.
- MOLIN, J. P., do AMARAL, L. R., & COLAÇO, A. Agricultura de precisão. Oficina de Textos. (2015).
- MONTANARI, R., L. H. PANACHUKI, E, LOVERA, H. A. CORREA, A. R., OLIVEIRA, I. S., QUEIROZ, AND P. K. TOMAZ. 2015. “variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono cerrado-pantanal, ms.” Revista brasileira de ciências do solo 39(2): 385–96.
- NILSSON, U.; ALLEN, H.L. Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 175, p. 367-377, 2003.
- NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento e desenvolvimento de Eucalyptus spp.: Níveis críticos de implantação e de manutenção. Viçosa-MG: Revista Árvore, v. 10, n. 1, p. 105-111, 1986.
- OLIVEIRA, J.; VISSER, R.; Development of forest-yield maps generated from Global Navigation Satellite System (GNSS)-enabled harvester StanForD files: preliminary concepts. New Zealand Journal of Forestry Science, v.46, n. 3, p. 1-10, 2016.
- ORTIZ, J. L.; VETTORAZZI, C. A.; COUTO, H. T. Z.; GONCALVES, J. L. M.; Spatial relationship between productive potential of eucalyptus and attributes of soil and relief. Scientia Forestalis, v. 72, p. 67–79, 2006.
- PEDERSEN, M. S., LIND, K.M. K. (2017) Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives, Springer International Publishing.
- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- REIS, V.R.R.; DEON, D.S.; MUNIZ, L.C.; GARCIA, U.S.; CANTANHÊDE, I.S.L.; REGO, C.A.R.M.; COSTA, J.B.; MARQUES, E.O. Soil chemical attributes under crop-livestock-forest integration system and in different land uses in Mata dos Cocais Region. Journal of Agricultural Science, Cambridge, v.10, n.4, p.370-380, 2018.
- RODRIGUES, F.A.V.; ALVAREZ, V.V.H.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L. Produtividade de eucalipto aos 18 meses de idade, na região do Cerrado, em resposta à aplicação de cálcio, via calcário e gesso agrícola. Scientia Forestalis, Piracicaba, v.44, n.109, p.67-74, 2016.
- RIBEIRO JUNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de variáveis do solo. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- ROBINSON, T. P.; & METTERNICHT, G. Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. Agricultural Systems, v. 85, n.1, p.19–41, 2005.
- SANCHEZ, R. B., MARQUES JÚNIOR, J., PEREIRA, G. T., BARACAT NETO, J., SIQUEIRA, D. S., & SOUZA, Z. M. DE. (2012) Mapping the relief forms to estimate the fertilization expenses in sugarcane. Engenharia Agrícola, 32(2), 280-292.
- SBS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. 2005. IN: Anuário brasileiro da silvicultura. 2005. Brasil: nação mais competitiva do mundo em florestas plantadas. São Paulo: Gazeta. 2005.
- SILVA, J.; CASTRO, V.; XAVIER, B. Cartilha do Fazendeiro Florestal. 2nd ed. Viçosa: Editoração Eletrônica e Capa, 2008, p. 1-44. 113 SILVA, P. ANGELI, A. Implantação e manejo de florestas comerciais. Instituto de pesquisa e estudos florestais- Documentos, n 18, p. 14, 2006

- SCHEPERS, A. R., SHANAHAN, J. F., LIEBIG, M. A., SHERPERS, J. S., JOHNSON, S. H., LUCHIARI, A. (2004) Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy Journal*, v. 96, n. 1, p. 195.
- SCOLFORO, J. R. S. Manejo florestal. Lavras: ED. UFLA/FAEPE, 1998.
- SCOLFORO, J. R. S.; CHAVES, A. L.; MELLO, J. M. Definição de tamanho de parcela para inventário florestal em floresta semidecídua montana. In: congresso florestal brasileiro, 7.; Congresso Florestal Panamericano, 1., 1993, Curitiba. Anais Curitiba: sbs-sbef, 1993. P. 333-337
- SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; SGARBI, F.; MINIZ, M.R.A. Seja o doutor do seu eucalipto. POTAFOS - Informações Agronômicas n.93, 32 p. 2001.
- SIMÕES, J.W.; LEITE, N.B.; BRANDI, G. Formação, manejo e exploração de florestas com espécies de rápido crescimento. Brasília: IBDF, 1981. 131p.
- SKOGFORSK; Retrieved from SkogForsk. Disponível em: <<http://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/>>; Acesso em: 01, março de 2019
- SOUZA, Z. M. D., SOUZA, G. S. D., MARQUES JÚNIOR, J., PEREIRA, G. T. (2014) Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. *Ciência Rural*.
- STAPE, J.L. Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil. 2002. 225p. Thesis (PhD) - Colorado State University, Fort Collins, 2002.
- STAPE, J.L.; ROCHA, J.C.; DONATTI, Z. Indicadores de qualidade silvicultural na Aracruz: 2000 a 2005. Relatório Técnico IPEF, Piracicaba, 2006.
- TAYLOR, S. E.; MCDONALD, T. P.; FULTON, J. P.; SHAW, J. N.; CORLEY, F. W.; BRODBECK, C. J.; Precision forestry in the southeast U.S. In: International Precision Forestry Symposium, STELLENBOSCH, SOUTH AFRICA. 2006.
- VALVERDE, S. R., MAFRA, J. W. A., MIRANDA, M. A., SOUZA, C. S., AND D. C. VASCONCELOS. 2012. “silvicultura brasileira - oportunidades e desafios da economia verde.” Coleção de estudos sobre diretrizes para uma economia verde no Brasil: 39. [Www.fbds.org.br](http://www.fbds.org.br).
- VIEIRA, S. R. (2000) Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C. E. G. R. Tópicos especiais em ciências do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p.1-54.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 350p.
- WHELAN, B.; TAYLOR, J.; Precision agriculture for grain production systems. In: CSIRO, Victoria, Australia, 2013.
- WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A.B. The “null hypothesis” of precision agriculture management. *Precision Agriculture*, Secaucus, v. 2, p. 265-279, 2000.
- WILLIAMS, J.E. WOINARSKI, J.C.Z. eucalypt ecology individuals to ecosystems.melbourne: cambridge university press.
- WILCKEN, C.; LIMA, A.; DIAS, T.; MASSON, M.; FILHO, P.; POGETTO, M. Guia prático de manejo de plantações de eucalipto. Botucatu: FEPAF. 2008, 25p.

APÊNDICES

Figura 31. Semivariogramas dos atributos de produtividade a partir de dados puros de colheita da Área Experimental 1.

Figura 32. Semivariogramas dos atributos de produtividade a partir de dados puros de colheita da Área Experimental 2.

Figura 33. Semivareograma dos atributos de produtividade a partir de dados puros de colheita da Área Experimental 3.

Figura 34. Semivareograma dos atributos de produtividade a partir de dados filtrados de colheita da Área Experimental 2.

Figura 35. Semivareograma dos atributos de produtividade a partir de dados filtrados de colheita da Área Experimental 3.

Figura 36. Semivariograma dos atributos de inventário florestal da Área Experimental 2.

Figura 37. Semivareograma dos atributos de inventário florestal da Área Experimental 3.

Figura 38. Semivareograma dos atributos de análise de solo da Área Experimental 2.

Figura 39. Semivareograma dos atributos de análise de solo da Área Experimental 3.

Tabela 18. Matriz de correlação linear entre os atributos de produtividade, inventário e solo da área experimental 2.

	Altimetria	N Fustes IN	SB	P	pH	MO	Mg	K	CTC	Ca	Argila	Areia Total	V	Silte
Altimetria	1,0000													
Número de Fustes IN	0,1515	1,0000												
SB	-0,3840	-0,3053	1,0000											
P	0,5908	0,0601	0,1346	1,0000										
pH	0,0151	0,4262	0,5949	0,4352	1,0000									
MO	0,3770	-0,4513	0,0897	0,2331	-0,1918	1,0000								
Mg	-0,1483	-0,3946	0,7900	0,3422	0,6414	0,1618	1,0000							
K	0,0872	-0,3724	0,3594	0,0832	0,0227	0,4851	0,3226	1,0000						
CTC	-0,2081	-0,5729	0,4994	-0,0861	-0,2844	0,3770	0,0539	0,3527	1,0000					
Ca	-0,5683	-0,5074	0,8700	-0,1042	0,4017	0,0913	0,8431	0,3421	0,3323	1,0000				
Argila	0,5440	0,0943	-0,7953	-0,0123	-0,7124	0,2301	-0,8389	-0,1501	0,0558	-0,8696	1,000			
Areia Total	-0,4308	-0,0533	0,6419	0,1148	0,7201	-0,2883	0,8415	0,0509	-0,2763	0,7598	-0,960	1,0000		
V	0,0641	0,3541	0,6370	0,3120	0,9046	-0,1438	0,5423	0,1377	-0,0658	0,3798	-0,601	0,5510	1,0000	
Silte	-0,7124	-0,2079	0,7209	-0,4161	0,1164	-0,1084	0,2118	0,2287	0,6905	0,6298	-0,478	0,2336	0,2626	1,0000
Número de Fustes CO	0,2906	-0,1421	0,2237	0,2481	0,1440	-0,0314	0,1971	0,2580	0,1819	0,0473	-0,032	0,0288	0,2810	0,0256
VI CO	-0,5084	-0,1710	0,8113	0,0905	0,5265	-0,1215	0,6490	0,2652	0,2855	0,7816	-0,790	0,6771	0,5369	0,6483
Comprimento CO	0,4952	-0,1440	0,1472	0,2432	0,0863	0,1574	0,1377	0,2977	0,2017	-0,0657	0,121	-0,1257	0,2392	-0,0795
DAP CO	-0,2909	-0,4478	0,4050	0,1495	0,0167	0,0734	0,3951	0,3571	0,2817	0,4916	-0,381	0,3390	-0,0012	0,3280
DM CO	-0,4474	-0,0520	0,8203	0,1332	0,6304	-0,0801	0,6449	0,1708	0,2561	0,7476	-0,777	0,6585	0,6330	0,6172
A Mortas	0,1383	-0,2550	0,0945	-0,0334	-0,1834	0,3829	-0,0161	0,4510	0,3634	0,0480	0,145	-0,2323	-0,0336	0,1415
A Falhas	-0,0142	-0,5224	0,1929	0,0070	-0,1961	0,1597	0,1985	0,1812	0,3460	0,2489	-0,051	0,0301	-0,0684	0,1474
A Dominadas	-0,0115	0,2130	-0,0526	0,1881	0,1338	-0,3186	-0,0367	-0,1257	-0,1975	-0,0865	-0,066	0,1164	0,0917	-0,0626
DAP	-0,3586	-0,4017	0,9170	0,0065	0,5224	0,1060	0,8149	0,2810	0,4118	0,8636	-0,777	0,6635	0,5762	0,6074
A Bifurcadas	-0,4774	0,7342	-0,1179	-0,4547	0,1887	-0,5839	-0,3977	-0,3432	-0,2940	-0,1357	-0,130	0,0614	0,1582	0,3069
Altura Estimada	0,0230	-0,3435	0,8456	0,4158	0,6259	0,2874	0,8623	0,3198	0,3315	0,6885	-0,636	0,5805	0,6178	0,3102
Altura Dominante	0,1044	-0,2878	0,7920	0,5935	0,7082	0,2334	0,9143	0,3250	0,1698	0,6531	-0,668	0,6625	0,6602	0,1598
VI	-0,3099	-0,3727	0,9658	0,1383	0,6075	0,1159	0,8691	0,3266	0,4046	0,8843	-0,812	0,6999	0,6538	0,5957
Produtividade IN	-0,3000	0,1752	0,8524	0,1603	0,8647	-0,0839	0,6903	0,1262	0,1200	0,6660	-0,807	0,7024	0,8280	0,5322
A Quebradas	-0,0206	-0,0693	0,1774	0,2972	0,2728	-0,0913	0,3383	0,0141	-0,1231	0,1901	-0,278	0,3346	0,1942	-0,0850
PVAR50	0,1826	0,5013	-0,3031	-0,1146	-0,0054	-0,0038	-0,4182	-0,3216	-0,1440	-0,4789	0,345	-0,3451	-0,0962	-0,1584
Produtividade CO	-0,5083	-0,1707	0,8105	0,0906	0,5262	-0,1214	0,6485	0,2653	0,2848	0,7811	-0,789	0,6769	0,5364	0,6477

	N Fustes CO	VI CO	Comprimento CO	DAP CO	DM CO	A Mortas	A Falhas	A Dominadas	DAP
Número de Fustes CO	1,0000								
VI CO	0,1626	1,0000							
Comprimento CO	0,8762	-0,0895	1,0000						
DAP CO	0,0790	0,6530	-0,1289	1,0000					
DM CO	-0,0121	0,9308	-0,2030	0,4331	1,0000				
A Mortas	0,1481	0,0073	0,2483	0,0438	-0,0326	1,0000			
A Falhas	0,1881	0,2161	0,1323	0,3624	0,1482	0,2455	1,0000		
A Dominadas	0,1868	0,1587	0,0373	0,2662	0,0595	-0,1500	-0,1383	1,0000	
DAP	0,2085	0,6451	0,1882	0,2547	0,6638	0,1056	0,2602	-0,2265	1,0000
A Bifurcadas	-0,3468	0,1271	-0,4726	-0,1757	0,1773	-0,2239	-0,3940	0,1871	-0,2372
Altura Estimada	0,3038	0,5147	0,3501	0,2044	0,5650	0,1031	0,1944	-0,1862	0,8874
Altura Dominante	0,3355	0,5632	0,3258	0,3038	0,5912	0,0392	0,1813	-0,0343	0,7822
VI	0,2440	0,7341	0,1954	0,3375	0,7510	0,0894	0,2426	-0,1265	0,9760
Produtividade IN	0,1157	0,6808	0,0700	0,0820	0,7841	-0,0669	-0,0848	-0,0246	0,7865
A Quebradas	0,1126	0,1959	-0,0128	0,1894	0,1769	-0,0072	0,2691	0,1502	0,1998
PVAR50	-0,2051	-0,5328	-0,0043	-0,6509	-0,3843	-0,0581	-0,4311	-0,2772	-0,2000
Produtividade CO	0,1621	1,0000	-0,0901	0,6534	0,9306	0,0074	0,2159	0,1585	0,6442

	A Bifurcadas	Altura Estimada	Altura Dominante	VI	Produtividade IN	A Quebradas	PVAR50	Produtividade CO
A Bifurcadas	1,0000							
Altura Estimada	-0,4776	1,0000						
Altura Dominante	-0,4902	0,9527	1,0000					
VI	-0,2397	0,9112	0,8547	1,0000				
Produtividade IN	0,1859	0,7567	0,7160	0,8282	1,0000			
A Quebradas	-0,1534	0,2511	0,3393	0,2261	0,1681	1,0000		
PVAR50	0,2418	-0,1121	-0,2764	-0,3091	0,0147	-0,1687	1,0000	
Produtividade CO	0,1275	0,5139	0,5626	0,7333	0,6801	0,1958	-0,5328	1,0000

P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; H⁺/Al³⁺- potencial hidrogeniônico; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SMP- Acidez trocável; Al alumínio; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; S- soma de bases; B- boro; Cu- cobre; Fe- ferro; Mn- manganês; Zn- zinco; VI- volume individual; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Mortas- porcentagem de árvores mortas; A Falhas- porcentagem de falhas; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; A Quebradas- porcentagem de árvores quebradas.

Tabela 19. Matriz de correlação linear entre os atributos de produtividade, inventário e solo da Área Experimental 3.

	Argila	Ca*	CTC*	K*	Mg*	MO*	pH*	P*	SB*	SILTE*	V*	Areia Total
Argila	1,0000											
Ca*	-0,2143	1,0000										
CTC*	0,9182	0,1636	1,0000									
K*	0,8474	0,2489	0,9635	1,0000								
Mg*	0,7416	0,4776	0,9306	0,9546	1,0000							
MO*	0,2618	0,5679	0,4799	0,5038	0,6380	1,0000						
pH*	-0,6551	-0,0512	-0,7505	-0,7152	-0,6096	-0,2573	1,0000					
P*	0,4480	-0,0476	0,3865	0,3094	0,3424	0,3388	0,0853	1,0000				
SB*	0,6606	0,5719	0,8767	0,9160	0,9908	0,6765	-0,5249	0,3506	1,0000			
SILTE*	0,7452	0,4408	0,9251	0,9586	0,9648	0,5462	-0,7351	0,2264	0,9449	1,0000		
V*	0,3902	0,7652	0,7000	0,7996	0,9001	0,6892	-0,4854	0,1185	0,9321	0,8742	1,0000	
Areia Total	-0,9379	-0,0828	-0,9878	-0,9738	-0,9028	-0,4210	0,7666	-0,3466	-0,8421	-0,9205	-0,6664	1,0000
Altura Estimada	-0,6558	0,3830	-0,6030	-0,5339	-0,3369	0,0393	0,8653	0,0094	-0,2163	-0,4389	-0,1122	0,6403
A Bifurcadas*	-0,2696	-0,4987	-0,4504	-0,4006	-0,5516	-0,8483	0,3142	-0,3285	-0,5766	-0,4827	-0,5510	0,3749
DAP IN*	-0,8538	-0,1117	-0,9509	-0,9231	-0,8479	-0,4027	0,9023	-0,1939	-0,7737	-0,8897	-0,6583	0,9528
A Dominadas*	0,8518	0,1048	0,9475	0,9188	0,8415	0,3963	-0,9062	0,1891	0,7661	0,8848	0,6515	-0,9499
A Falhas*	0,0212	-0,0703	-0,0236	-0,0356	-0,0380	0,2474	0,0732	0,3331	-0,0298	-0,0401	-0,0696	0,0193
A Mortas*	-0,6162	0,5282	-0,4324	-0,2494	-0,1291	0,0046	0,5483	-0,2451	-0,0302	-0,1866	0,2138	0,4352
N Fustes*	0,8271	-0,2540	0,7699	0,6641	0,5547	0,2926	-0,8154	0,1890	0,4553	0,5918	0,2635	-0,7800
PVAR50*	-0,8474	-0,0385	-0,9244	-0,8892	-0,7930	-0,3456	0,9234	-0,1674	-0,7094	-0,8455	-0,5927	0,9318
A Quebradas*	0,2547	-0,4080	0,0197	-0,1075	-0,1082	-0,2405	0,3002	0,4707	-0,1268	-0,1565	-0,3727	-0,0170
Produtividade IN*	-0,8321	-0,3166	-0,9787	-0,9728	-0,9654	-0,5514	0,7772	-0,2757	-0,9237	-0,9696	-0,8125	0,9641
VI IN*	-0,6228	0,8695	-0,3231	-0,2259	0,0195	0,3074	0,3908	-0,1711	0,1425	-0,0256	0,3837	0,3941
Altura Dominante	0,3261	0,3720	0,4962	0,5744	0,6123	0,6159	-0,4164	-0,2305	0,6094	0,5624	0,6601	-0,4889
Altimetria	-0,5996	0,1459	-0,6464	-0,6072	-0,4466	-0,0867	0,9287	0,0434	-0,3467	-0,5580	-0,3009	0,6697
DAP CO*	-0,3281	0,3917	-0,2211	-0,2551	-0,1209	-0,1599	0,1975	-0,0362	-0,0584	-0,0710	-0,0037	0,2723
Comprimento CO*	-0,7415	0,0295	-0,7997	-0,7785	-0,6732	-0,2549	0,8168	-0,0397	-0,5935	-0,6982	-0,4927	0,8078
VI CO*	-0,2096	0,5958	-0,0218	-0,0268	0,1443	0,0864	0,0871	-0,0746	0,2154	0,1610	0,2843	0,0853
N Toras*	-0,7678	0,0813	-0,8059	-0,8154	-0,6798	-0,2599	0,8222	-0,0195	-0,5951	-0,7145	-0,5024	0,8369
DM CO*	-0,0360	0,3944	0,0351	0,0290	0,1704	0,0582	0,2870	0,2601	0,2404	0,1423	0,1938	0,0086
Produtividade CO*	-0,2072	0,5933	-0,0204	-0,0262	0,1442	0,0853	0,0861	-0,0715	0,2150	0,1613	0,2825	0,0840

	Altura Estimada	A Bifurcadas*	DAP IN*	A Dominadas*	A Falhas*	A Mortas*	N Fustes*	PVAR50*	A Quebradas*	Produtividade IN*	VI IN*	Altura Dominante
Altura Estimada	1,0000											
A Bifurcadas*	0,0030	1,0000										
DAP IN*	0,7808	0,3806	1,0000									
A Dominadas*	-0,7883	-0,3756	-0,9999	1,00								
A Falhas*	0,0671	-0,1610	0,0564	-0,05	1,0000							
A Mortas*	0,6706	0,2343	0,4711	-0,47	-0,0548	1,0000						
N Fustes*	-0,8084	-0,3872	-0,8273	0,82	-0,0312	-0,7484	1,0000					
PVAR50*	0,8381	0,3331	0,9952	-0,99	0,0599	0,5159	-0,8485	1,0000				
A Quebradas*	0,1178	0,2417	0,1311	-0,13	0,1543	-0,1993	0,0685	0,1335	1,0000			
Produtividade IN*	0,5571	0,5022	0,9536	-0,94	0,0392	0,3137	-0,7173	0,9197	0,1015	1,0000		
VI IN*	0,7398	-0,2560	0,3903	-0,39	-0,0383	0,7294	-0,6505	0,4557	-0,3128	0,1781	1,0000	
Altura Dominante	-0,1576	-0,5147	-0,5000	0,49	0,0025	0,0235	0,3907	-0,4612	-0,4647	-0,5861	0,0988	1,0000
Altimetria	0,9593	0,1012	0,8299	-0,83	0,0845	0,5628	-0,7580	0,8748	0,2878	0,6370	0,5460	-0,2409
DAP CO*	0,3714	0,0752	0,2756	-0,27	-0,2007	0,2199	-0,3621	0,2982	0,1591	0,1956	0,5024	-0,3506
Comprimento CO*	0,7659	0,2425	0,8668	-0,86	0,1226	0,4835	-0,7836	0,8765	0,2652	0,7850	0,4617	-0,5526
VI CO*	0,3745	-0,1230	0,1021	-0,10	-0,2591	0,2729	-0,2659	0,1471	0,0034	-0,0357	0,6037	-0,0332
N Toras*	0,7894	0,2047	0,8840	-0,88	0,0637	0,4439	-0,7810	0,8951	0,2849	0,7972	0,5130	-0,5800
DM CO*	0,4596	-0,0385	0,1436	-0,15	-0,0538	0,2466	-0,3202	0,1972	0,2856	-0,0313	0,4376	-0,1849
Produtividade CO*	0,3722	-0,1219	0,1010	-0,10	-0,2569	0,2686	-0,2658	0,1458	0,0035	-0,0361	0,6008	-0,0366

	Altimetria	DAP CO*	Comprimento CO*	VI CO*	N Toras*	DM CO*	Produtividade CO*
Altimetria	1,0000						
DAP CO*	0,2727	1,0000					
Comprimento CO*	0,8037	0,3777	1,0000				
VI CO*	0,2254	0,9069	0,2181	1,0000			
N Toras*	0,8113	0,5271	0,9642	0,3461	1,0000		
DM CO*	0,3900	0,7859	0,3105	0,8208	0,8229	1,0000	
Produtividade CO*	0,2230	0,9072	0,2170	0,9999	0,3453	0,8229	1,0000

P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; H^+Al^{3+} - potencial hidrogeniônico; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SMP- Acidez trocável; Al alumínio; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; S- soma de bases; B- boro; Cu- cobre; Fe- ferro; Mn- manganês; Zn- zinco; VI- volume individual; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Mortas- porcentagem de árvores mortas; A Falhas- porcentagem de falhas; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; A Quebradas- porcentagem de árvores quebradas.

Tabela 20. Resultado das análises de regressão simples entre a produtividade gerada pela colhedora florestal com os dados de inventário florestal e análise de solo da Área Experimental 2.

Dependente de Produtividade CO	Equação	R ²	f
Altimetria	$-1,6145x + 1412$	0,2583	7206,01
Altura Dominante	$78,795x - 2041,6$	0,3165	9581,56
Altura Estimada	$94,871x - 2193,5$	0,2641	7425,04
Área Total	$3,4639x - 2692,3$	0,4581	17491,76
Argila	$-3,6702x + 782,64$	0,6237	34290,72
A Bifurcadas	$11,441x + 449,45$	0,0162	341,69
Ca	$207,24x + 178,57$	0,6101	32373,07
CTC	$4,1622x + 300,8$	0,0811	1826,10
DAP IN	$67,041x - 727,94$	0,4151	14680,23
DAP CO	$36,954x - 164,27$	0,427	15415,23
A Dominadas	$8,479x + 470,35$	0,0251	533,18
A Falhas	$2,6247x + 460,73$	0,0466	1011,06
K	$591,12x + 428,43$	0,0704	1566,66
Comprimento CO	$-5,52x + 606,35$	0,0081	169,30
VI CO	$1337x - 0,6781$	1	54321863E09
Mg	$1056,6x + 232,4$	0,4206	15015,89
MO	$-46,729x + 518,85$	0,0147	309,25
N Fustes	$-0,2419x + 776$	0,0291	620,66
N Toras	$40,116x + 206,76$	0,0263	558,53
pH	$172,48x - 282,2$	0,2769	7921,37
P	$2,7125x + 457,52$	0,0082	171,29
PVAR50	$-10,361x + 797,52$	0,2839	8201,50
A Quebradas	$10,245x + 470,08$	0,0384	824,93
SB	$16,028x + 196,12$	0,6569	39611,05
Silte	$11,095x + 456,6$	0,4195	14952,58
DM CO	$64,37x - 323,5$	0,8659	133620,81
V	$4,8108x + 282,37$	0,2877	8357,97
Produtividade IN	$1,471x - 58,106$	0,4625	17804,10
VI IN	$1849,7x - 67,495$	0,5378	24070,18

P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; H^+Al^3 - potencial hidrogeniônico; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SMP- Acidez trocável; Al alumínio; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; S- soma de bases; B- boro; Cu- cobre; Fe- ferro; Mn- manganês; Zn- zinco; VI- volume individual; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Mortas- porcentagem de árvores mortas; A Falhas- porcentagem de falhas; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; A Quebradas- porcentagem de árvores quebradas.

Tabela 21. Resultado das análises de regressão simples entre a produtividade gerada pela colhedora florestal com os dados de inventário florestal e análise de solo da Área Experimental 2.

Dependente de Produtividade CO	Equação	R ²	f
Argila	$-0,1944x + 464,4$	0,0429	136,35
Altura Dominante	$-1,9206x + 411,09$	0,0013	3,97
Altura Estimada	$188,41x - 4332,1$	0,1385	488,75
Altimetria	$0,6949x - 117,71$	0,0505	161,57
Areia Total	$0,0322x + 347,57$	0,0071	21,59
A Bifurcadas	$-5,5674x + 359,08$	0,0147	45,28
Ca	$392,03x + 131,34$	0,352	1651,17
CTC	-	-	1,26NS
DAP IN	$23,909x - 10,036$	0,0102	31,31
DAP CO	$32,281x - 99,889$	0,8228	14115,10
A Dominadas	$-10,797x + 377,69$	0,0111	34,16
A Falhas	$-28,69x + 407,35$	0,066	214,69
K	-	-	2,09NS
Comprimento CO	$5,1221x + 255,48$	0,0473	150,85
VI CO	$1521,7x - 1,4963$	0,9998	14471727,00
Mg	$33,38x + 336,64$	0,0208	64,54
MO	$8,6027x + 327,78$	0,0073	22,27
A Mortas	$21,037x + 352,53$	0,0724	237,52
N Fustes	$35,207x + 240,68$	0,1196	412,66
N Toras	$-0,2025x + 660,95$	0,0707	231,11
pH	$75,301x + 62,203$	0,0074	22,69
P	$-0,7383x + 361,39$	0,0051	15,63
PVAR50	$13,374x - 20,929$	0,0213	66,02
A Quebradas	-	-	0,04NS
SB	$2,7422x + 318,48$	0,0462	147,32
Silte	$0,1106x + 334,5$	0,026	81,16
DM CO	$73,82x - 388,94$	0,677	6370,06
V	$6,4613x + 288,72$	0,0798	263,55
Produtividade IN	$-0,5506x + 507,02$	0,0013	3,97
VI IN	$11565x - 1753,2$	0,361	1717,02

P- fósforo; K- potássio; Ca - cálcio; Mg- magnésio; H^+Al^{3+} - potencial hidrogeniônico; M.O.- matéria orgânica; pH- acidez potencial; SMP- Acidez trocável; Al alumínio; SB- soma de bases trocáveis; CTC- capacidade de troca catiônica; V- índice de saturação por bases; S- soma de bases; B- boro; Cu- cobre; Fe- ferro; Mn- manganês; Zn- zinco; VI- volume individual; DAP- diâmetro na altura do peito; PVAR50- índice de uniformidade; A Mortas- porcentagem de árvores mortas; A Falhas- porcentagem de falhas; A Dominadas- porcentagem de árvores dominadas; A Bifurcadas- porcentagem de árvores bifurcadas; A Quebradas- porcentagem de árvores quebradas.