

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

LARISSA BENASSI VALENTIM

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO TRIDIMENSIONAL DO TEOR DE UMIDADE
E CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA EM PILHAS DE CAVACOS DE MADEIRA**

Sorocaba
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

LARISSA BENASSI VALENTIM

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO TRIDIMENSIONAL DO TEOR DE UMIDADE
E CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA EM PILHAS DE CAVACOS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, para obtenção do título de mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Orientação: Profa. Dra. Franciane Andrade de Pádua

Co-orientação: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Sorocaba
2016

BENASSI VALENTIM, LARISSA

Mapeamento geoestatístico tridimensional do teor de umidade e
caracterização energética em pilhas de cavacos de madeira / LARISSA
BENASSI VALENTIM. -- 2016.

60 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Franciane Andrade de Pádua

Banca examinadora: Franciane Andrade de Pádua, Walbert Chrisostomo,
Cláudio Roberto Thiersch

Bibliografia

1. Biomassa. 2. Bioenergia. 3. Dependência espacial. I. Orientador. II.
Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

LARISSA BENASSI VALENTIM

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO TRIDIMENSIONAL DO
TEOR DE UMIDADE E CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA
DE PILHAS DE CAVACOS DE MADEIRA**

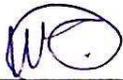
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação para obtenção do título de
mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.
Universidade Federal de São Carlos.
Sorocaba, 24 de maio de 2016.

Orientadora:



Profa. Dra. Franciane Andrade de Pádua
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *Campus Sorocaba*

Examinadores:



Dr. Walbert Chrisostomo
Universidade de Sorocaba - UNISO



Prof. Dr. Cláudio Roberto Thiersch
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *Campus Sorocaba*

“ A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita. ”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

Agradeço, a Deus por abençoar e guiar o meu caminho durante estes anos de mestrado e na execução deste trabalho.

A toda minha família sou eternamente grata pela confiança e o apoio durante todos estes anos, principalmente a minha querida mãe, que com seu imenso amor e apoio incondicional, nunca me permitiu desistir dos meus objetivos, sempre me estimulando a seguir em frente e não me abalar com as dificuldades do caminho, sem ela jamais teria conseguido chegar até aqui, e a ela não tenho palavras para expressar todo meu amor e gratidão.

A professora Franciane, meus eternos agradecimentos e gratidão pelo seu empenho e interesse em me auxiliar na execução deste trabalho, agradeço muito por sua compreensão e confiança, além dos seus estímulos em ampliar meus horizontes acadêmicos, com certeza seus conselhos acrescentaram e direcionaram muito meus objetivos para essa nova etapa vinda com a conclusão do mestrado.

Ao professor Cláudio, agradeço pela valiosa contribuição no auxílio das análises geoestatísticas deste trabalho, sua ajuda foi essencial para o término do estudo, elevando a qualidade da conclusão deste experimento.

Ao João, sou grata pela preciosa ajuda durante a fase de coleta das amostras, apesar de todas as dificuldades não desistiu e me auxiliou a concluir as amostragens.

A Empresa Salmeron, meus agradecimentos pela doação dos cavacos, parte essencial para execução deste projeto, é bom saber que existem empresas engajadas com a pesquisa e as melhorias e aprimoramentos tecnológicos gerados através da mesma.

A Capes, agradeço pelo auxílio financeiro durante o mestrado.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente com a minha formação, os quais não desanimaram e persistiram, apesar de todas as adversidades, inerentes a formação de quaisquer primeiras turmas de curso de pós-graduação de uma Universidade.

RESUMO

Valentim, L. B. *Mapeamento geoestatístico tridimensional do teor de umidade e caracterização energética em pilhas de cavacos de madeira*. 2016. 60f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2016.

A execução deste trabalho teve como objetivo o uso da geoestatística para a predição do padrão espacial da variação do teor de umidade em pilhas de cavacos de madeira de eucalipto destinadas a produção de energia, visando gerar subsídios à adequada amostragem e manejo do material. Para isso, foram instaladas pilhas de cavacos para a avaliação em três diferentes períodos de estocagem, sendo estes ciclos constituídos pelo material recém cortado em sete, trinta e sessenta dias de armazenamento. A amostragem ocorreu nas posições axial (topo, meio e base) e lateral, de forma que todas as amostras foram georreferenciadas em relação à distância do solo e do centro da pilha. A umidade dos cavacos em cada ponto amostral foi determinada pelo método gravimétrico preconizado pela norma NBR 14929 (ABNT, 2003). Adicionalmente, as amostras, foram submetidas a análise de densidade a granel, distribuição granulométrica, análise química imediata e a determinação de seu poder calorífico, visando a caracterização energética do material. Os valores de umidade foram submetidos à análise geoestatística e interpolação por krigagem. Os resultados do trabalho comprovaram a dependência espacial do teor de umidade ao longo das pilhas armazenadas pelo período de sete e trinta dias, confirmando que o uso da geoestatística é uma ferramenta útil para subsidiar a criação de protocolos de amostragem e auxiliar estudos da distribuição do teor de umidade ao longo da pilha armazenada. O efeito da chuva foi determinante para a redução da dependência espacial na pilha com sessenta dias de estocagem, indicando que os cavacos armazenados na forma de pilhas estão sujeitos ao umedecimento mesmo nas partes mais internas da estrutura. Em geral, os cavacos de *Eucalyptus grandis* apresentaram características tecnológicas satisfatórias para produção de energia.

Palavras-chaves: Dependência espacial. Krigagem. Bioenergia. Teor de umidade. Biomassa. Eucalipto.

ABSTRACT

VALENTIM, L. B. *Mapping three-dimensional geostatistical moisture content and energy characterization of wood chips piles*.60p. Dissertation (Masters in Planning and Use of Renewable Resources) - Science and Technology Center for Sustainability, Federal University of Sao Carlos, Sorocaba, 2016.

The execution of this work aimed at the use of geostatistics to predict the spatial pattern of variation of moisture content in piles of eucalyptus wood chips intended for energy production to generate subsidies to adequate sampling and handling of the material. For this, piles wood chips were installed for evaluation in three different storage periods, these rings being made by the newly cut material in seven, thirty and sixty days of storage. Sampling occurred in both axial positions (top, middle and base) side, so that all samples were georeferenced in relation to the distance from the ground and the center of the pile. The moisture content of the wood chips in each sample point was determined by gravimetric method recommended by NBR 14929 (ABNT, 2003). In addition, samples were subjected to analysis bulk density, particle size distribution, chemical analysis and determination of its calorific value, aiming at energy material characterization. The humidity values were submitted to geostatistical analysis and kriging. Our results confirmed the spatial dependence of the moisture content over the piles stored at seven and thirty days, confirming that the use of geostatistics is a useful tool to support the creation of sampling protocols and assist moisture content distribution studies over the pile. The effect of rain was crucial to reduce the spatial dependence on pile sixty days of storage, indicating that the wood chips stored in the form of piles are subject to wetting even in inner parts of the pile. In general, *Eucalyptus grandis* wood chips showed satisfactory technological characteristics for energy production.

Keywords: Spatial dependence. Kriging. Bioenergy. Moisture content. Biomass. Eucalyptus.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Propriedades de um semivariograma com patamar	24
FIGURA 2 – Formação das três pilhas de cavacos de madeira estudadas	28
FIGURA 3A – Gráfico referente a pilha de cavacos com sete dias de estoque	28
FIGURA 3B – Gráfico referente a pilha de cavacos com trinta dias de estoque	28
FIGURA 3C – Gráfico referente a pilha de cavacos com sessenta dias de estoque	28
FIGURA 4 – Hastes graduadas a cada 30 centímetros utilizadas para amostragem nas pilhas de cavacos.....	29
FIGURA 5A – Hastes fixas e distribuídas a cada 50 centímetros representando os pontos de coletas	29
FIGURA 5B – Abertura de perfis nas pilhas de cavacos para a coleta das amostras nos pontos definidos	29
FIGURA 6 – Raio de 10 centímetros nos perfis com a finalidade de evitar coleta de amostras vizinhas.....	30
FIGURA 7A – Chuva Acumulada Mensal x Chuva (Normal Climatológica 61-90) para a cidade de Sorocaba durante o ano de 2015	37
FIGURA 7B – Gráfico de precipitação entre os meses de setembro e novembro do ano de 2015 na cidade de Sorocaba, correspondente ao período de estocagem das pilhas de cavacos do estudo.....	37
FIGURA 8A – Semivariograma referente a pilha de cavacos com sete dias de estoque	39
FIGURA 8B – Semivariograma referente a pilha de cavacos com trinta dias de estoque	39
FIGURA 8C – Semivariograma referente a pilha de cavacos com sessenta dias de estoque ..	39
FIGURA 9 – Gráfico da pilha de cavacos com sete dias de estoque, demonstrando a variação da umidade a cada 10 centímetros de altura da estrutura de armazenamento.	42
FIGURA 10 – Distribuição da umidade na pilha referente a região de amostragem de 80 centímetros nos sentidos norte-sul e Leste-Oeste.....	42
FIGURA 11 – Gráfico da pilha de cavacos com trinta dias de estoque, demonstrando a variação da umidade a cada 10 centímetros de altura da estrutura de armazenamento.	43
FIGURA 12 – Gráfico da pilha de cavacos com sessenta dias de estoque, demonstrando a variação da umidade a cada 10 centímetros de altura da estrutura de armazenamento.....	44
FIGURA 13 – Distribuição granulométrica dos cavacos de madeira..	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Valores da média, do coeficiente de variação, das quantificações mínima e máxima dos teores de umidade nas pilhas de cavacos durante cada período de estocagem	35
TABELA 2 – Parâmetros obtidos pelo ajuste das funções de modelo exponencial do semivariograma experimentais definidos para a pilha de cavacos aos sete (pilha 1), trinta (pilha 2) e sessenta (pilha 3) dias de estocagem.	40
TABELA 3 – Valores médios dos parâmetros da análise química imediata e do poder calorífico nos cavacos de madeira	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 BIOMASSA FLORESTAL	15
2.2 CAVACOS DE MADEIRA	17
2.3 QUALIDADE DE MADEIRA PARA ENERGIA.....	19
2.4 O USO DA GEOESTATÍSTICA	22
2.5 AMOSTRAGEM DE BIOMASSA NA FORMA DE CAVACO.....	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 ÁREA EXPERIMENTAL.....	27
3.2 AMOSTRAGEM DOS CAVACOS NAS PILHAS	27
3.3 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICAS DOS CAVACOS	30
3.3.1 Teor de umidade.....	30
3.3.2 Densidade a granel	31
3.3.3 Distribuição granulométrica	31
3.3.4 Análise química imediata.....	31
3.3.5 Poder calorífico.....	31
3.4 ANÁLISE EXPLORATÓRIA	31
3.5 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE	35
4.2 ANÁLISE DA CONTINUIDADE ESPACIAL	38

4.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS ENERGÉTICOS	44
4.3.1 Densidade a granel	44
4.3.2 Granulometria	45
4.3.3 Análise química imediata e poder calorífico	46
5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o padrão de geração e consumo energético tem sofrido significantes alterações, de maneira que esforços têm sido dispendidos para a redução da dependência de fontes não renováveis de energia de modo especial o petróleo e seus derivados, estabelecendo-se novos conceitos de sustentabilidade ambiental, econômica e social.

Neste aspecto, o uso da biomassa representa um importante aliado nas questões relacionadas com a progressiva redução das reservas de carbono fóssil e aos impactos ambientais causados pela queima dos combustíveis de origem não renovável, uma vez que esse tipo de fonte alternativa energética de múltiplas origens possui a capacidade de gerar derivados menos poluentes e capazes de substituir o petróleo (JUAIS, 2009).

No Brasil, o uso da biomassa é crescente principalmente nos sistemas de cogeração energética, sendo que atualmente existem 523 usinas termoelétricas movidas a biomassa em território nacional (ANEEL, 2016). Aproximadamente 9,5% destas usinas são movidas a combustível oriundos de resíduos florestais madeireiros (principalmente de cavacos).

Entre as múltiplas categorias de obtenção de energia por meio do uso da madeira, o cavaco é a forma residual comumente armazenada no setor industrial, demonstrando uma ampla competitividade para a geração energética, devido à disponibilidade deste produto e ao caráter ambiental dado pelo reaproveitamento dos resíduos gerados no processamento madeireiro.

No entanto, a qualidade desta fonte de energia é dependente da matéria prima e da metodologia empregada em todas as etapas de produção, sendo estas relacionadas com o controle das variáveis intrínsecas a biomassa ou aos fatores ambientais

Neste sentido o processo de estocagem é parte integrante da qualificação do cavaco para fins energéticos, uma vez que o tipo de tratamento empregado no armazenamento da biomassa pode garantir maior eficiência no processo de conversão da mesma em combustível, pelo fato do controle aplicado poder interferir nas propriedades físicas e químicas do material armazenado (BRAND, 2007), as quais interferem na sua qualificação frente a utilização energética. Características como o teor de umidade, a densidade, a composição química elementar, macromolecular e imediata, influenciam o poder calorífico (VALE et al., 2011) dos materiais lignocelulósicos durante o processo de combustão.

Entre as várias propriedades dos materiais madeireiros o teor de umidade é a que possui maior grau de interferência nos atributos energéticos relacionados com a combustão nas caldeiras de biomassa, sendo a variação desta característica bastante ampla na madeira e na casca, de modo que é favorável o valor reduzido deste fator para a maior eficiência energética,

uma vez que quanto maior o teor de umidade da biomassa maior será a energia necessária para a evaporação da água nas fornalhas, diminuindo o poder calorífico do material e tornando o processo de combustão instável e de difícil controle (JOHNSON, 1975).

Para a obtenção de maiores rendimentos energéticos, o tempo de armazenamento da biomassa deve ser o suficiente para reduzir o teor de umidade sem que haja perda de massa seca (BRAND, 2007), de forma a manter a capacidade energética do combustível adequada. Neste sentido, considerações como a época e o tempo de estocagem devem ser contabilizados durante o armazenamento dos cavacos, uma vez que estes fatores afetam em diferentes níveis a velocidade e homogeneidade da redução da umidade na biomassa, bem como na alteração química e na mudança do conteúdo energético do material (BRAND et al., 2014).

Neste contexto, para o conhecimento da variação do teor de umidade de cavacos de madeira estocados em pilhas, é necessário o emprego de técnicas adequadas de amostragem, as quais sejam aptas a fornecerem informações confiáveis da população estudada com baixos custos (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997), possibilitando a determinação de estratégias para o correto manejo dos produtos finais desejados.

A forma de amostragem dos cavacos para a avaliação de suas propriedades apresenta grandes dificuldades para a obtenção de resultados significativos, os quais representem toda a pilha. Dependendo da forma e da intensidade da amostragem, a variabilidade do teor de umidade nas pilhas pode não ser corretamente captada.

Este fato pode ser observado em estudos de Jirjis (1995), o qual relata que certas discrepâncias na determinação da perda de massa seca durante o armazenamento da biomassa são ocasionadas pela incorreta determinação do teor de umidade, de forma que a correta determinação deste fator é de essencial importância, uma vez que esta propriedade é descrita como o parâmetro de maior importância para a determinação da qualidade de um combustível.

Os métodos de amostragem tradicionais não levam em consideração possíveis correlações espaciais entre observações vizinhas, sendo que em muitos casos somente a informação dada pela variância não é suficiente para explicar o fenômeno.

A análise de dependência espacial tem como base a suposição de que medições separadas por distâncias pequenas são mais semelhantes umas às outras que aquelas separadas por distâncias maiores (LIMA et al., 2006). Neste sentido, o uso de técnicas geoestatísticas, as quais por meio do estabelecimento do semivariograma torna possível a análise da dependência espacial entre as amostras de uma população experimental, permite a definição de parâmetros para a estimativa dos valores em locais não amostrados, pelo método interpolador de Krigagem

(SALVIANO,1996), o qual gera estimativas não tendenciosas e como mínima variância associada ao valor estimado

No caso específico de pilhas de cavacos, a análise da distribuição espacial dos valores de umidade no interior das pilhas de cavaco pode subsidiar tomadas de decisão quanto ao manejo adequado durante o período de estocagem destas estruturas, principalmente quando expostas as condições ambientais.

Assim pelo exposto, este trabalho teve como objetivo geral determinar e mapear a variabilidade do teor de umidade em pilhas de cavacos de madeira estocadas ao ar livre, visando a produção de energia, em diferentes períodos de estocagem.

Por objetivos específicos destacam-se:

- Verificar a existência e grau de dependência espacial do teor de umidade em pontos amostrais da pilha de cavacos armazenadas ao ar livre em diferentes períodos de estocagem;
- Gerar subsídios ao manejo das pilhas de cavacos expostas a condições ambientais em diferentes períodos de estocagem;
- Caracterizar os cavacos de madeira para a produção de energia quanto ao teor de umidade, a densidade granel, distribuição granulométrica, ao poder calorífico e a análise química imediata (teor de voláteis, teor de cinza, teor de carbono fixo).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BIOMASSA FLORESTAL

Nos últimos anos, a utilização de biomassa como insumo energético é cada vez mais recorrente, apresentando-se como uma das principais alternativas para a diversificação das matrizes energéticas nacionais e internacionais, as quais possuem a crescente necessidade de substituição de fontes tradicionais de energia de procedência não renováveis tais como carvão mineral, gás natural e petróleo por agentes alternativos de energia limpa e renovável (CENBIO,2001).

A utilização da biomassa apresenta-se como uma importante estratégia para a mudança do padrão de consumo dos meios energéticos, uma vez que representa uma fonte de energia disponível e renovável. A biomassa é atuante na redução de impactos ambientais, uma vez que além de agir na redução do uso dos combustíveis fósseis, sua utilização auxilia na diminuição de emissão de metano, gás de maior impacto ao efeito estufa (GOLDEMBERG, 2009).

A definição de biomassa abrange todo o material de origem orgânica, pertencente ao reino vegetal ou animal, os quais possuem respectivamente energia química gerada e acumulada em seu interior (COELHO, 1982), resultante da transformação energética da luz solar pela ação biogeoquímica dos cloroplastos contidos nos organismos fotossintéticos. A partir da conversão da energia química decorrente do processo da fotossíntese é possível a geração e conseqüentemente a disponibilização para o ambiente de eletricidade, combustível ou calor (ANEEL, 2002).

A biomassa de origem florestal é constituída pelos compartimentos aéreos e subterrâneos dos vegetais, sendo desta maneira formada por todos os segmentos arbóreos, ou seja, tronco, galhos, folhas, cascas e raízes (VIDAL; HORA, 2011). Assim, a utilização desta fonte para a geração energética abrange uma ampla diversidade de formas atuantes de materiais orgânicos, processados com auxílio de diferentes tecnologias, quer seja pela queima direta da madeira ou pelo aproveitamento dos seus resíduos resultantes do manejo florestal, industrial ou urbano.

A norma The European Standard EN 14961-1(2010) for wood chips and hog fuel classifica a biomassa com base na sua origem, fonte e propriedade, sendo estas: biomassa lenhosa (floresta, plantação e madeira virgem; subprodutos e resíduos da indústria da

transformação da madeira; e madeira já utilizada), biomassa herbácea, misturas intencionais (blendas) e não intencionais.

Desta maneira, com foco na biomassa florestal, pode-se afirmar que a madeira é o mais antigo combustível utilizado pelo homem, representando um material com flexibilidade de adaptação ambiental e tecnológica, o qual pode ser utilizado energeticamente para a produção de combustível sólido, líquido e gasoso (GRASSI; PALZ,1994), gerando energia térmica, mecânica e elétrica.

As técnicas para a produção de energia a partir da biomassa da madeira estão atreladas a processos físicos, termoquímicos, bioquímicos e biológicos, sendo a combustão direta, a gaseificação e a pirólise as técnicas mais comumente empregadas para a produção de bioenergia (VALE; GENTIL, 2008). Estas diferentes rotas de obtenção de energia se diferenciam pelos produtos finais gerados e em termos de eficiência energética.

Pela ação da combustão direta é possível a transformação da biomassa em calor, entretanto o emprego desta técnica gera baixos rendimentos energéticos, sendo normalmente uma prática ineficiente, devido aos altos teores de umidade e a baixa densidade energética dos materiais orgânicos utilizados (VALE; GENTIL, 2008). A gaseificação gera através da biomassa gases, trata-se de um processo de alta eficiência, no qual os combustíveis gasosos gerados são empregados para o fornecimento direto de calor ou para a queima em motores de combustão interna ou turbina a gás, podendo atuar como matéria prima para a síntese de outros combustíveis como o álcool (VIDAL; HORA, 2011). Já a pirólise converte a biomassa em carvão vegetal, gases e óleos na ausência ou em quantidades mínimas de oxigênio, de forma que o produto final gerado possui melhor qualidade e desempenho energético em relação ao combustível de origem (VIDAL; HORA, 2011).

No Brasil a oferta interna de energia renovável, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BRASIL,2015), representa 39,4% da base energética do país, de modo que sobre este total 8,1% refere-se à biomassa de origem florestal (lenha e carvão vegetal), fato que posiciona este insumo como a quinta fonte de energia na matriz brasileira.

Entre os benefícios da utilização da biomassa florestal estão os reduzidos custos relacionados com a aquisição da matéria prima e aos baixos impactos ambientais gerados pelo processamento das fontes orgânicas. Contudo, a utilização da madeira como fonte energética é dependente de diversos fatores como os relacionados com o nível de desenvolvimento do país, com a disponibilidade de áreas florestais, aos aspectos ambientais, além da classificação econômica de uso frente a concorrência de outras fontes energéticas como as derivadas do petróleo (BRITO, 2007).

Neste contexto, a participação da biomassa de origem florestal para a geração de energia no território nacional ainda não é muito significativa, apesar da vocação natural brasileira para a produção e consumo de produtos de origem renovável, isto está associado as dificuldades de estoque, armazenamento e transporte do material orgânico; pela geração e acúmulo de material particulado, os quais são removidos por maquinários de alto investimento; e em termos energéticos a menor eficiência quando comparada a combustíveis fósseis (GRAUER, 2001).

Assim, o impulso para a crescente utilização da biomassa como fonte energética está relacionado com a capacidade de mensuração mais precisa do uso e do potencial deste insumo, bem como o emprego de tecnologias eficientes de conversão atreladas concomitantemente a transferência do conhecimento das vantagens ambientais geradas pelo uso racional desta fonte bioenergética para seus consumidores (ROSILLO- CALLE et al., 2000).

2.2 CAVACOS DE MADEIRA

Os resíduos de exploração provindos da colheita dos plantios ou do beneficiamento madeireiro representam uma das categorias com maior potencial de expansão para a geração energética, de maneira que atualmente dos 41 milhões de toneladas de resíduos de base florestal produzidos é possível o fornecimento de energia equivalente a 1,7GW/ano (ABRAF, 2013).

Neste contexto, a conotação negativa atribuída ao termo resíduo foi revisto, de maneira que no presente tais sobras do processamento florestal deixaram de ser visualizadas somente com um problema ambiental e passaram a atrair o interesse dos setores produtivos como fontes de energia nobre (NASCIMENTO; BIAGGIONI, 2010), fato que auxilia concomitantemente na otimização da cadeia produtiva madeireira agregando valor ao material descartado ou subutilizado.

Os resíduos florestais apresentam formatos e tamanhos diferentes, podendo ser provenientes da indústria de transformação madeireira, apresentados nas formas de cavaco, serragem, costaneiras, refilos e destopos ou então oriundos de plantios destinados ao uso múltiplo ou de florestas energéticas, os quais estão sobre configuração de ponteiros de árvores, toras, galhos com e sem folhas (BRAND, 2007).

Todo processamento da madeira acarreta na geração de resíduos em diferentes intensidades, sendo que em geral somente 40 a 60% do volume total da tora é utilizável (LIMA; SILVA, 2005), neste âmbito podemos destacar o cavaco como um dos produtos residuais mais comumente armazenado nas indústrias do segmento madeireiro.

Os cavacos são definidos como partículas reduzidas de biomassa, ou seja, uma composição de lascas obtidas a partir de toras de madeiras que sofrem o processo de picagem ou destroçamento, fato que auxilia no manuseio, estocagem, transporte bem como na homogeneização do material para a conversão energética (CANTO, 2009), sendo a qualidade do produto dependente do material de origem e da tecnologia empregada em todos os processos intrínsecos a sua produção.

O processamento dos cavacos de madeira ocorre por meio de cavaqueadores. Este tipo de maquinário é segmentado entre dois modelos, os picadores e os trituradores, os quais se diferenciam em relação as dimensões (tamanho e uniformidade) do resíduo processado e em função da quantidade e capacidade produtiva requerida do recurso energético. Em plantios convencionais, o processo de cavaqueamento pode ocorrer em localidades distintas, ou seja, a partir do corte e da toragem da madeira, os cavacos podem ser produzidos dentro da própria floresta, as margens dos talhões, em pátios intermediários ou diretamente na indústria (SANTIAGO, 2013).

Após o processamento da madeira os cavacos são estocados em grandes pilhas nos pátios industriais até sua utilização, uma vez que o uso da biomassa recém colhida não é apropriado para o uso imediato por conta do baixo desempenho energético (BRAND,2007), ocasionado pela alta umidade dos materiais orgânicos.

Contudo, por se tratar de um material biológico está sujeito aos processos de degradação química, física e biológica, e conseqüentemente a perda de massa seca, afetando assim a qualidade final do combustível gerado. Estes processos degradativos como as reações de auto oxidação e as reações enzimáticas são influenciados pelas condições de estocagem sendo mais acentuados em sua velocidade de ocorrência na madeira estocada em forma de partículas do que as que são armazenadas em toras (BRAND,2007).

Outra problemática que envolve a estocagem de cavacos é o aquecimento das pilhas, fato que pode ocasionar a combustão espontânea. Este calor é proveniente principalmente das células vivas presentes na biomassa nos primeiros dias de armazenamento, adicionada ao calor liberado pela respiração dos microorganismos, os quais se devolvem pela energia térmica inicial lançada. Além destes fatores outras reações químicas ocorrem no estoque de biomassa, agravando a dissipação do calor, como por exemplo os extrativos orgânicos liberados pela morte das células vivas, a falta de circulação de ar no interior das pilhas e a oxidação do ácido acético produzido pelos fungos e bactérias (CANTO,2009).

Neste contexto, uma alternativa para estes problemas inerentes ao estoque da biomassa seria a secagem dos cavacos no próprio campo, uma vez que garantiria menor umidade e

melhores condições para o armazenamento do material, além de auxiliar na ciclagem natural de nutrientes (NURMI, 1999).

No entanto, para a minimização das decorrências inerentes ao processo de estocagem dos cavacos é importante a consideração que o tamanho das partículas de madeira possui efeito direto sobre as propriedades físicas, químicas e energéticas da biomassa, de forma quanto menor o porte destes fragmentos maior a intensidade destas variações, fato que afeta o armazenamento do material (BRAND et al., 2014).

Neste sentido, para a determinação da melhor estratégia de manejo do material orgânico estocado, incluindo a indicação de procedimentos de maiores eficácias em relação ao formato da estocagem, ao volume armazenado e ao tempo de estoque da biomassa é necessário o conhecimento de fatores como a origem e a espécie madeireira utilizada, bem como a época de colheita e estocagem do material (BRAND et al., 2012).

2.3 QUALIDADE DE BIOMASSA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA

O poder calorífico exerce uma das mais importantes propriedades sob o ponto de vista energético, atuando como um determinante fator de avaliação da potencialidade de energia contida na biomassa (BRAND,2010), uma vez que representa a quantidade total de calor liberado por unidade de massa de um combustível durante o processo da combustão completa. Esta propriedade energética é segmentada em três formas, o poder calorífico superior (PCS), o poder calorífico inferior (PCI) e por fim o poder calorífico útil (PCU).

O poder calorífico superior é descrito pela queima do combustível a volume constante, sendo a água formada durante este processo condensada e o vapor latente da vaporização recuperado, configurando o máximo potencial de fornecimento energético. Por outro lado, o poder calorífico inferior compreende a combustão do material energético em pressão constante, não sendo possível a recuperação da água da queima, uma vez que a mesma não é condensada, portanto não se recupera o calor latente da vaporização do líquido, expressando desta maneira as perdas de energia inevitáveis nos processos convencionais de transformação da biomassa em calor (VALE; GENTIL, 2008). Já o poder calorífico útil é obtido por meio de equações, com derivação do poder calorífico inferior, tem como diferencial a consideração do teor de umidade do combustível (VALE; GENTIL, 2008).

Vários são os fatores que atuam diretamente no poder calorífico do material lignocelulósico, influenciando na avaliação da madeira e seus resíduos para fins energéticos, as

principais causas são dependentes da composição química (elementar, estrutural e imediata), densidade básica e o teor de umidade dos materiais bioenergéticos.

A análise elementar possibilita a determinação dos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, tais elementos apresentam-se de forma uniforme nos vegetais independentemente da espécie e da idade. Neste sentido, podemos afirmar que o carbono é o elemento que além de maior presença na planta é também o que mais contribui positivamente com o poder calorífico, seguido pelo hidrogênio. Em situação oposta atua o oxigênio, o qual afeta negativamente o valor desta propriedade energética (VALE; GENTIL,2008).

De forma estrutural a madeira é um material de ampla heterogeneidade constituída quimicamente de uma mistura complexa formada basicamente por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e uma pequena fração de elementos minerais (inorgânicos) (PETTERSEN,1984), de modo que todos estes elementos podem possuir uma variação quantitativa relevante entre espécie, entre árvores da mesma espécie e dentro da própria árvore, principalmente em função da idade, de aspectos genéticos e caracteres relacionados ao ambiente de povoamento.

Apesar, da somatória de comportamentos de cada um destes componentes ser responsável pelo desempenho da madeira frente ao processo de queima, a quantificação do teor lignina é considerada como requisito fundamental para seleção de material para a produção energética, uma vez que altas quantidades deste composto acarretam em uma relação positiva com o valor poder calorífico (DEMIRBAS, 2001), este fato é devido principalmente pela alta estabilidade térmica desta macromolécula, ocasionada pelos tipos de ligações existentes, ao contrário da celulose e hemicelulose que apresentam uniões químicas com menor resistência e maior grau de instabilidade a degradação em nível de temperatura (NEVES, 2012), sendo desta maneira indesejável altos teores destes componentes para a produção de carvão vegetal (SANTOS, 2010).

Os extrativos presentes nos materiais lignocelulósicos não fazem parte da parede celular, sendo formados por componentes que podem ser extraídos da madeira por meio de solventes orgânicos e água, os principais representantes destes compostos são as resinas, terpenos, ácidos graxos, ceras, açúcares, gomas, taninos e carboidratos de baixa massa molar (PHILIPP; D'ALMEIDA,1988). A presença dos extrativos na madeira pode ser favorável à aplicação energética, observa-se que a influência destes compostos no poder calorífico é provavelmente ligada a natureza e as quantidades presentes destes elementos no lenho, entretanto de forma geral os extrativos possuem uma relação positiva com as características

energéticas da madeira por terem menores percentuais de oxigênio em sua composição (BROWNING, 1963).

Os componentes inorgânicos da madeira afetam de modo negativo o poder calórico do combustível, uma vez que não integram o processo de combustão da biomassa, sendo sua presença indesejável durante o processo de queima, pois atuam na formação de cinzas residuais (BRAND, 2010), seu conteúdo em massa é inferior a 1% para a maior parte dos materiais lignocelulósicos.

Outro aspecto fundamental para a qualificação da madeira para fins energéticos é a sua análise imediata, uma vez que este parâmetro fornece os percentuais de material volátil (MV), cinzas (Cz) e por diferença o carbono fixo (CF), sendo que estas características variáveis no vegetal influenciam na queima do combustível.

Durante a queima da madeira, conforme a temperatura do processo aumenta, vapores e outros gases são liberados da madeira, uma parte desta massa gasosa despreendida é combustível e se queima rapidamente na forma gasosa (material volátil), tendo influência nas características da chama, no acendimento e no volume necessário da fornalha. O carbono fixo é o resíduo do processo, gerado após a saída dos voláteis, formado em sua maior parte de carbono, queima-se vagarosamente na forma sólida (VALE; GENTIL, 2008), liberando energia em pontos mais próximos da região da combustão. As cinzas correspondem ao material mineral residual que permanece após a combustão completa da madeira, são compostas basicamente de óxidos, estas se comportam de forma abrasiva podendo, por vezes, causar problemas de corrosão em equipamentos metálicos utilizados para a queima da biomassa (BRITO, 1979).

Desta maneira, combustíveis com menores teores de materiais voláteis e altos valores em relação ao carbono fixo tendem a ter maior tempo de queima nas fornalhas pelo processo de combustão ocorrer de forma mais lenta (BRAND, 2010). Neste contexto, segundo estudo realizado por Trugilho et al. (2001) para verificação do efeito da temperatura nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril L.*), foi possível observar uma correlação positiva entre o poder calórico e o aumento do teor de carbono, ao passo que esta relação torna-se negativa com o teor de materiais voláteis.

As propriedades físicas da madeira, também fazem parte da qualificação da madeira frente a produção de energia, neste sentido o teor de umidade nos materiais lignocelulósicos é considerado como o fator de maior influência durante a queima dos combustíveis (SOUZA, 2010). Devido ao caráter higroscópico da madeira, tal propriedade possui uma ampla variação no material lenhoso, podendo variar entre espécies, fatores climáticos e condições de estocagem, contudo buscando a eficiência energética os valores da umidade devem

permanecerem abaixo de 25% (FARINHAQUE, 1981), uma vez que quanto maior a quantidade de água presente na madeira maior será o gasto de calor oriundo da combustão para evaporá-la, diminuindo o poder calórico do material. Além, da baixa eficácia energética altos volumes hídricos acarretam em maiores custos com o manejo e transporte da biomassa.

O teor de umidade requerido para o uso energético da biomassa depende muito das dimensões da instalação que vai queimá-la. Segundo Kofman (2006), para as pequenas instalações, ou seja, para as famílias individuais ou edifícios que consomem até 250 kW, são necessários cavacos de madeira secos a teores de umidade máximos de 30%, enquanto que para instalações, tais como caldeiras de aquecimento em hotéis e grandes edifícios com consumo de até 500 kW materiais com até 40% podem ser usados. Segundo o autor, as grandes instalações, como plantas de mais de 1 MW são geralmente menos exigentes em teor de umidade e mais exigentes em homogeneidade, uma vez que as caldeiras são ajustadas a certos teores de umidade e se houver mudanças significativas na umidade da biomassa o equipamento deve ser reajustado.

Outra propriedade física importante para a caracterização da potencialidade energética dos materiais lenhosos é a densidade da madeira, esta propriedade de alta herdabilidade e de fácil determinação, possui relação com a produção de matéria seca pelo vegetal, de maneira que altos valores da densidade básica favorecem o processo de queima energética, uma vez que madeiras densas apresentam maiores concentrações de massa por volume (CINTRA, 2009), além de possuírem comumente uma composição química mais estável por consequência da maior maturidade associadas as árvores, tal fato favorece a produção de produtos energéticos, como o carvão vegetal com maior densidade, atributo que gera vantagens em sua aplicação (SANTOS, 2010).

Assim, de forma geral madeiras com maior densidade apresentam poder calorífico por unidade de peso aproximadamente igual aos materiais lenhosos menos densos, entretanto maiores densidades garantem o maior poder calorífico por unidade de volume (PEREIRA et al., 2000).

2.4 O USO DA GEOESTATÍSTICA

Por definição a ciência da geoestatística pode ser considerada como uma subárea da Estatística a qual abrange o estudo das variáveis regionalizadas, sendo estas descritas como qualquer variável dependente do espaço, as quais apresentam além do caráter aleatório um caráter estrutural. Desta maneira, os métodos geoestatísticos criam subsídios para o

entendimento da aparente aleatoriedade dos dados, os quais, no entanto, apresentam uma possível estruturação no espaço, ou seja, uma função de correlação espacial (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Neste âmbito, as ferramentas da geoestatística admitem que a distribuição das diferenças das variáveis entre pares de pontos amostrados é a mesma para toda região abordada no espaço, sendo este caráter dependente unicamente da distância e orientação dos pontos amostrais (CLARK, 1979). Assim, espera-se que, em média, maiores semelhanças sejam descritas entre amostras mais próximas em relação ao tempo e espaço do que aquelas mais distantes dentro do segmento espacial (ORTIZ, 2002).

Desta maneira, o ponto de partida para os estudos geoestatísticos são as amostras, uma vez que a partir do conjunto de observações é possível estimar as propriedades do fenômeno espacial requerido, destacando que para tal inferência as incertezas estão associadas a estimativa. O fenômeno espacial representa a população a qual a amostra está inserida e este é responsável pela definição da distribuição e variabilidade espaciais de uma variável dentro de um dado domínio 2D ou 3D (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

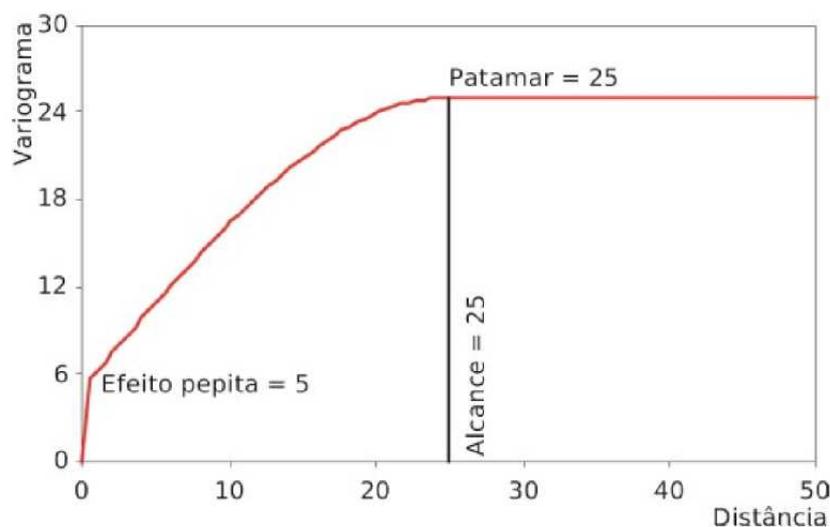
A interpolação espacial, ou seja, a reprodução dos aspectos do fenômeno espacial com base na amostragem, permite que pontos que não foram amostrados tenham seus valores estimados, por meio de uma função de correlação espacial entre os dados, sem viés e com mínima variância (VIEIRA, 2000).

As estimativas geoestatísticas fazem o uso da função variograma, a qual mede a variância entre pontos separados por uma distância h , de maneira que quanto maior o distanciamento maior são as diferenças entre os mesmos e por consequência maior a variância, expondo desta forma o grau de semelhança entre os segmentos adjacentes (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Frequentemente, a variância descrita no semivariograma se estabiliza, a partir de uma certa distância, em torno de uma variância máxima denominada patamar, entretanto existem casos em que a variância continua aumentando indefinidamente com o distanciamento, caracterizando os variogramas sem patamar (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Os parâmetros típicos de um variograma com patamar (Figura 1) são o alcance, o qual determina o limite da dependência espacial estando associado aos princípios de correlação espacial e o efeito pepita gerado pela variância aleatória, refletindo as incertezas ocorridas principalmente pela falta de conhecimento da distribuição no espaço da variável abordada (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Assim, o comportamento espacial de uma variável é definido pela forma como o variograma aumenta com a distância até o alcance (VIEIRA, 2000)

FIGURA 1: Propriedades de um semivariograma com patamar



Fonte: Yamamoto; Ladim, 2013

Contudo, para que haja dependência espacial para uma variável avaliada é preciso que o variograma seja crescente com o distanciamento e estabilizar-se no valor da variância dos dados, após seu crescimento com a distância (GREGO, et al., 2014).

Neste contexto, o semivariograma representa um gráfico para qual uma função contínua deve ser ajustada (GREGO, et al., 2014), visando a descrição da variabilidade espacial existente nos dados avaliados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Este processo abrange o ajuste e seleção do melhor modelo da função de semivariância e representa a etapa mais importante dos estudos da geoestatística, sendo essenciais para a execução da Krigagem, uma vez que auxiliam na compreensão dos aspectos estruturais da correlação espacial (ALVES, et al., 2008).

Assim, após a evidência da dependência espacial da variável analisada por meio do ajuste do semivariograma, valores para qualquer localidade não amostrada podem ser estimados pelos valores adjacentes interdependentes, através do método interpolador da Krigagem, o qual apresenta estimativas não tendenciosas e com variância mínima associada ao valor estimado (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Posteriormente ao processo da interpolação por Krigagem os resultados gerados são espacializados, gerando mapas precisos com base na dependência espacial (GREGO et al., 2014), os quais auxiliam na melhoria dos sistemas de planejamento, gerenciamento e organização de vários segmentos como os relacionados com os setores agrônômicos e florestais.

2.5 AMOSTRAGEM DE CAVACOS

As técnicas de amostragem permitem a análise de populações de interesse, a partir da abordagem de unidades de amostras, definidas como subconjuntos da população, de forma que por meio da execução desta ferramenta é possível a obtenção de dados com maior agilidade e menores custos, uma vez que a avaliação de todos os elementos populacionais é praticamente inviável (DONATO, 2013). Contudo, é preciso que o foco principal da amostragem seja a representatividade do conjunto (CORREA, 2006), ou seja, que as amostras expressem a partir da sua verificação o comportamento de toda a população.

Neste contexto, a forma de amostragem de biomassa na forma de cavacos deve permitir o estabelecimento de um número ideal de amostras associadas a um erro admitido, com a finalidade de captar a variabilidade das características e consequentemente representar toda a população.

Entre as escassas metodologias de amostragem para a determinação do teor de umidade em pilhas de cavacos de madeiras para fins energéticos se destaca o protocolo desenvolvido pela Instituição British Standards Institution (2011) no Reino Unido para análise do teor de umidade em biomassa com potencialidade energética. Este método reconhece a necessidade de amostragens ao longo de toda a pilha de armazenamento, uma vez que a variação da propriedade física abordada é ampla em todas as regiões da mesma. Segundo, esta sistemática britânica de amostragem é preciso no mínimo de cinco amostras, as quais devem ser retiradas dos segmentos da base, do meio e do topo das pilhas de cavacos, descartando o material presente nos 30 centímetros iniciais da estrutura de armazenamento, já que os mesmos são mais susceptíveis a uma carga adicional de umidade e serem contaminadas pelo solo. Todavia, o número de amostras é dependente da quantidade de biomassa a ser analisada, sendo que em lotes maiores de 15 toneladas, a cada 5 toneladas adicionais é necessário a retirada de mais uma amostra a partir da base da pilha, porém tal metodologia não se aplica a quantidades superiores a 30 toneladas.

Em função da alta variabilidade do teor de umidade em pilhas de cavaco, principalmente quando estas estão sujeitas diretamente as condições ambientais, a norma se mostra simplificada e pouco representativa, não levando em consideração a distância ideal entre as amostras. O ideal para que a amostragem forneça resultados representativos da pilha é que seja mais intensiva tanto entre pilhas quanto dentro de pilhas, no entanto, isso implica em uma maior demanda por tempo e custo. Neste sentido, a aplicação de técnicas geoestatística, representa um

importante aliado, uma vez que a partir de conjunto de observações torna-se possível por meio de estudos de distribuição e variabilidade espaciais caracterizar espacialmente esta variável de interesse, incluindo a determinação das incertezas associadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A inferência espacial baseia-se em pontos amostrais sendo comumente denominada de interpolação, sua aplicação possibilita por meio de ajustes matemáticos locais ou globais a estimativa de pontos não amostrados, sendo sua qualidade atrelada ao tamanho da amostra e da distribuição dos pontos amostrais (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Neste âmbito, a Krigagem método de interpolação geoestatística, permite estimar valores de pontos não amostrados sem tendência e com reduzida variância, a partir da dependência espacial entre segmentos vizinhos, a qual é expressa por meio do semivariograma (TRANGMAR, et al., 1985).

Atualmente, as ferramentas geoestatística possuem ampla aplicabilidade em vários ramos da ciência, especialmente destacam-se na área florestal, como no estudo conduzido por Pelissari (2015) em povoamentos de *Tectona grandis* L.f., no qual a geoestatística foi utilizada com a finalidade de modelar e mapear a variabilidade espacial da produção dos plantios de teca, sendo possível por meio das análises a identificação das correlações espaciais existentes entre as variáveis dendrometrias, possibilitando a descrição e modelagem da relação hipsométrica, da capacidade produtiva do sítio e do volume do plantio da espécie. Outro exemplo da atuação da estatística espacial no segmento madeireiro, foi o trabalho executado por Lima et al. (2006) no qual pode-se concluir a aplicabilidade dos métodos geoestatístico para predição do padrão espacial da dureza da espécie florestal paraju (*Manilkara* sp), sendo que a utilização desta técnica possibilitou a determinação da distância ideal entre as amostras, favorecendo os avanços na área da tecnologia da madeira para o estudo desta propriedade mecânica.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado, nas abrangências do Viveiro Florestal Carlos Alberto Martinelli de Souza pertencente a Universidade Federal de São Carlos, campus de Sorocaba/SP, entre os meses de setembro e novembro do ano de 2015. A localização geográfica da área encontra-se aproximadamente nas coordenadas geográficas 23°35'12,20" de latitude Sul e 47°31'11,70" de longitude oeste de Greenwich e altitude média de 649 metros. O clima da região é descrito como tropical quente úmido com o inverno predominantemente seco atingindo temperaturas médias inferiores a 18°C e o verão chuvoso com temperaturas médias maiores que 22°C, sendo segundo a classificação de Köppen determinado como *Cwa* nas áreas de depressão periférica e *Cwb* nas localidades de maiores altitudes. Os índices pluviométricos médios mensais são de aproximadamente 200 mm no verão e de 30 mm no inverno.

3.2 AMOSTRAGEM DOS CAVACOS NA PILHA

Foram amostrados cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* cedidos pela Empresa Salmeron, destinados exclusivamente a geração de energia. Após a produção, os cavacos foram estocados ao ar livre, e segmentados em três pilhas (Figura 2), nas quais as amostragens ocorreram nas posições axial (topo, meio e base) e lateral de forma que todas as amostras foram georreferenciadas em relação à distância do solo e do centro da pilha, nas posições norte, sul, leste e oeste.

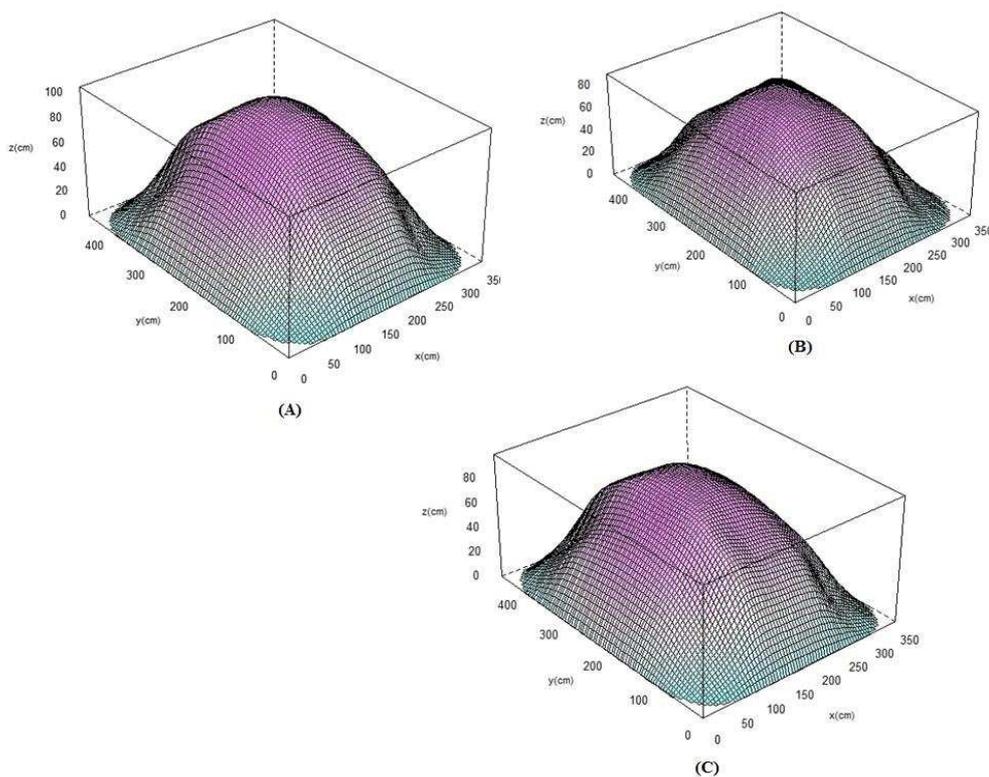
As amostras foram coletadas de pilhas em três diferentes períodos de armazenamento: sete dias (pilha 1), trinta dias (pilha 2) e sessenta dias (pilha 3) de estocagem. O número de pontos amostrais dentro das pilhas se limitou a altura e largura destas estruturas. Assim, para as pilhas com sete, trinta e sessenta dias de estocagem foram coletadas respectivamente, 174, 150 e 172 amostras de cavacos para a determinação do teor de umidade.

As estruturas de armazenagem com sete, trinta e sessenta dias de estocagem apresentavam volumes de cavacos, respectivamente, de 7,50 metros cúbicos, 6,57 metros cúbicos e 7,51 metros cúbicos com dimensões aproximadas de 4,00 metros de comprimento por 3,50 metros de largura (Figura 3), com altura de 1,00 metro para a estrutura com sete dias de armazenagem (Figura 3A) e de 80 centímetros para a pilha com trinta (Figura 3B) e sessenta dias de estocagem (Figura 3C)

FIGURA 2: Recebimento dos cavacos de madeira e formação das pilhas



FIGURA 3:(A) Gráfico referente a pilha de cavacos com sete dias de estoque; (B) trinta dias de estoque; (C) sessenta dias de estoque



Para a delimitação dos pontos amostrais, foram utilizadas hastes metálicas graduadas a cada 30 centímetros (representando a distância do solo) (Figura 4) e dispostas a cada 50 cm nas pilhas (representando a distância do centro da pilha). As amostras foram coletadas por meio da abertura de perfis nas pilhas (Figura 5A) nas posições fixas pré-determinadas pelas hastes (Figura 5B).

FIGURA 4: Hastes graduadas a cada 30 centímetros utilizadas para amostragem nas pilhas de cavacos



FIGURA 5:(A) Hastes fixas distribuídas a cada 50 centímetros na pilha representando os pontos de coletas; (B) Abertura de perfis nas pilhas de cavacos para a coleta das amostras nos pontos definidos



(A)

(B)

Para evitar a coleta de amostras vizinhas (Figura 6), estabeleceu-se um raio de segurança de 10 centímetros durante a abertura dos perfis de coleta.

FIGURA 6: Raio de 10 centímetros nos perfis com a finalidade de evitar coleta de amostras vizinhas



3.3 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS CAVACOS

As amostras coletadas foram embaladas em sacos plásticos identificados, transportadas e devidamente acondicionadas no Laboratório de Bioenergia e Materiais Lignocelulósicos da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar – Sorocaba, para posterior determinação do teor de umidade, da distribuição granulométrica, da análise química imediata e do poder calorífico.

3.3.1 Teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade utilizou-se o método gravimétrico preconizado pela norma NBR 14929 (ABNT, 2003), de maneira que as amostras coletadas nos diferentes períodos de armazenamento, foram pesadas para a determinação do peso úmido e posteriormente levadas a estufa (103 ± 2 ° C), onde permaneceram até massa constante.

3.3.2 Densidade a granel

Para a determinação da densidade a granel utilizou-se o procedimento descrito na norma NBR 6922 (ABNT, 1981), sendo a amostra composta provenientes das pilhas de cavacos dos três períodos de armazenamento.

3.3.3 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica foi feita segundo a norma NBR 7217 (ANBT, 1987). Foram utilizadas cinco peneiras com abertura de malha crescente, sendo estas: 1 polegada (25,4 mm); 3/4 polegadas (19,50 mm); 1/2 polegadas (12,70 mm); 1/4 polegadas (6,35); fundo (menor que 6,35 mm). A amostra era composta por cavacos dos três períodos de armazenamento. Após o processo de peneiramento as porções retidas em cada malha foram pesadas.

3.3.4 Análise química imediata

Para caracterização química dos cavacos de madeira foi avaliada a composição imediata dos materiais, tendo como referência a norma NBR 8112(ABNT, 1986). Foi determinado o teor de materiais voláteis, teor de cinzas e o teor de carbono fixo, a partir de amostras compostas por cavacos dos três períodos de armazenamento.

3.3.5 Poder calorífico

O poder calorífico superior dos cavacos nos diferentes períodos de estocagem foi determinado, a partir de amostras compostas por cavacos dos três períodos de armazenamento, seguindo os preceitos da norma NBR 8633 (ABNT, 1984), por meio do calorímetro digital modelo IKA C-200.

3.4 ANÁLISE EXPLORATÓRIA

Na análise descritiva dos dados da umidade das pilhas de cavacos em diferentes períodos de estocagem, foram determinadas as seguintes estatísticas: média, coeficiente de variação, valor de mínimo e máximo.

3.5 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

De posse dos valores de umidade em cada ponto amostral, considerando os quatro quadrantes (norte, sul, leste e oeste) e as diferentes posições longitudinais e laterais foi possível, com a técnica da geoestatística, verificar a variabilidade espacial da característica estudada nas pilhas com base na análise de semivariogramas ajustados pelo o pacote Gstat (PEBESMA, 2004) do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016), utilizando a krigagem ordinária como método interpolador.

Os ajustes foram realizados pelo método dos mínimos quadrados ponderados, o qual consiste na adoção da divisão do erro quadrático médio pelo número de pares de pontos em cada distância no semivariograma, acarretando na ponderação da semivariância, uma vez que a ponderação pela variância das estimativas não é conhecida. Desse modo, o método consiste em minimizar a função dada pela Equação 01 (DAVID, 1977).

$$Q(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^k [g(h_j) - y(h_j; \theta)]^2}{m(h_j)} \quad (01)$$

Em que θ representa o vetor de parâmetros estimados que definem o semivariograma, sendo cada estimativa denotada por $g(h_j)$, k refere-se ao número de “lags” do semivariograma. A quantidade $y(h_j; \theta)$ é a semivariância calculada pelo modelo e depende dos parâmetros estimados θ e, após minimização, a função se torna a estimativa de quadrados mínimos. Pares de pontos em cada distância no semivariograma $m(h_j)$ (DAVID, 1977).

A função de correlação utilizada foi modelo exponencial, conforme apresentado na Equação 02:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right), 0 < |h| < d \quad (02)$$

Em que $\gamma(h)$ é a correlação entre pares de pontos separados pela distância h , de forma que d representa a distância máxima na qual o semivariograma é definido. O modelo exponencial apresenta um comportamento linear na origem, atingindo o patamar assintoticamente, com o alcance definido como a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar ((ISAACS & SRIVASTAVA, 1989)

A análise dos semivariogramas experimentais ajustados permitiu a definição dos parâmetros efeito pepita (C_0), alcance da dependência espacial (a), patamar (C), contribuição (C_1) e grau de dependência espacial das amostras (C_0/C).

Para analisar o grau da dependência espacial, foi considerada a classificação para atributos do solo proposta por Cambardella et al., (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca quando for maior que 75%.

Os semivariogramas e mapas tridimensionais gerados foram ajustados aos valores de umidade em cada período de umidade estabelecido no presente estudo, visando gerar subsídios para o manejo das pilhas em campo e pátios de secagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE

A Tabela 1 apresenta as médias, os coeficientes de variação e os valores mínimo e máximo dos teores de umidade das pilhas de cavacos de *Eucalyptus grandis* durante sete (pilha 1), trinta (pilha 2) e sessenta (pilha 3) dias de estocagem.

TABELA 1- Valores da média, do coeficiente de variação, das quantificações mínima e máxima dos teores de umidade nas pilhas de cavacos durante cada período de estocagem

Pilha	Umidade Base Seca (%)	Umidade Base úmida (%)	Coeficiente de variação (%)	Valor Mínimo (%)	Valor Máximo (%)
1	111,21	49,04	45,46	11,05	183,54
2	110,45	46,97	56,47	10,30	225,28
3	178,62	61,21	34,86	13,81	284,29

Os teores de umidade dos materiais armazenamento são próximos ao valor médio descritos por Nyström (2006) para cavacos de madeiras recém processados de diferentes espécies e tamanhos provenientes de resíduos florestais ou industriais, para estes o valor do teor de umidade pode variar de 10% a 65%, no entanto verifica-se que em maioria o valor médio desta propriedade encontra-se entre 45% a 55%.

Valores semelhantes ao teor de umidade do presente trabalho também foram obtidos em análises realizadas por Ceragioli (2013) em cavacos recém-produzidos, provenientes de madeira de quatro clones do híbrido de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*, no qual obteve-se teor de umidade de 53,89%(base úmida). Estudos realizados por Furtado et al. (2012) com cavacos de madeira de *Pinus* sp., gerados da conversão de costaneiras, refilos e destopos, obteve valor médio de umidade para os materiais particulados com casca de 54% base úmida.

Contudo, os teores de umidade apresentados neste estudo são superiores aos obtidos em trabalhos conduzidos por Thörnqvist et al., (1990) na Suécia com resíduos madeiros em forma de cavacos armazenados em pilhas ao ar livre sem ventilação externa com dimensões de 90 metros de comprimento, 14 metros de largura e 7 metros de altura. Nesta pesquisa, pode-se observar que para o material particulado armazenado no verão com aproximadamente 7,5 dias

obteve-se teor de umidade inicial de 38,8% com variação durante o armazenamento de -0,4%; para o material estocado por 30 dias o teor de umidade inicial foi de 32,8 % com variação durante o armazenamento de -2,9%; já os cavacos de madeira armazenados por sessenta dias o valor inicial da umidade foi de 35,7% com variação ao longo da estocagem de -3,7%.

No entanto, esta discrepância de valores é gerada pelo fato do teor de umidade em combustíveis madeireiros particulados ser afetado principalmente pelas condições climáticas regionais, pelo tamanho das partículas e pelo método de armazenamento dos materiais (ERIKSSON, 2011).

Neste sentido, percebe-se pela Tabela 1 que houve um aumento de 60% no teor de umidade médio das pilhas de sete para sessenta dias de estocagem. Este resultado é devido às fortes chuvas ocorridas no período de armazenamento.

O teor de umidade é uma propriedade que sofre interferência das condições climáticas do ambiente, de forma que o processo de secagem é dependente de fatores conectados a localidade de armazenamento como temperatura, umidade relativa, velocidade dos ventos, precipitação bem como a estação do ano escolhida para estocagem da biomassa (ANDERSSON et al., 2002), podendo estas ações temporais interferirem em diferentes graus na escolha do período ideal de armazenagem para que a biomassa atinja as condições ideais para a geração energética.

Observa-se pela Figura 7A que as chuvas ocorridas durante o período de estocagem dos cavacos, entre os meses de setembro e novembro, foram intensas e maiores do que os valores médios mensais previstos, sendo estas concentradas principalmente entre o final do mês de outubro e início do mês de novembro, com precipitações variando entre 3mm e 57 mm diários (Figura 7B).

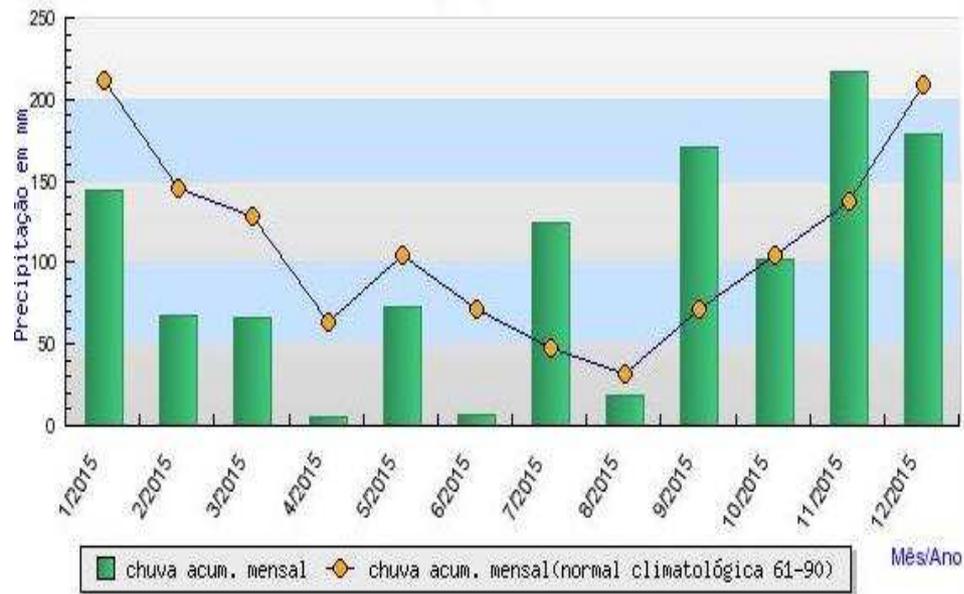
Este fato afetou de forma significativa os teores de umidade da madeira estocada, principalmente na pilha com sessenta dias de armazenamento, visto a alta precipitação acumulada durante todo o tempo de exposição da estrutura as condições temporais do ambiente

Em estudos conduzidos por Afzal et al. (2010), em biomassa de *Betula papyrifera* na forma de cavacos, observou-se que em pilhas armazenadas sem cobertura e expostas as condições ambientais durante 12 meses, o valor do teor de umidade aumentou continuamente durante todo o período de estocagem, ocasionado o acréscimo desta propriedade de 59% para 160% (base seca).

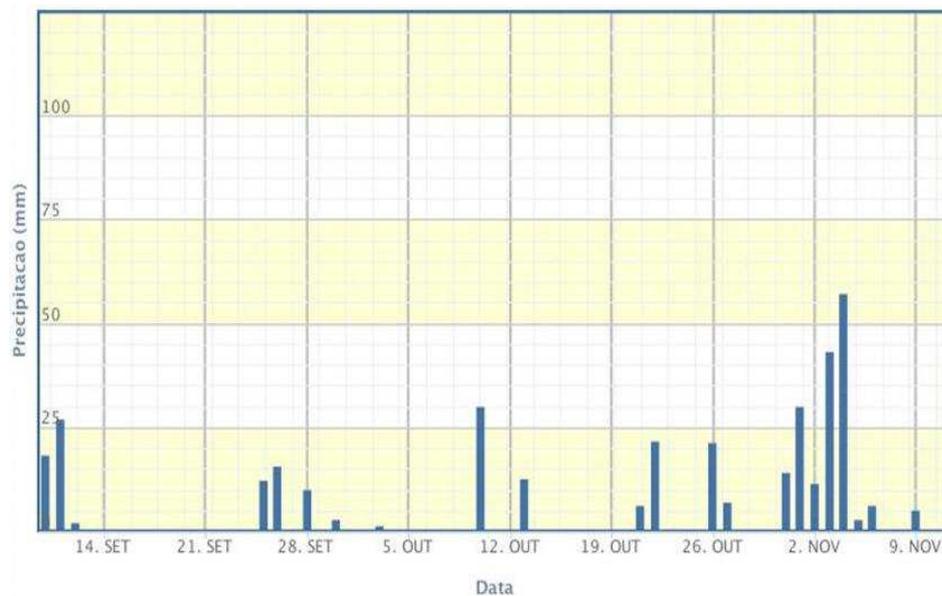
Observar-se pela análise dos coeficientes de variação que o teor de umidade apresenta uma alta variabilidade durante os períodos de estocagem, a alta quantificação deste atributo

pode ser explicada pela alta interação existente entre a umidade das pilhas de cavacos e as condições do ambiente, notadamente com a precipitação.

FIGURA 7: (A) Chuva Acumulada Mensal x Chuva (Normal Climatológica 61-90) para a cidade de Sorocaba durante o ano de 2015; (B) Gráfico de precipitação entre os meses de setembro e novembro do ano de 2015 na cidade de Sorocaba



(A)



(B)

Fonte: INMET, 2015

A interação entre o teor de umidade e as chuvas pode ter sido intensificada pelo tamanho da biomassa, uma vez que esta característica tem ação direta no comportamento do material frente a intensidade de modificações ocorridas em suas propriedades químicas, físicas e energéticas ao longo do período de armazenamento. De maneira, que quanto menor as dimensões das partículas maior a amplitude dos efeitos destas variações (BRAND et al., 2014).

O tempo de estocagem neste estudo não foi o suficiente para a secagem significativa dos cavacos armazenados do ponto de vista energético, devido a influência dos altos índices pluviométricos locais, assim para esta situação recomenda-se o armazenamento dos materiais particulados nos meses mais secos, ou seja, entre o final do outono e início do inverno. A menor exposição dos cavacos as condições ambientais, em função da época de estocagem, poderiam reduzir o tempo de armazenamento do material madeireiro no campo, facilitando o processo de manejo.

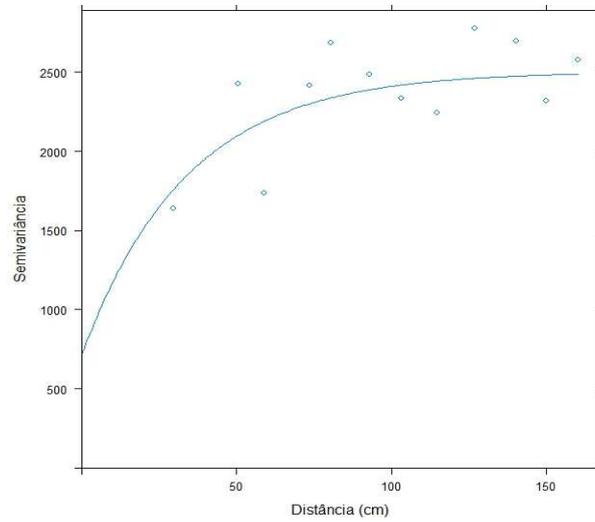
Outra solução viável, a fim de evitar a ampla interação entre o teor de umidade e as precipitações regionais, buscando atingir saldos energéticos positivos, seria a cobertura das estruturas de armazenamento. Entretanto, segundo estudos conduzidos por Pari et al., (2015) em cavacos armazenados de madeira de Álamo com tamanhos uniformes é possível verificar que a cobertura da pilha não induz a melhorias significativas na qualidade final do material estocado, no entanto os materiais alojados em tais estruturas apresentam poder calorífico inferior ligeiramente maior em relação ao material descoberto.

Contudo, o efeito da cobertura nas pilhas é dependente das condições climáticas regionais, em países como Irlanda e Finlândia cobrir as estruturas de armazenamento durante o período úmido que abrange o inverno e outono tem um efeito significativo no teor de umidade dos materiais estocados (NURMI; HILLEBRAND, 2007).

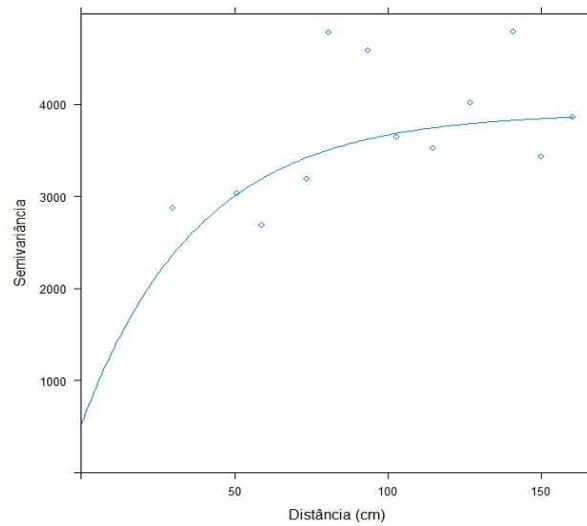
4.2 ANÁLISE DA CONTINUIDADE ESPACIAL

A Figura 8 A, B e C apresenta o semivariograma ajustado para a análise da dependência espacial entre os pontos amostrais da pilha de cavacos com sete, trinta e sessenta dias de armazenamento, respectivamente.

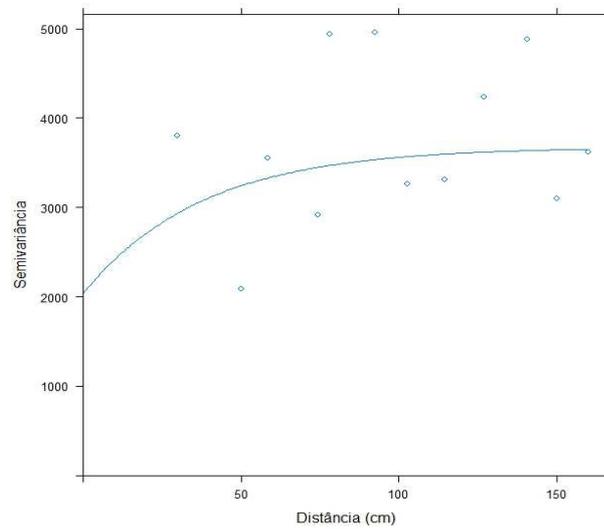
FIGURA 8:(A) Semivariograma referente a pilha de cavacos com sete dias de estoque; (B) trinta dias de estoque;(C) sessenta dias de estoque



(A)



(B)



(C)

Pela análise do semivariograma foi possível a obtenção de parâmetros como alcance, patamar, efeito pepita ou "nugget" (tausq), sendo estas informações necessárias para a interpolação dos dados amostrais (Tabela 2).

TABELA 2- Parâmetros obtidos pelo ajuste das funções de modelo exponencial do semivariograma experimentais definidos para a pilha de cavacos aos sete (pilha 1), trinta (pilha 2) e sessenta (pilha 3) dias de estocagem

Pilha	C	C_0	C_1	a	GDE
1	1784,77	718,04	1066,73	101,43	0,40
2	3389,39	522,29	2867,10	113,73	0,15
3	1636,15	2038,98	-402,83	**	1,25

C_0 = efeito pepita; C = patamar; C_1 = contribuição = $C - C_0$; a = alcance (cm); GDE = grau de dependência espacial; **= valor não estimado.

A partir da observação do efeito pepita, indicado pelo valor na interceptação do eixo Y do semivariograma, nas pilhas 1 e 2 com respectivamente sete e trinta dias de estocagem, verifica-se que a proporção de sua estimativa é menor em relação ao patamar (Tabela 2), fato que indica a existência de dependência espacial dos valores de umidade dos cavacos de madeira estocados durante este período de armazenamento. Este resultado sugere que a geoestatística é uma ferramenta útil, em função da correlação espacial, para a determinação da distância ideal entre amostras do teor de umidade em pilhas de cavacos de madeira.

Entretanto, na pilha 3 com sessenta dias de armazenamento pode-se observar que a estimativa do valor do efeito pepita é maior do que o valor obtido para o patamar (Tabela 2), fato que ocasiona maior variância da estimativa, uma vez que quanto maior o efeito pepita maior a variabilidade, e por consequência menor a dependência espacial de um atributo (VIEIRA et al., 1983), de forma que a amostragem nas pilhas de cavacos em função do teor de umidade se torna insuficiente para este nível de variabilidade espacial.

Outro importante fator para a interpretação do semivariograma é a determinação do alcance, uma vez que representa a distância iniciada na origem e continua até a extensão na qual o patamar atinge valores estáveis, sua determinação expressa a distância onde os pontos amostrais passam a não estarem correlacionados espacialmente entre si, ou seja, onde tornam-se aleatórios (LANDIM, 2006). A partir dos resultados gerados para o alcance (Tabela 2), observa-se que a distância mínima entre as amostras de cavacos na pilha com sete dias de

estocagem é de 101,43 cm, já para a estrutura com trinta dias de armazenamento a amostragem deve ocorrer a cada 113,73 cm, uma vez que até essas estimativas há dependência espacial dos valores do teor umidade dos cavacos.

A contribuição é a área do semivariograma onde há dependência espacial e é determinada pela diferença entre o patamar e o efeito pepita, sua abrangência possui dependência espacial. O caráter negativo deste parâmetro evidenciado na pilha 3 indica a baixa correlação espacial, devido ao caráter aleatório das unidades amostrais do teor de umidade dos cavacos, assumido provavelmente devido aos altos índices pluviométricos durante os sessenta dias de estocagem do material, fato que acarretou na homogeneização dos valores dos teores de umidade, ocasionando a menor variância da estimativa.

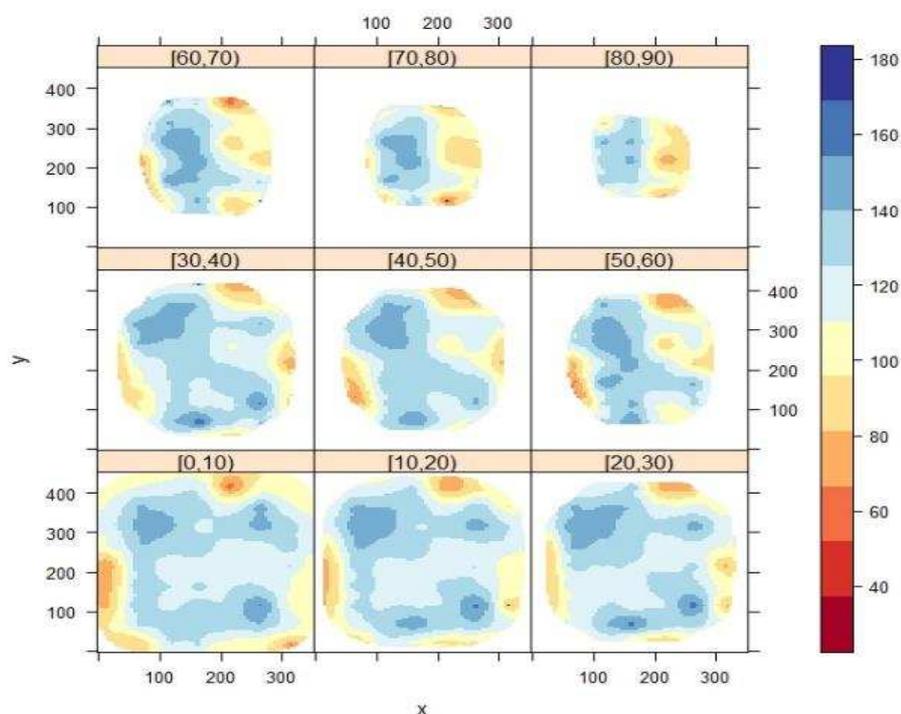
Com os valores dos parâmetros do semivariograma definidos (Tabela 2), pode-se calcular o grau de dependência espacial (GDE), pela razão entre o efeito pepita e o patamar. Segundo, a classificação Cambardella *et al.* (1994) o grau de dependência obtido para a pilha aos sete dias de armazenamento é moderado, uma vez que se encontra entre a faixa de valores maiores ou iguais a 0,25 e menores do que 0,75. Para a pilha com trinta dias de estocagem o grau de dependência espacial é considerado como forte, uma vez que o efeito pepita é menor do que 25% do patamar, contudo para a pilha com sessenta dias de armazenagem a dependência espacial é dita como fraca, sendo a relação entre o efeito pepita e o patamar maior do que 75%.

Em pesquisa desenvolvida por Lima *et al.* (2006), o qual utilizou a geoestatística na mensuração da variabilidade espacial da dureza em peças de madeira de Paraju, foram obtidos valores de GDE entre 0,5 e 0,3, resultando em dependência espacial moderada.

A Figura 9 ilustra o gráfico obtido pelos valores de umidade dos cavacos com sete dias de estocagem interpolados via Krigagem a partir do ajuste do modelo exponencial.

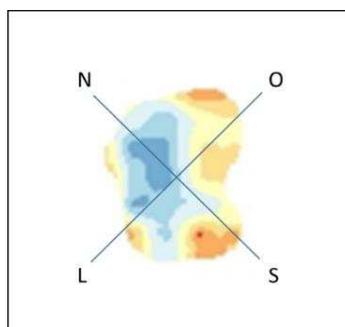
Pela constatação visual do gráfico ilustrado na Figura 9 pode-se perceber que, como esperado, por ser tratar de um curto período de estocagem, a variação do teor de umidade é alta. Verifica-se a clara tendência de redução dos valores de umidade da base para o topo da pilha e da região central para a periferia.

FIGURA 9: Gráfico da pilha de cavacos com sete dias de estoque, demonstrando a variação da umidade a cada 10 centímetros de altura da estrutura de armazenamento



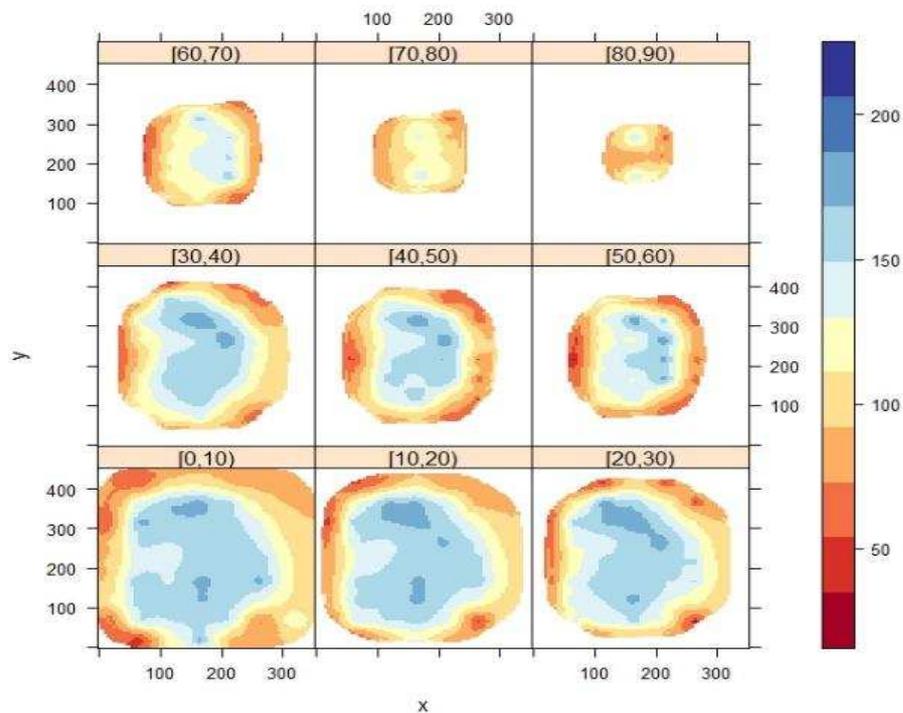
Entretanto, observar-se a tendência de maior redução da umidade na pilha na face voltada para o oeste, conforme destacado na Figura 10, em decorrência de ser esta a região da estrutura sujeita aos ventos predominantes na área.

FIGURA 10: Distribuição da umidade na pilha referente a região de amostragem de 80 centímetros nos sentidos norte-sul e Leste-Oeste



A Figura 11 ilustra o gráfico obtido pelos valores de umidade dos cavacos com trinta dias de estocagem interpolados via Krigagem a partir do ajuste do modelo exponencial.

FIGURA 11: Gráfico da pilha de cavacos com trinta dias de estoque, demonstrando a variação da umidade a cada 10 centímetros de altura da estrutura de armazenamento

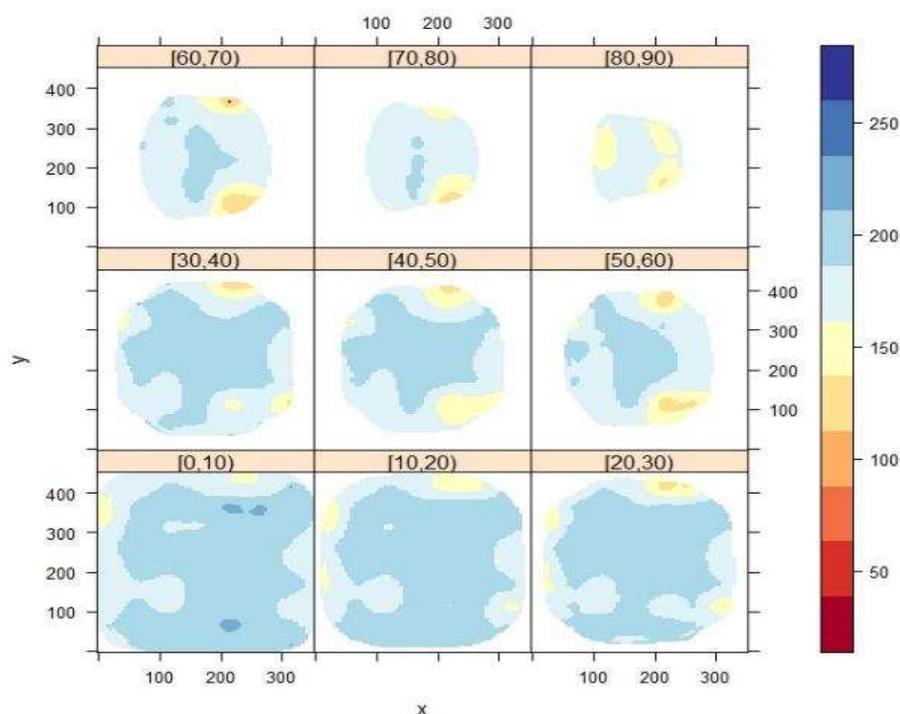


Pela análise visual do gráfico ilustrado na Figura 11 pode-se verificar a existência de classes de teor de umidade mais definidas aos trinta dias de estocagem quando comparada com a pilha com sete dias de armazenamento.

Observar-se que o padrão de variação do teor de umidade nas pilhas de cavacos com trinta dias de armazenamento permanece semelhante ao obtido na pilha com sete dias de estocagem, ou seja, os maiores valores da umidade são obtidos na área da base e na região central da estrutura. Contudo, a secagem aos trinta dias ocorre de forma mais homogênea e sem efeitos significativos dos ventos predominante da área de estudo.

A Figura 12 ilustra o gráfico obtido pelos valores de umidade dos cavacos com sessenta dias de estocagem interpolados via Krigagem a partir do ajuste do modelo exponencial. Pela análise visual do gráfico ilustrado na Figura 12 é possível verificar que aos sessenta dias de estocagem houve um significativo aumento do teor de umidade devido aos altos índices pluviométricos acumulados durante o período de armazenamento. Observa-se que aos sessenta dias de estocagem não existe mais um padrão estabelecido para a variação do teor de umidade, de maneira que a maior parte da pilha expõe altos valores desta propriedade física. Pode-se visualizar que a umidade do ambiente penetrou em toda extensão da pilha, provocando o umedecimento, inclusive das partes já secas.

FIGURA 12: Gráfico da pilha de cavacos com sessenta dias de estoque, demonstrando a variação da umidade a cada 10 centímetros de altura da estrutura de armazenamento.



O mapeamento do teor de umidade nas pilhas, traz informação prática dos pontos amostrais que representam verdadeiramente a média da propriedade na estrutura, servindo de subsídio para amostragens representativas da pilha. Além disso, a geoestatística permite a visualização do padrão de variação da umidade dos cavacos na pilha, importante informação para a utilização energética no emprego em caldeiras, uma vez que para isso o combustível deve ter teor de umidade baixo e constante.

4.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS ENERGÉTICOS

4.3.1 Densidade a granel

O valor médio da densidade a granel dos cavacos de madeira foi de $0,2119 \text{ g/cm}^3$. Pode-se verificar que a densidade a granel média dos cavacos de madeira apresenta-se com maior valor quando comparado a resultados de estudos como de Grande (2012) em cavacos industriais de eucalipto, no qual observou-se estimativas médias para esta propriedade entre $0,111 \text{ g/cm}^3$ e $0,183 \text{ g/cm}^3$; pesquisas de Souza et al. (2002) relacionada com a variação da densidade a granel de cavacos de *Eucalyptus saligna* em função das suas dimensões e da umidade obtiveram

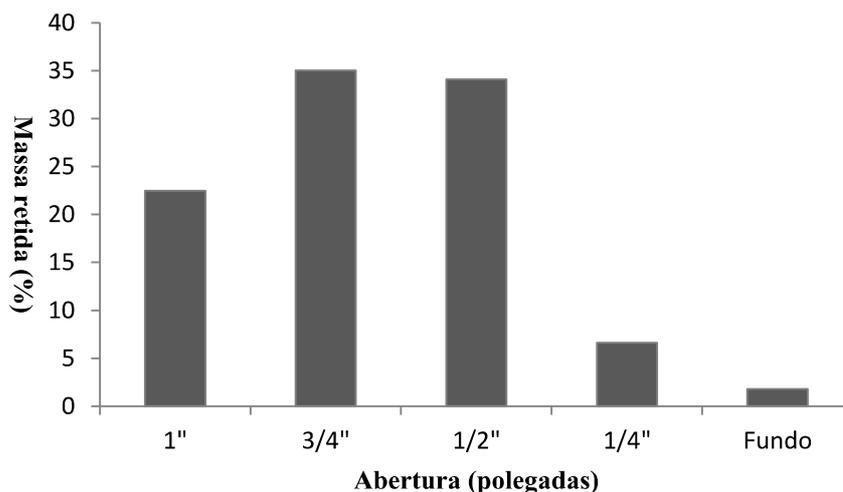
valores para esta propriedade executada de forma padrão de $0,158 \text{ g/cm}^3$ para cavacos classificados como normais (espessuras entre 2 e 8 mm).

O valor da densidade a granel em cavacos pode ser influenciado pela umidade, densidade básica e pela granulometria do material madeireiro (GRANDE, 2012), desta forma a maior estimativa desta propriedade neste estudo podem estar correlacionadas com a maior densidade básica da madeira atrelado a uniformidade e maiores dimensões dos cavacos. O maior valor desta propriedade acarreta em uma relação positiva com o poder calorífico em função do volume de material lenhoso a ser queimado.

4.3.2 Granulometria

A Figura 13 representa a distribuição granulométrica dos cavacos estudados, por meio desta análise observou-se que o maior percentual de massa de madeira retida foi de aproximadamente de 35,02% na granulometria de 3/4 de polegadas (19,50 mm) seguida por 34,09% na granulometria de 1/2 polegada (12,7 mm); 22,46% na granulometria de 1 polegada (25,4 mm); 6,64% na granulometria de 1/4 de polegada (6,35 mm); e por fim 1,79% referente ao fundo das peneiras (abertura menor que 1/4 de polegada).

FIGURA 13: Distribuição granulométrica dos cavacos de madeira



A classificação granulométrica permite o conhecimento das dimensões dos cavacos de madeira, fato que auxilia na previsão dos saldos energéticos obtidos durante o processo de combustão bem como na qualidade do escoamento das partículas madeireiras pelos sistemas de

alimentação. Partículas de madeira superdimensionadas podem causar o entupimento dos sistemas de produção energética, assim como pequenos segmentos de cavacos, pela queima acelerada, podem acarretar a variação de calor nas câmeras durante a combustão e a geração de altos teores de cinzas (GRUNKRAUT, 2012).

Segundo estudos de Ceragioli et al. (2012) para a avaliação de um picador estacionário de árvores em função da granulometria do eucalipto, considerou que materiais particulados com dimensões entre 45-16 mm são os indicados para a produção energética, uma vez que esta granulometria é considerada média, fato que dificulta os problemas de homogeneidade durante o processo de queima. Verifica-se que 57,48% dos cavacos analisados neste estudo enquadram na granulometria média, ideais para os processos de obtenção energéticos.

Contudo, Kofman (2006) descreve que o tamanho ideal dos cavacos é dependente do tamanho da caldeira de queima, sendo que para as pequenas caldeiras (<250 kW) um tamanho entre 8-15 mm deve ser requerido, evitando lascas irregulares ou superdimensionadas; já as caldeiras de maior tamanho (> 1 MW) o tamanho dos cavacos de 25 a 35 mm é geralmente necessário.

4.3.3 Análise química imediata e poder calorífico

Os valores médios percentuais das características energéticas, teor de cinzas, teor de voláteis, carbono fixo e poder calorífico dos cavacos de madeira estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3- Valores médios dos parâmetros da análise química imediata e do poder calorífico nos cavacos de madeira

Materiais voláteis	Teor de cinzas	Carbono fixo	Poder calorífico
(%)	(%)	(%)	(Kcal/Kg)
82,99	1,38	15,63	4033,15

As médias de teor de voláteis, carbono fixo e teor de cinzas se enquadram aos valores obtidos para estas propriedades apresentados em estudos de caracterização de madeira e casca de espécies do gênero *Eucalyptus* como em experimentos executados por Brito et al. (1978), o qual obteve valores para as substâncias voláteis de 74,1% a 89,9% para madeira e intervalos entre 76,1% a 84% para casca, variações entre 9,6% a 24,3% para o carbono fixo da madeira

e medidas entre 14,4% a 17,7% para casca, já as cinzas variaram para a madeira entre 0,30% a 0,53% e para casca os valores situaram-se entre as faixas de 1,34% a 6,14%.

Valores próximos também foram observados em estudos de Ferreira et al. (2014) com cavacos para estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos, nesta pesquisa encontrou-se quantificações médias de $14,8 \pm 0,23\%$ para carbono fixo, $84,2 \pm 0,23\%$ para materiais voláteis e $1,0 \pm 0,13\%$ para teor de cinzas.

Pode-se verificar que a estimativa do poder calorífico em cavacos de madeira apresenta-se dentro da variação relatada por Brito (1993) de 3500 kcal/kg a 5000 kcal/kg para espécies folhosas. Contudo, valores superiores desta propriedade são obtidos quando comparado a resultados de diversos trabalhos que avaliam esta característica energética em espécies do gênero *Eucalyptus*, como Quirino et al. (2005) que observou o poder calorífico variando entre 4501 Kcal/Kg a 4790 Kcal/Kg para o *Eucalyptus grandis*; Santos et al. (2011) obteve valores médios desta propriedade com variação entre 4274 Kcal/kg a 4585 Kcal/Kg para clones de eucalipto; e Vale et al. (2000) que obteve o valor médio do poder calorífico para o *Eucalyptus grandis* de 4641 kcal/kg.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados deste trabalho pode-se concluir que:

- Houve dependência espacial do teor de umidade ao longo da pilha de cavacos de madeira com sete e trinta dias de armazenamento, confirmando que o uso da geoestatística é uma ferramenta útil para a determinação da distância ideal entre amostras;
- Apesar do aumento da dependência espacial durante os trinta dias de estocagem, tal fator diminuiu com o aumento do período, devido aos altos índices pluviométricos acumulados durante os sessenta dias de exposição do material as condições ambientais, indicando que os cavacos armazenados na forma de pilhas estão sujeitos ao umedecimento mesmo nas partes mais internas da pilha;
- Em geral o material particulado de *Eucalyptus grandis* apresentou características tecnológicas satisfatórias para produção de energia;
- A partir da execução deste trabalho sugere-se que novas pesquisas sejam realizadas, buscando o manejo adequado de cavacos estocados em pilhas em função do teor de umidade e das características energéticas do material particulado. Para tanto, recomenda-se pesquisas dirigidas principalmente a verificação da época ideal e o tempo de estocagem de cavacos e aos benefícios gerados pelo uso de coberturas durante o armazenamento do material.

REFERÊNCIAS

ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico da ABRAF.2013. Ano base 2012. Brasília, DF, 142 p.

AFZAL, M.T.; BEDANE, A.H.; SOKHANSANJ, S.; MAHMOOD, W. Storage of comminuted and uncomminuted forest biomass and its effect on fuel quality. BioResources, v.1, p.55-69, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2002. 153 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Matriz energética do Brasil. Disponível em: <www.aneel.gov.br>.2016. Acesso em: 14 mar. 2016.

ALVES, M. C.; BOTELHO, S. A.; PINTO, L. V. A.; POZZA, E. A.; OLIVEIRA, M. S.; FERREIRA, E.; ANDRADE, H. Variabilidade espacial de variáveis geobiofísicas nas nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 5, p. 527-535, 2008.

ANDERSSON, G.; ASIKAINEN, A.; BJÖRHEDEN, R.; HALL, P. W.; HUDSON, J. B.; JIRJIS, R.; MEAD, D.; NURMI, J.; WEETMAN, G. Production of forest energy. In: RICHARDSSON, J.; BJÖRHEDEN, HAKKILA, P.; LOWE, A. T.; SMITH, C. T. Bioenergy from sustainable forestry, guiding principles and practice. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002, ISBN 1-4020-0676-4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6922: Carvão vegetal: determinação da densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: Madeira: determinação do teor de umidade de cavacos-Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003. 17 p.

BRAND, M.A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciencia, 2010. 131 p.

BRAND, M.A. Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem. 2007. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRAND, M. A. et al. Influência da época de estocagem na qualidade da biomassa florestal para a geração de energia. Floresta, v.42, n.2, p.369-380, 2012.

BRAND, M.A.; MUNIZ, G.I.B.; BRITO, J.O; QUIRINO, W.F. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L.e *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para a geração de energia. Revista Árvore, Viçosa, v.38, n.1, p.175-183, 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Balanco Energético Nacional 2015: ano base 2014. Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE.289p. 2015.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Testing moisture content (simple method)- Version 1.0 03/2011. Disponível em: <www.biomassenergycentre.org.uk>. Acesso em: 02 out. 2015.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. IPEF, n.16, p. 63-70, 1978.

BRITO, J.O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: VI CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., PAN AMERICANO, 1., 1993, Curitiba, Anais... Curitiba: SBS, 1993. p.280-282.

BRITO, J.O. O uso energético da madeira. Estudos avançados, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.

BRITO, J.O. Queima ou combustão da madeira para fins energéticos. Piracicaba: ESALQ/ Departamento de Silvicultura, 1979. 36 p.

BROWNING, B.L. The chemistry of wood. New York: J. Wiley & Sons, 1963.68p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. 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, v. 58, n. 2, p. 1501-1511, 1994.

CANTO, J.L. Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia. 2009. 139 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. Cana-de-açúcar no Brasil. Instituto de Eletrotécnica e Energia- IEE. Universidade de São Paulo. São Paulo: CENBIO, 2001. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br>>. Acesso em: 02 ago. 2015.

CERAGIOLI, N.S.; GUERRA S.P.S.; LANÇAS, K.P.; PROSDOCINI, H.; HENDLER, T. MACHADO, F. C. Avaliação de um picador estacionário de árvores em função da granulometria para eucalipto. In: 7º Congresso Internacional de Bioenergia, 2012, São Paulo. 7º Congresso Internacional de Bioenergia, 2012. v. 7. p. 1-4

CERAGIOLI, N.S. Qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos.2013.40 f. Tese (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “ Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013.

CINTRA, T.C. Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP. 2009. 85 f. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo-ESALQ, Piracicaba, 2009.

CLARK, I. The semivariogram - Part I. Eng. & Min. J., 180(7):90-94, 1979.

COELHO, J.C. Biomassa-Biocombustível-Bioenergia. Ministério das Minas e Energia. Brasília, 100p., 1982.

CORREA, S.M.B.B. Probabilidade estatística. 2.ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual,2006.

DAVID, M. Geostatistical Ore Reserve Estimation. Amsterdam: Elsevier, 1977. 205p.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. Energy Conversion and Management, Oxford, v.42, n.2, p. 183-188. Apr. 2001.

DONATO, D.B. Métodos de amostragem e de determinação do teor de umidade da madeira em tora.2013. 71 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

ERIKSSON, A. Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and power plants. Second cycle, A2E. Uppsala: SLU, Dept. of Energy and Technology, 2011.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) e aspectos gerais da combustão. Curitiba: FUPEF, 1981. Série técnica n.6.

FERREIRA, I. T. M.; SCHIRMER, W. N.; MACHADO, G. O.; GUERI, M. V. D. Estimativa do Potencial Energético de Resíduos Celulósicos de Fabricação de Papel através de Análise Imediata. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 3, p. 284, 2014.

FURTADO, T.S.; FERREIRA, J.C.; BRAND, M.A.; MUNIZ, G.I.B.; QUIRINO, W.F. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 795-802, out.-dez., 2012

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. Quím. Nova, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

GRANDE, J.P. Dimensões de cavacos industriais de eucalipto e relações com polpação, resistência e morfologia de fibras na polpa. 2012. 87 f. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, 2012.

GRASSI, G.; PALZ, W. O futuro da biomassa na União Européia. Álcool & Açúcar, n.76, p.28-34, 1994.

GRAUER, A. KAWANO, M. Uso de Biomassa para Produção de Energia, 2001. Disponível em<www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em: 02 out. 2015.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. ; VIEIRA, S. R. . Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: Bernardi, Alberto Carlos de Campos; Naime, João de Mendonça; Resende, Álvaro Vilela de.; Bassoi, Luis Henrique; Inamasu, Ricardo Yassushi.. (Org.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. 2ed.Brasília, DF: Embrapa, 2014, v. 1, p. 74-83.

GRUNKRAUT, M. Cavacos: Coopermiti, 2012. Disponível em: <<http://www.coopermiti.com.br/educacao/cavaco.pdf>>. Acesso em: 15/mar/2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Rede de Estações Meteorológicas de Observação de Superfície Automática: Dados. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. 2015. Acesso em: 10 mar. 2016.

ISAAKS, E.; SRIVASTAVA, R. Applied geostatistics. Oxford University Press New York, v.2, 1989.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. Biomass and Bioenergy, v.9, n.1-5, p.181-190,1995.

JOHNSON, R. C. Some aspects of wood waste preparation for use as a fuel. TAPPI, v.58, n.7, p.102-106, 1975.

JUAIS, D. Produção de polímeros derivados de fontes renováveis via catálise enzimática. 2009. 51 f. Tese (Mestrado em Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

KOFMAN, P. D. Quality wood chip fuel, 2006. Disponível em: <http://www.seai.ie/Renewables/Bioenergy/Sources/Wood_Energy_and_Supply_Chain/Fuel_and_Supply_Chain/#sthash.yrEeNEqj.dpuf>. Acesso em: 02 out. 2015.

LANDIM, P. M. B. Sobre Geoestatística e Mapas. Terræ Didática, v. 2, n. 1 p.19-33, 2006.

LIMA, J.S.S.; SILVA, J.T.O.; OLIVEIRA, R.B.; ALMEIDA, V.S.; VANZO F.L. Estudo da viabilidade de métodos geoestatísticos na mensuração da variabilidade espacial da dureza da madeira de paraju (*Manilkara* sp). Rev. Árvore, Viçosa, v. 30, n.4, Jul/Ago. 2006.

LIMA, E.G.; SILVA, D.A. Resíduos gerados em indústria de móveis de madeiras situados no polo moveleiro de Arapongas-PR. Revista Floresta, Curitiba, v. 35, n.1, jan. –abr, p. 105-116, 2005.

NASCIMENTO, M.D.; BIAGGIONI, M.A.M. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para a produção de energia em agroindústria Seropédica. Revista Energia na Agricultura, Botucatu, v. 25, n. 3, p.104-117, 2010.

NEVES, T.A. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados no sul de Minas Gerais. 2012. 97 f. Tese (Mestrado em Processamento e utilização da madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

NURMI, J. The storage of logging residue for fuel. Biomass and Bioenergy, v.17, p.41-47, 1999.

NURMI, J.; HILLEBRAND, K. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. Biomass and Bioenergy, v. 31, p.381–392, 2007.

NYSTRÖM, J. Rapid measurements of the moisture content of biofuel. 2006. 127 p. Ph.D. dissertation, Dept. Public Technol., Mälardalen Univ. College, Västerås, Sweden, 2006.

ORTIZ, G.C. Aplicação de métodos Geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo. 2002. 75f. Dissertação (Mestrado) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2002.

PARI, L.; BRAMBILLA, M.; BISAGLIA, C.; DEL GIUDICE, A.; CROCE, S.; SALERNO, M.; GALLUCCI, F. Poplar wood chip storage: Effect of particle size and breathable covering on drying dynamics and biofuel quality. Biomass and Bioenergy. v. 81, p. 282-287, 2015.

PEBESMA, E.J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Computers & Geosciences, 30:683-691.

PELISSARI, A.L. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamento de *Tectona grandis* L.f. 2015. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. Inventário Florestal. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 316 p., 1997.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2000.113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PETTERSEN, R.C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (ed.) The chemistry of solid wood. Washington, American Chemical Society, p.54-126, 1984.

PHILIPP, P.; D' ALMEIDA, M.L.O. Celulose e Papel. Volume: Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo- Centro Técnico em Celulose e Papel. São Paulo, v.1, n.2, 1988.

QUIRINO, W. F.; VALE , A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. Revista da Madeira, São Paulo, n. 89, p. 100-106, 2005.

R Development Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.1.7-5.2.<https://CRAN.R-project.org/package=geoR>.

ROSILLO-CALLE; BAJAY, S. V.; ROTHAMAN, H. Industrial use of biomass energy: the example of Brazil. London: Taylor & Francis, 2000.

SALVIANO, A.A.C. Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP.1996. 91f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SANTIAGO, F.L.S. Aproveitamento de resíduos florestais de *Eucalyptus spp* na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica. 2013. 124 p. Tese (Doutorado em Agronomia-Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, 2013.

SANTOS, R.C. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. 2010. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C.O; CASTRO, A.F.M; CASTRO, R.V.O; BIANCHE, J.J.; SOUZA, M.M.; CARDOSO, M.T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. Scientia Forestalis, Piracicaba, v.39, n.90, p.221-230, 2011.

SOUZA, M.M. Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de *Pinus taeda* L. 2010. 77 f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SOUZA, M.C. H.; REIS, E. R.; SERAFIM, K. P.; PEDRAZZI, C.; FRIZZO, S. M. B.; OLIVEIRA, P.; FOELKEL, C.E.B. Variação da densidade a granel de cavacos de *Eucalyptus saligna* em função das suas dimensões e da umidade. In: Congresso Internacional de Celulose e Papel, 2002, São Paulo. 35º Congresso Internacional de Celulose e Papel, 2002. p. 1-7.

THE EUROPEAN STANDARD. EN 14961-1(2010): Wood chips and hog fuel: Fuel specifications and classes, 2010.

THORNQVIST, T.; JIRJIS, R. Changes in fuel chips during storage in large piles. Upsalla, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Report n. 219, 1990.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, San Diego, v.38, n.1, p.45-94, 1985.

TRUGILHO, P.F.; SILVA, D.A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril L.*). Scientia Agraria, v.2, n.1-2, p.45-53.2001.

VALE, A.T.; MENDES, R.M.; AMORIM, M.R.S.; DANTAS, V.F.S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão mansão (*Jatropha curcas*). Cerne, Lavras, v. 17, n. 2, p. 267-273, abr./jun. 2011.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III: Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. Jerônimo Monteiro: Suprema, 2008.291 p.

VALE, A. T.; BRASIL, M.A.M.; CARVALHO, C.M.; VEIGA, R.A.A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. Cerne, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VIDAL, A.C.F.; HORA, A.B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v.33, p. 261-314, 2011.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H. & SCHAEFER, G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, Oakland, v. 51, p.1-75,1983.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. Geoestatística conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de textos, 2013.215 p.