

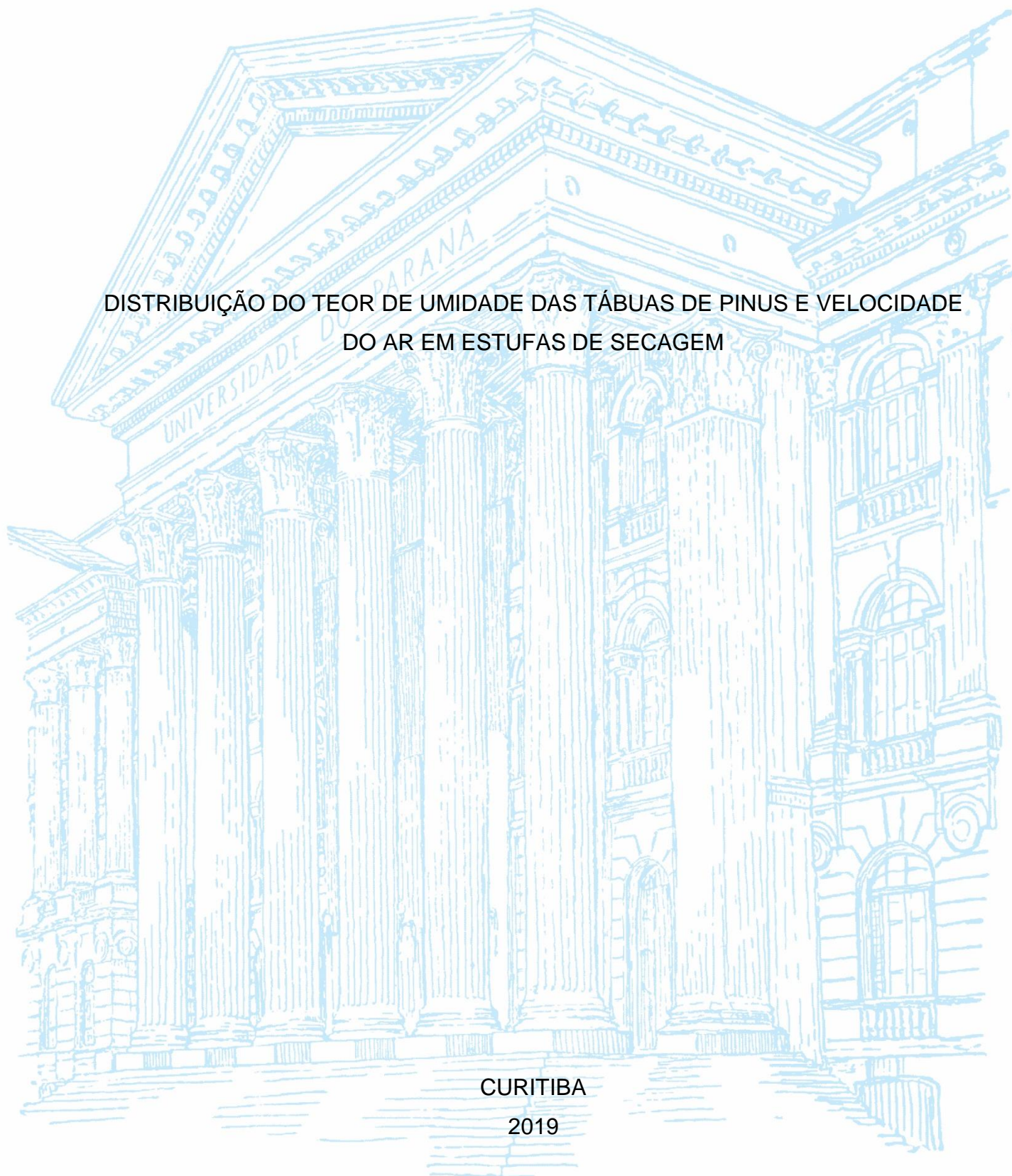
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WINICIUS AUGUSTO SCHAEFFER

DISTRIBUIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DAS TÁBUAS DE PINUS E VELOCIDADE
DO AR EM ESTUFAS DE SECAGEM

CURITIBA

2019



WINICIUS AUGUSTO SCHAEFFER

DISTRIBUIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DAS TÁBUAS DE PINUS E VELOCIDADE
DO AR EM ESTUFAS DE SECAGEM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia florestal, Setor de ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em ciências florestais.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Campos Monteiro

CURITIBA

2019

(Espaço Para o Termo de Aprovação)

Dedico a minha família, em especial a meus pais pela enorme confiança, por nunca desistirem de acreditar em mim, por (quase) sempre apoiarem minhas decisões e acima de tudo, por permitirem que eu saísse do contexto de minha cidade natal, criando asas que não podem ser vistas, mas me levam cada dia mais longe. Sinto muito a falta de vocês mas seguirei meus sonhos com base nas palavras de Raimundo Correia “aos pombais as pombas voltam, e eles (os sonhos) aos corações não voltam mais”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Paraná pela estrutura adequada e oportunidades inigualáveis de aprendizado e acesso à pesquisa, oferecidas de forma gratuita e livre.

Agradeço a fundação Araucária por financiar e viabilizar a estadia de diversos estudantes como eu, participantes de programas de Iniciação Científica.

Aos professores que nada me ensinaram, pela valiosa lição de que o aprofundamento não é obtido em sala e que um título pode não significar nada.

Aos professores que me ensinaram muito, por intensificar minha paixão pelo conhecimento multidisciplinar, aplicado às florestas e às pessoas.

Aos estudantes, mestres e doutores orbitantes do cotidiano, que prestaram não apenas auxílio e aulas incríveis, mas ótimos momentos de discussão, crescimento pessoal e descontração.

Agradeço a meus amigos, perenes e permanentes, que nunca serão esquecidos e sempre foram a família que não tive aqui. Entre os mais marcantes estão, os confrades do Templo, os fanfarrões Originais, os magníficos portadores do manto verde e laranja, o seletto grupo do 2014/2 e surpreendentemente, meus colegas de trabalho dos laboratórios que participei. Os nomes não citarei, vocês sabem quem são e sabem o que vivemos, espero carregar para sempre estas lembranças e quero que saibam que apesar de nunca ter dito, amo todos vocês.

Agradeço a meu orientador Thiago Campos Monteiro, pela paciência e pela ambição, mirando sempre para cima. Me ensinou que devo focar, esquecer e saber que tudo depende de onde quero chegar. Quero deixar claro que não consegui fazer tudo o que queria ter feito, faltou capacidade computacional na massa cinzenta.

Agradeço a empresa Moldurarte situada em Braço do Norte, SC. Pela recepção dos exímios pesquisadores do laboratório de secagem da madeira-UFPR.

Agradeço todos os pesquisadores envolvidos pelos dados, insights e valiosas contribuições para o desenvolvimento deste volume. Em especial agradeço a Ricardo Jorge Klitzke, Claudio Gumane Francisco Juizo, Thiago Campos Monteiro, Rafael Grazeke, Iasmin Portela Pfutz e Allan Libanio Pelissari.

Agradeço a todos que lerem e prestarem considerações para a melhoria deste volume.

***“Überzeugungen sind gefährlichere
Feinde der Wahrheit als Lügen”***

***“As convicções são inimigas mais
perigosas da verdade do que as
mentiras”***

(Friedrich Wilhelm Nietzsche, 1878)

RESUMO

O desenvolvimento de tecnologias e a capacidade computacional traz possibilidades inovadoras ao processamento de dados, aproximando a indústria madeireira aos conceitos da Indústria 4.0. Sua utilização permite a otimização dos processos industriais da madeira, gerando produtos de alto valor agregado e a formação de grandes *players* de exportações da cadeia produtiva madeireira. Neste contexto, a geoestatística é uma ferramenta importante e está presente nas empresas florestais no inventário, no manejo e na estimativa de propriedades da madeira, contudo ainda pouco utilizada na indústria. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar, em estufas convencionais de secagem da madeira de pinus, o comportamento espacial dos teores de umidade final da madeira, bem como da velocidade de circulação de ar no interior dos equipamentos, utilizando a geoestatística. Foram analisadas estufas de carregamento por empilhadeiras, com capacidade de 100 e 80 m³, atuantes sobre tábuas de 42 e 27 mm de espessura. O teor de umidade final das tábuas (TUF) e a velocidade de circulação do ar (VA) foram estimados em diferentes regiões das estufas. Os dados de TUF e VA foram coletados sistematicamente, buscando representar todas as áreas dos equipamentos. A partir do processamento dos dados, foram obtidos gráficos de comportamento, correlações entre as médias das variáveis, variogramas e mapas temáticos oriundos da krigagem. Os valores médios do TUF e a VA foram, respectivamente, 13,45% e 4,47 m.s⁻¹ nas tábuas com maiores espessuras; e 10,58% e 3,24 m.s⁻¹ nas peças com menores espessuras. Os modelos utilizados na variogrametria apresentaram bom ajuste, mas não apresentaram grande diversidade espacial. Os variogramas resultantes não apresentaram patamares definidos para ambas as variáveis, contudo os mapas temáticos gerados foram capazes de sintetizar o que a análise gráfica resultou, sendo verificadas tendências decrescentes do TUF no sentido de abertura da porta das estufas, que apresentou maiores valores à direita dos equipamentos. Para VA, houve uma tendência decrescente no sentido base-topo. Os maiores valores de TUF foram encontrados no centro das pilhas de tábuas, enquanto para as VA, os maiores valores foram verificados na parte inferior das estufas de secagem. Diante disso conclui-se que a geoestatística apresenta potencial para a aplicação no monitoramento e no controle de estufas de secagem, sendo capaz de gerar mapas temáticos das variáveis, permitindo estimar que o processo ocorra de maneira mais homogênea e reduzindo os defeitos na posterior confecção dos produtos de maior valor agregado.

Palavras-chave: Geoestatística; Variograma; Krigagem; Molduras.

ABSTRACT

The rising technology and computational capacity, brings innovative possibilities to data processing, bringing the wood industry closer to the concepts of industry 4.0. These concepts allow the optimization of wood's industrial processes generating value-added products and the formation of big exportation players in the productive chain of wood. In this context Geostatistics is an important tool already inserted on forest enterprises through inventory, management and wood properties estimatives, still the use of this technique is yet seldom on the industries. Therefore, this study aimed to assess the spatial behavior of final moisture content in wood, as well as air circulation speed inside wood drying kilns, using geostatistics. There were assessed forklift loaded batch kilns with cargo capacity of 100 and 80 m³, drying 42 and 27 mm width planks. The Final Moisture Content (FMC) and Air Circulation Speed (AS) were obtained on different kiln sectors. The data were systematically collected in an attempt to represent all equipment's areas. From the data processing were obtained behavioral graphs, correlation between the "FMC's" and "AS's" means, variograms and thematic maps originated by kriging. The mean values for "FMC" and "AS" were respectively 13.45% and 4.47 m.s⁻¹, on larger widths, and 10.58% and 3.24m.s⁻¹, on smaller widths. The models in use presented good adjustment, but did not showed great spatial diversity. The variograms have not shown defined sills, however the thematic maps were capable of synthetizing the graph analysis, verifying decrescent "FMC" tendencies on the door opening direction, showing the greatest values to the right of the kilns. There also were decreasing tendencies for "AS" on the Floor-Ceiling direction. The greater "FMC" values came from the center planks of the wood stacks, as for "AS" the greater values were verified in the lower part of the kilns. So it is concluded that geostatistics has an applicable potential for monitoring and controlling drying kilns, being capable of generating variable's thematic maps, allowing the process to happen in a more homogeneous way, reducing defects in the upcoming value-added products manufacture.

Keywords: Geostatistics; Variogram; Kriging; woodframes.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE ESTUFAS DE SECAGEM.....	18
FIGURA 02 - EXEMPLO DE MAPA TEMÁTICO GEOESTATÍSTICO	22
FIGURA 03 - ESQUEMA DE AMOSTRAGEM UTILIZADO PARA A MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DAS TÁBUAS E VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO VENTO NAS DIFERENTES REGIÕES DA ESTUFA.....	27
FIGURA 04 - SEQUENCIA DE LOCALIZAÇÃO E OBTENÇÃO DAS PILHAS E TÁBUAS DENTRO DA ESTUFA.....	27
FIGURA 05 - REPRESENTAÇÃO DAS GRADES DE PONTOS AMOSTRADOS UTILIZADOS NA MODELAGEM ESPACIAL DE VELOCIDADES DO AR E TEORES DE UMIDADE FINAL DE TÁBUAS EM ESTUFA.....	30
FIGURA 06 - FLUXOGRAMA PARA PROCESSAMENTO GEOESTATÍSTICO DOS DADOS NO SOFTWARE GS+	31
FIGURA 07 - COMPORTAMENTO VERTICAL DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFAS ATUANTES SOBRE TÁBUAS DE PINUS COM DIFERENTES ESPESSURAS	32
FIGURA 08 - COMPORTAMENTO HORIZONTAL DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFAS ATUANTES SOBRE TÁBUAS DE PINUS COM DIFERENTES ESPESSURAS.....	33
FIGURA 09 - COMPORTAMENTO VERTICAL DO TEOR FINAL DE UMIDADE DE TÁBUAS DE DIFERENTES ESPESSURAS SECAS EM ESTUFA. A - EM DIFERENTES ALTURAS DENTRO DO SECADOR; B - DIFERENTES ALTURAS DENTRO DA PILHA DE SECAGEM.....	34
FIGURA 10 - COMPORTAMENTO HORIZONTAL DO TEOR FINAL DE UMIDADE DE TÁBUAS DE PINUS COM DIFERENTES ESPESSURAS SECAS EM ESTUFA.....	36
FIGURA 11 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO A VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR NA ESTUFA ATUANTE SOBRE TÁBUAS DE PINUS DE 42 MM DE ESPESSURA	39
FIGURA 12 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO TEOR DE UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS DE PINUS DE 42 MM DE ESPESSURA	39

FIGURA 13 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFA ATUANTE SOBRE TÁBUAS DE PINUS DE 27 MM DE ESPESSURA	40
FIGURA 14 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO TEOR DE UMIDADE FINAL EM TÁBUAS DE PINUS DE 27 MM DE ESPESSURA	41
FIGURA 15 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFA ATUANTE SOB TÁBUAS DE PINUS COM 42 MM	43
FIGURA 16 - COMPORTAMENTO DOS TEORES DE UMIDADE FINAIS EM ESTUFA ATUANTE SOB TÁBUAS DE PINUS COM 42 MM	44
FIGURA 17 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFA ATUANTE SOB TÁBUAS DE PINUS COM 27 MM	45
FIGURA 18 - COMPORTAMENTO DOS TEORES DE UMIDADE FINAIS EM ESTUFA ATUANTE EM PEÇAS DE 27 MM.....	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - CORRELAÇÃO ENTRE MÉDIAS DE VELOCIDADES DE CIRCULAÇÃO DO AR NOS SECADORES E A UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS DE PINUS DE DIFERENTES ESPESSURAS	37
TABELA 02 - ANÁLISE DESCRITIVA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEOR DE UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS DE PINUS E A VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR NAS ESTUFAS	38
TABELA 03 - PARÂMETROS ORIGINADOS PELA VARIOGRAMETRIA	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	O GÊNERO PINUS	15
2.2	MADEIRA	15
2.3	SECAGEM DA MADEIRA	16
2.4	MÉTODO DE SECAGEM	17
2.4.1	Estufas de secagem convencional	18
2.4.2	Influência da umidade relativa na secagem da madeira	19
2.4.3	Influência da velocidade do ar na secagem da madeira	20
2.5	PRODUTOS DE MAIOR VALOR AGREGADO	20
2.5.1	Processamento da Madeira	21
2.6	GEOESTATÍSTICA	22
2.7	INDUSTRIA 4.0	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	LOCALIZAÇÃO ESPACIAL E OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS	26
3.2	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	27
3.3	VELOCIDADE DO AR	28
3.4	CORRELAÇÃO ESPACIAL DAS VARIÁVEIS	29
3.5	MODELAGEM ESPACIAL	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	VELOCIDADE DO AR	32
4.2	UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS	34
4.3	CORRELAÇÃO	36
4.4	MODELAGEM ESPACIAL	37
4.4.1	Análise descritiva	37
4.4.2	Variogramas	38
4.4.3	Mapas temáticos	42
5	CONCLUSÕES	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O gênero *Pinus* ocupa cerca de 1,6 milhões de hectares, equivalente a 20% das florestas plantadas no país (IBÁ, 2019). Ele tornou-se o principal fornecedor de madeira serrada no Brasil, produzindo mais de 8 M m³ em 2017 (FAO, 2019). Sua madeira, quando processada para uso sólido, como móveis e molduras, demanda tecnologias nas diferentes etapas de corte e secagem. Nesse contexto a secagem industrial se enquadra como uma das mais importantes etapas do processamento primário da madeira (BATISTA et al., 2016). Sua realização permite aumento da resistência física da madeira, diminuição da massa, além de facilitar a usinagem e minimizar o ataque de fungos (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). A crescente demanda por madeira seca e com boa qualidade em curto espaço de tempo aumentou o emprego da secagem artificial controlada ou secagem convencional, sendo atualmente o método mais aplicado pela indústria madeireira no Sul do Brasil.

O processo artificial utiliza equipamentos em sua condução, dentre os mais presentes estão as estufas de secagem, classificados como uma ou mais câmaras com o propósito de fornecer e controlar condições ambientais, como temperatura, umidade relativa e circulação de ar necessária para a secagem adequada de madeira (SIMPSON, 1991). Com a evolução tecnológica diversas formas e arranjos foram exploradas, principalmente em relação aos trocadores de calor, tipos de ventiladores e controle de temperatura, além de diversos materiais para a construção da câmara. Independente dos arranjos, materiais ou mesmo projeto das estufas, o processo desenvolvido é o mesmo, em que o ar é forçado a passar pela carga de madeira, levando o calor irradiado pelo sistema aquecedor. Este processo resulta em trocas caloríficas entre o ar aquecido e a água contida na madeira, transportando a água do interior das peças para o ar da estufa, então expelido através de aberturas conhecidas como *dumpers*. Esse processo ocorre continuamente, enquanto a umidade da madeira dentro da estufa diminui gradativamente (SIMPSON, 1991).

A qualidade da secagem depende de inúmeros fatores, como a variação no teor final de umidade dentro e entre tábuas, tensões residuais de secagem, deformações, colapso das paredes celulares e rompimento interno ou externo dos tecidos manifestados como rachaduras e fendilhamentos (REDMAN et al., 2016). A qualidade advém do conhecimento das propriedades tecnológicas da matéria prima,

como a densidade, a anatomia e a permeabilidade. As variáveis do processo também interferem na qualidade da secagem, como a velocidade de circulação do ar, temperatura e umidade relativa no interior do equipamento. A conciliação destes conhecimentos mantém o equilíbrio entre a taxa de evaporação superficial e a taxa de perda da água interna, reduzindo os defeitos de secagem e conduzindo o processo em tempo economicamente viável.

O monitoramento da secagem ocorre nas estufas industriais com *softwares*. Nessa automação, as variáveis do processo são obtidas por meio de sensores como termômetros e pinos resistivos inseridos nas tábuas. A utilização destes dados ainda é restrita ao controle de etapas de secagem e monitoramento de sua progressão. Entretanto, com a aproximação do conceito de Indústria 4.0 e a constante demanda por otimização dos processos, os atuais sistemas para o monitoramento de secagem apresentam lacunas inexploradas.

Sob a ótica do *Big Data*, uma das ferramentas para a Indústria 4.0, a forma atual de obtenção de dados em estufas ainda é deficitária, uma vez que coleta informações gerais do comportamento da estufa, desprezando particularidades espaciais destes ambientes. Dessa forma, modelos estatísticos que considerem a distribuição espacial de variáveis podem ser determinantes para a melhoria nos processos de secagem e uma melhor uniformidade do teor de umidade final entre as tábuas.

Nesse contexto, a geoestatística pode fornecer modelos para subsidiar simulações robustas de comportamento espacial como os “Gêmeos Digitais”, prevendo resposta em tempo real sobre particularidades do processo de secagem. Análises de fenômeno espacial são utilizadas em estudos de manejo florestal (PELISSARI et al., 2013) e propriedades tecnológicas da madeira (DE SOUZA LIMA et al., 2006; DOS SANTOS et al., 2010), no entanto, existem poucos estudos na indústria madeireira e principalmente na secagem. Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar a distribuição da velocidade de circulação do ar e o teor de umidade final das tábuas de pinus após a secagem em estufa, por meio do método geoestatístico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a distribuição espacial do teor de umidade final nas tábuas de Pinus e a distribuição espacial da velocidade de circulação do ar na estufa com uso da geoestatística.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar e descrever a distribuição espacial de velocidade de circulação do ar nas diferentes regiões das estufas;
- Avaliar a distribuição espacial do teor de umidade final das tábuas de Pinus nas diferentes regiões da estufa e da pilha de secagem;
- Correlacionar as distribuições espaciais do teor de umidade final das tábuas e da velocidade de circulação do ar;
- Modelar, por meio da geoestatística, o comportamento de ambas as variáveis; e
- Observar o efeito de diferentes espessuras das tábuas nas análises realizadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O GÊNERO PINUS

O principal estado com plantios de pinus é o Paraná, representando 42% da área plantada no Brasil (ABIMCI, 2019). Introduzido no Brasil por um esforço conjunto de instituições, profissionais, empresas e universidades, os primeiros registros nacionais do gênero antecedem 1906 (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005). As variedades mais utilizadas são oriundas do sudeste dos EUA e América Central, representados pelas espécies, *P. elliottii*, *P. taeda* e *P. caribaea*.

Plantios intensivos tiveram início nos anos 1960, como forma alternativa de assegurar o suprimento de madeira para usos gerais (SHIMIZU et al., 2018), uma das razões mais importantes para a introdução foi a necessidade de produção de madeira capaz de abastecer a indústria, aliada a necessidade de encontrar uma alternativa para a substituição da *Araucaria angustifolia*, predatoriamente explorada (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005). Desta forma com o interesse estabelecido e a capacidade de adaptação edafoclimática, o pinus rapidamente se difundiu e hoje ocupa mais de 1,57 milhões de hectares, representando 20% das florestas plantadas Brasileiras (IBÁ, 2019). Este é matéria prima para diversos fins, como celulose e papel, construção civil, móveis, laminados e outros (GUEDES; MAGOSSO, 2013).

Atualmente o pinus é o maior fornecedor de madeira serrada no Brasil, produzindo cerca de 7,5 milhões de m³ em 2017 (FAO, 2019). 33% dessa produção é destinada para o mercado internacional, que nos últimos 10 anos aumentou 250% em volume e 290% em valor, representando cerca de 550 bilhões de dólares (ABIMCI, 2019), consolidando a importância do gênero.

2.2 MADEIRA

Desde o início da humanidade a madeira tem sido utilizada e trabalhada acompanhando a evolução. Esse nobre material foi adaptando-se às necessidades humanas, tendo neste percurso sofrido vários progressos técnicos e tecnológicos que tornam a madeira, um material de potencialidades renovadas no cenário atual (LOURENÇO; BRANCO, 2012), principalmente pelo apelo da sustentabilidade.

Este material nobre e renovável é empregado em nosso cotidiano sob formas que muitas vezes não percebemos (IBÁ, 2016), entretanto, é comum nos depararmos com a madeira facilmente caracterizada, principalmente dos gêneros largamente empregados como *Pinus* e *Eucalyptus*. Um ponto comum dos usos modernos dessas madeiras é sua passagem por alguma etapa de beneficiamento pré comercialização.

Conforme LAZAROTTO et al. (2016) a madeira do gênero *Pinus* caracteriza-se por apresentar baixa durabilidade natural, demandando beneficiamento para aumento de sua vida útil. A deterioração e a descoloração causadas por fungos são as principais formas de desvalorização na produção de madeira, com perdas de 15-25% no valor e de 10-15% em produtos durante a estocagem e utilização (KELLEY et al., 2002 *apud* LAZAROTTO et al., 2016).

O conhecimento sobre o material nos permitiu criar e aprimorar processos para lhe conferir, ou evitar, características específicas, afetando por consequência seus produtos finais. Um dos processos amplamente aplicados sob a madeira de pinus é a secagem, podendo ser realizada de maneira natural ou artificial (TAKESHITA; JANKOWSKY, 2015).

2.3 SECAGEM DA MADEIRA

A secagem é um processo natural e fundamental que ocorre nos materiais úmidos até um nível de equilíbrio com o ambiente. Suas principais vantagens na madeira são a melhoria da resistência física e diminuição de massa, atuando como facilitadora da usinagem e controle de xilófagos. Em adição, a madeira quando seca adquire ótimas características como isolante térmico, elétrico e acústico (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

O processo de secagem consiste basicamente em remover a água interna da madeira, aproximando o teor de umidade das peças ao valor de umidade de equilíbrio desejado para seu uso ou destino final. Apesar de parecer simples, é um processo de extrema complexidade sujeito a distintos fenômenos físicos de transferência de energia e massa, verificável nas transferências de calor convectivas e condutivas, bem como nas movimentações da água ocorrendo de maneira diferente conforme os teores de umidade da madeira.

A água de maneira simplificada pode se apresentar como livre ou impregnada. A água livre não afeta tantas propriedades quanto a fixa, mas colabora principalmente

na condutividade térmica e permeabilidade (SIMPSON, 1991). Até o ponto de saturação das fibras a predominância de movimento é da água livre, que ocorre na forma de capilaridade, presumidamente representada por água presente nos espaços celulares ou lume das células (ENGELUND et al., 2013).

Braz et al. (2015) dizem que, abaixo do ponto de saturação das fibras, a madeira começa a sofrer variações dimensionais, contraindo-se ao perder ou absorver água, de maneiras distintas conforme os diferentes planos de orientação das peças. Este patamar comumente adotado como 30% de teor de umidade na peça, representa na prática a demanda por mais energia para a progressão da secagem. Contudo, a remoção desta água implica em diversas qualidades físicas e mecânicas afetando diretamente o uso da madeira. Abaixo de tal ponto, a natureza da água em movimento muda, a chamada água de impregnação é fixa nas paredes celulares e se desloca predominantemente por difusão, orientada por gradientes de umidade na madeira (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Em adição a secagem depende da natureza do material, uma vez que as espécies possuem características distintas, sendo vernaculamente classificadas como de fácil ou difícil secagem. Madeiras com maiores massa específica demandam condições específicas de secagem, mais cautelosas (SILVEIRA; REZENDE; VALE, 2013), acarretando períodos ainda mais extensos de secagem, pela relação inversamente proporcional entre rapidez ou facilidade de secagem e densidade, dependendo ainda da orientação estrutural das peças e orientação das fibras na espécie.

2.4 MÉTODO DE SECAGEM

A secagem é, indiscutivelmente, umas das etapas mais importantes do processamento primário da madeira sólida na indústria madeireira (BATISTA et al., 2016), sendo muitas vezes o gargalo do sistema. A crescente demanda produtiva industrial, requereu o desenvolvimento de métodos cada vez mais rápidos e eficientes, culminando com o desenvolvimento da secagem artificial controlada.

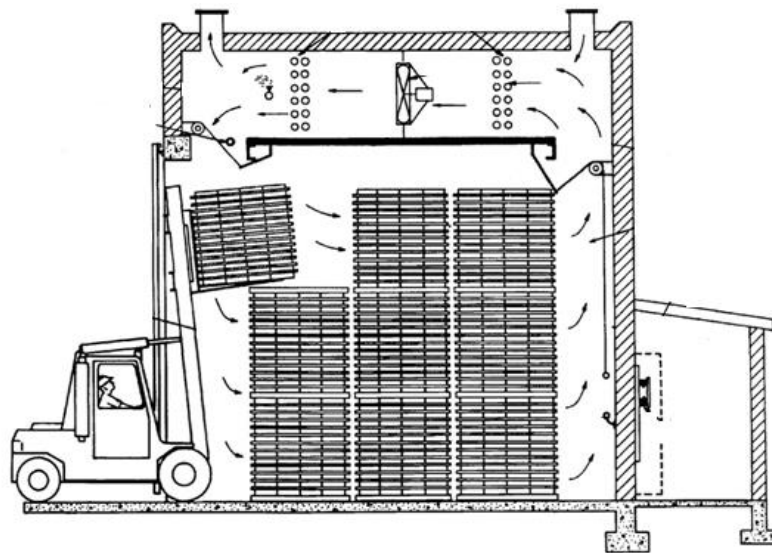
O método de secagem artificial utiliza equipamentos conhecidos como estufas de secagem, capazes de automatizar o beneficiamento da matéria prima, sendo responsáveis por diminuir o tempo de processo (DE JESUS et al. 2017), eliminando a variabilidade dos fatores ambientais inerentes ao processo conduzido naturalmente.

2.4.1 Estufas de secagem convencional

A secagem nestes equipamentos ocorre pela convecção forçada de ar, DE JESUS et al. (2017), explica que o calor gerado pelo sistema de aquecimento é irradiado para o ar interno da estufa, este então é movimentado por ventiladores, promovendo a circulação de ar pelo equipamento, resultando em trocas de calor entre o ar aquecido e a água retida na madeira, desta forma a água é transportada do interior das peças para o ar da estufa. Este ar carregado com umidade é então expelido através de aberturas conhecidas como *dumpers*, realizando o objetivo de retirada da água da madeira. O processo ocorre continuamente enquanto a umidade dentro da estufa diminui gradativamente (SIMPSON, 1991).

Existem inúmeras composições e arranjos diferentes para a construção destes equipamentos. A FIGURA 01 representa um esquema de estufas de secagem de carregamento por empilhadeira.

FIGURA 01 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE ESTUFAS DE SECAGEM



Fonte: Adaptado de SIMPSON (1991)

Este processo apresenta grande densidade de eventos físicos sobre um material de origem biológica, que quando não adequadamente conduzido, pode acarretar em perda de rendimento do processo, perda de qualidade final do produto, gastos excessivos e em casos extremos, perda total do produto (DE CARVALHO et

al., 2015). Controlar o fluxo de ar e a umidade relativa no interior desses equipamentos é de demasiada importância no processo, visto que a rápida secagem pode danificar o material enquanto o contraponto da secagem lenta, não apresenta boa relação custo/eficiência (WALLACE; AVRAMIDIS, 2016).

Jankowsky e Galina, (2013) recomendam que a composição das cargas de madeira seja uniforme, não apenas em dimensões, mas também em massa específica, umidade inicial e proveniência da madeira. Entende-se que diferentes espessuras, larguras e comprimentos, demandarão diferentes quantidades de energia para sua eficiente secagem. Essa energia é ofertada teoricamente, de maneira uniforme para todo o equipamento, gerando conseqüentemente diferentes teores de umidade na madeira ao final do processo, que por vezes serão incompatíveis com o uso final. Sob a ótica econômica, a otimização do processo é provavelmente uma das melhores estratégias para assegurar o maior retorno do investimento (OLIVEIRA et al., 2012).

O processo de secagem está sujeito a grandes perdas e prejuízos, reforçando que sua boa gestão é fruto do conhecimento e do controle dos parâmetros nele contidos. Desta forma a eficácia computacional crescente, aliada à capacidade das estufas industriais, confere margem para o próximo passo na obtenção da qualidade absoluta na indústria da madeira. Isto é apontado por Bond e Espinoza (2016), ao concluírem que a modificação ou adição da tecnologia aos métodos existentes, permite a secagem mais rápida e com melhor qualidade, mesmo para diferentes espécies e espessuras de madeiras. Em adição, os mesmos autores comentam que os esforços para desenvolver novos métodos de controle da secagem, continuam atendo-se ao objetivo de diminuir tempo do processo e aumentar a qualidade da madeira. Assim, diante do melhor entendimento da secagem e de seus impactos ambientais, é possível aliar o monitoramento, gestão e planejamento, com os anseios da sustentabilidade. Posto isso, a pesquisa no controle de secagem das tábuas contribui para a incorporação do conceito de *Indústria 4.0* no beneficiamento da madeira.

2.4.2 Influência da umidade relativa na secagem da madeira

Todas as madeiras perdem ou ganham umidade buscando atingir um estado de equilíbrio com as condições do ar circundante. Esse estado de equilíbrio depende

da umidade relativa e da temperatura conforme descreve SIMPSON (1991). Dessa forma, a umidade relativa é uma variável de importante controle dentro do processo de secagem, uma vez que determina, em conjunto à temperatura, a quantidade de vapor d'água que o ar é capaz de reter.

Assim, a umidade relativa dentro das estufas de secagem, atua diretamente no processo de remoção da água superficial da madeira, isso ocorre constantemente ao longo da secagem, diminuindo os teores de umidade da madeira. Baixa umidade relativa, portanto, aumenta o fluxo capilar e também estimula a difusão, uma vez que reduz o teor de umidade superficial da madeira, resultando em aumento nos gradientes de umidade que conseqüentemente aumentam a taxa de difusão (SIMPSON, 1991).

A medição dessa variável em estufa, acontece por meio de termômetros de bulbo úmido e seco, enquanto seu controle ocorre com o uso de admissão de ar saturado, vaporização e renovação do ar interno (WALLACE; AVRAMIDIS, 2016).

2.4.3 Influência da velocidade do ar na secagem da madeira

Enquanto a umidade relativa determina a quantidade de água que o ar pode conter, a velocidade desse ar determina a taxa de evaporação (WALLACE; AVRAMIDIS, 2016). O ar dentro das estufas atua como veículo promotor das transferências de calor e de massa, portanto, seu adequado controle é essencial para que a secagem seja eficiente. Assim, velocidades altas de circulação, podem refletir em defeitos na madeira, oriundos principalmente da rápida perda da água superficial. Baixas velocidades também não são ideais uma vez que tornam o processo demorado e conseqüentemente com baixa relação custo eficiência. Além disso ao manter as velocidades constantes durante todo o processo há desperdício de energia (VIKBERG; HÄGG; ELUSTONDO, 2015), uma vez que conforme a madeira é seca, a quantidade de água na superfície diminuí. WALLACE e AVRAMIDIS (2016) comentam ainda que menores velocidades nas etapas finais da secagem contribuem para a diminuição da ocorrência de tensões, geradas principalmente por fortes gradientes de umidade.

2.5 PRODUTOS DE MAIOR VALOR AGREGADO

A indústria de molduras, base para o estudo enquadra-se na categoria de produtos de maior valor agregado, assim como móveis, embarcações, painéis colados lateralmente e elementos decorativos. Conforme o estudo setorial ABIMCI (2019) estima-se que a produção nacional de molduras atingiu 941 mil m³ em 2018, dos quais 144 mil toneladas foram destinadas à exportação, colocando o Brasil no segundo lugar do ranking de maiores exportadores mundiais de molduras, este volume representa mais de 214 milhões de dólares. O maior valor destes produtos justifica investimentos na cadeia produtiva, principalmente na secagem, considerada uma das mais importantes etapas do beneficiamento da madeira, objetivando retorno em qualidade e conseqüentemente maior acesso à mercados externos.

2.5.1 Processamento da Madeira

Não há estado da arte recente na pesquisa de serrarias, especialmente em elos entre a tradicional pesquisa de beneficiamento de madeira com o avanço nos processos fabris, monitoramento e controle, em uma era onde a transição para a indústria 4.0 é crescente (NASIR; COOL, 2018). Em paralelo com a secagem, o teor de umidade é também muito importante no processamento mecânico da madeira influenciando na densidade e propriedades do material, conseqüentemente impactando a facilidade de processamento.

O processamento da madeira pelas serrarias antecede e sucede a secagem, sendo sua otimização também fundamental para a otimização da secagem e conseqüente otimização da qualidade dos produtos de maior valor agregado.

Estudos como Buehlmann e Edward Thomas (2002), apontam para a significância dos erros humanos nos processos de serraria e como os processos de otimização melhoram significativamente o processo produtivo e o rendimento. O estudo apontou que na época 78,2% dos defeitos existentes, eram marcados incorretamente, justificando o avanço da tecnologia de triagem.

Atualmente no processamento de tábuas é comum algum tipo de sensor de defeitos. Eliminando assim o componente de erro humano no processamento secundário, contudo estes defeitos passaram pela etapa de secagem, simbolizando ineficiência na alocação de recursos. O mesmo estudo acompanhou que o rendimento comum da serraria estimado em 63,5% diminuía para 47,4% após as rejeições de marcação. O problema identificado foi corrigido com sistemas de escaneamento. No

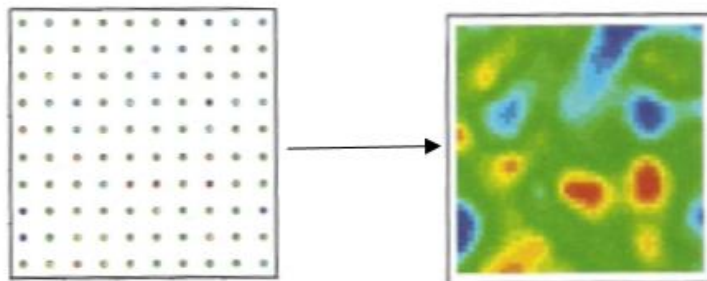
período do estudo os sistemas eram considerados viáveis quando apresentavam acurácia acima de 50%, podendo retornar o valor do investimento em um ano.

Roblot et al. (2010) comentam que na Europa a norma reguladora de construções Eurocode5, requer o uso de madeiras classificadas conforme suas propriedades mecânicas EN 14081. A classificação pode ocorrer de maneira visual ou mecanizada, sendo constatada baixa performance da classificação visual. Contudo as máquinas de classificação ainda não apresentariam resultados desejáveis. Estes são exemplos de como serrarias influenciam nos problemas de rendimento do processamento da madeira, entretanto ao se analisar a causa-raiz, o erro humano está presente na indústria, desde a colheita até o beneficiamento, justificando a implantação de sistemas para otimização.

2.6 GEOESTATÍSTICA

A geoestatística é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídos no espaço e ou tempo, utilizando como base valores adjacentes, quando considerados interdependentes pela análise variográfica (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). A geoestatística permite descrever e modelar os padrões espaciais através da variografia e prever valores em locais não amostrados através da krigagem. O estudo de variogramas, norteando a krigagem devem gerar imagens como na FIGURA 02.

FIGURA 02 - EXEMPLO DE MAPA TEMÁTICO GEOESTATÍSTICO



FONTE: Adaptado de YAMAMOTO; LANDIM (2013)

A geoestatística tem por objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com

determinação das incertezas associadas. Desta forma a partir de uma amostragem, realizada sobre um espaço definido, é realizada a interpolação ou estimativa dos pontos não amostrados, através de funções matemáticas locais, utilizando os pontos mais próximos ao ponto não amostrado, ou globais, com base em todos os pontos da malha amostrada.

A partir da década de 80 a aplicação da geoestatística se expandiu para diversas áreas do conhecimento, hoje é base para a agricultura e silvicultura de precisão. No setor florestal esta técnica já aparece no manejo (PELISSARI et al., 2013), planejamento de colheita (RODRIGUES et al., 2019), inventário e propriedades tecnológicas da madeira (DE SOUZA LIMA et al., 2006; DOS SANTOS et al., 2010), no entanto, tal aplicação carece de estudos na indústria madeireira, principalmente na secagem.

É importante ressaltar que de maneira geral o ajuste de um polinômio aos pontos de dados não é exato, pois há diferença entre o valor estimado e o observado, qualquer que seja o grau do polinômio. Essa diferença é conhecida como resíduo (RSS) e representa a componente aleatória da variável de interesse, enquanto o valor estimado, tal como calculado pelo polinômio, é denominado componente regional, que apresenta grande continuidade. Assim o formalismo geoestatístico é baseado no conceito da dependência espacial e no entendimento de que cada ponto no espaço não apresenta um único valor, mas sim uma distribuição de probabilidade de ocorrência de valores (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A geoestatística difere da estatística tradicional ao considerar que os valores de uma variável estão de alguma forma atrelados a sua distribuição espacial, assim os valores separados por menores distâncias devem ser mais semelhantes conforme a distância diminui. Uma das vantagens do uso desta técnica de predição é a determinação da anisotropia, o comportamento analisado para as diferentes direções.

O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem e permite representar, quantitativamente, a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (HUIJBREGTS, 1975)

2.7 INDÚSTRIA 4.0

O conceito de Indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, representa uma nova era para a organização da produção. Esta é embasada por 5 pilares sendo eles

a digitalização, flexibilidade e customização da produção, logística, simulação, e uso eficiente de energia e matéria prima (NAYA, 2019).

Um dos objetivos da quarta revolução é a implementação da “fábrica inteligente”, que supostamente abrirá portas para uma nova era industrial. Estas indústrias terão maior adaptabilidade aos processos produtivos e necessidades, bem como a alocação mais eficiente dos recursos. Após a crise financeira de 2008 as empresas do setor de madeira sólida, tiveram que repensar suas estratégias internas, para a redução de custos com aumento da eficiência e competitividade (ABIMCI, 2019), reiterando que o cenário para a incorporação do conceito de I4.0 é favorável.

Tendo o conhecimento que a indústria de madeira sólida contribui de forma expressiva para o desenvolvimento das economias locais e nacional, sendo de importância preponderante para o desenvolvimento social, observa-se um horizonte de possibilidades em que o conceito de fábrica inteligente não apenas se enquadra, mas também sana problemas do setor. Os avanços na tecnologia da secagem convencional serão beneficiados de maneira significativa por avanços em outras áreas como computação, eletrônica e tecnologia de sensores. Permitindo que as pesquisas relacionadas às propriedades básicas da madeira, possam dar respostas mais eficientes para a obtenção de teores de umidade, tensões de secagem e outros fatores capazes de alterar parâmetros do processo, que na indústria já são incorporados no controle e automação dos secadores (OLIVEIRA et al., 2012).

Entre os principais fatores em pauta, visando a redução de custos de produção e o aumento da competitividade destacam-se, a infraestrutura logística nacional, elevada carga tributária e baixo nível de automação (ABIMCI, 2019). Este último implica fortemente no primeiro pilar da Indústria 4.0, a digitalização. Novas abordagens como os sistemas ciberfísicos (SCFs), em sua maioria advindos de parcerias entre instituições de ensino e indústrias, podem sanar a demanda de dados para a digitalização adequada, fornecendo informação instantânea e consequente resposta de adequação aos parâmetros de controle dos objetos físicos.

A conexão de ativos à “internet das coisas” é uma tecnologia chave para facilitar o desenvolvimento. Simplificando a comunicação, provendo acesso a grande volume de dados em tempo real, e permitindo a realização de complexas ligações de valor agregado através de SCFs inteligentes (REITZ; SCHLUSE; ROSSMANN, 2019). Estas tecnologias combinadas com a computação em nuvem e avançadas técnicas

de análise de dados, estendem a gama de oportunidades para a otimização e integração da cadeia produtiva da madeira.

Seria desejável ainda que o segmento de madeira sólida, também, dispusesse de material genético melhorado especificamente para atender os seus requisitos de maneira satisfatória, principalmente quanto à taxa de conversão em madeira serrada e laminada, bem como em produtos finais (SHIMIZU et al., 2018).

A união destes pontos aponta para um cenário onde a matéria prima uniforme e de qualidade, será processada de maneira adequada e criteriosa conforme seu uso final, gerando dados a todo momento, antecipando e prevendo o local e a natureza dos problemas encontrados no processo. O conceito de “Gêmeos digitais” ou a descrição via simulação de objetos reais físicos, prevê e controla seu comportamento integrando esses objetos aos processos e sistemas próximos (REITZ; SCHLUSE; ROSSMANN, 2019). No ambiente da secagem os “Gêmeos Digitais” apresentam potencial para o aumento na qualidade de controle da produção, contudo para seu desenvolvimento adequado, existe a demanda por dados capazes de alimentar uma simulação coerente.

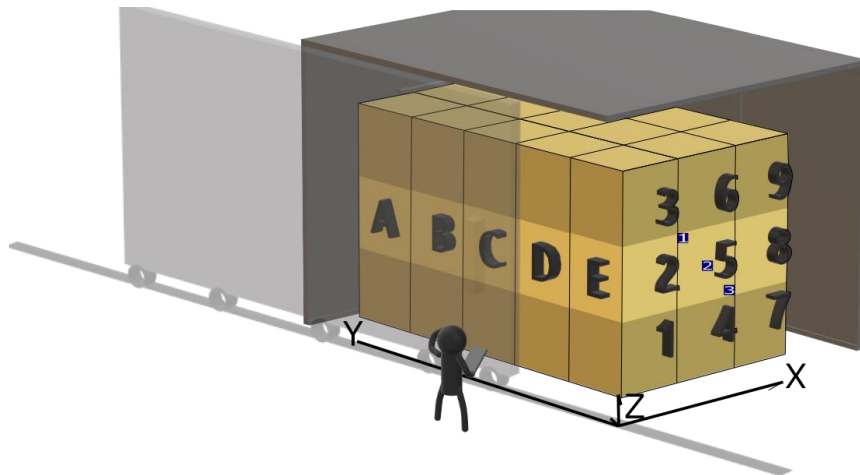
3 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os dados base para as análises deste trabalho foram resultado de uma parceria entre a empresa Moldurarte, FUPEF e UFPR, oriundos de um relatório técnico para a avaliação de ocorrência de empenamentos em molduras (KLITZKE et al., 2019). Desse relatório foram utilizados os dados obtidos em duas estufas de secagem convencional atuantes sob tábuas de *Pinus Spp.*, com espessuras de 42 mm e 27 mm. A madeira seca foi destinada à confecção de molduras. Os secadores estudados possuem capacidade para 100 m³ e 80 m³ de tábuas cada um. Caracterizados como de carregamento lateral, onde as pilhas de madeira são movimentadas por meio de empilhadeiras. Ambos possuem sistema de convecção forçada e ventiladores reversíveis, os equipamentos foram submetidos ao mesmo método de amostragem.

3.1 LOCALIZAÇÃO ESPACIAL E OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a secagem foram retiradas três tábuas de cada pilha de secagem, amostradas na diagonal da pilha (FIGURA 03 e FIGURA 04), sendo uma da base da pilha, outra do meio e outra do topo resultando em três valores do teor de umidade por pilha. Cada estufa continha 45 pilhas, as quais foram organizadas em coordenadas no formato “XYZ”, onde “X” representa a profundidade de inserção da pilha na estufa, contendo três pilhas de profundidade; “Y” representa a distribuição lateral das pilhas, sob observação frontal da estufa, com as portas abertas, contendo cinco pilhas de largura; por fim, “Z” indica a altura das pilhas, sendo amostradas em três camadas. Os eixos “X”, “Y” e “Z” foram determinados, respectivamente, a partir do vértice inferior direito da parte frontal do secador, conforme a FIGURA 03 e FIGURA 04.

FIGURA 03 - ESQUEMA DE AMOSTRAGEM UTILIZADO PARA A MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DAS TÁBUAS E VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO VENTO NAS DIFERENTES REGIÕES DA ESTUFA



Fonte: O autor (2019).

Em que: X = 1 a 9: eixo utilizado para avaliar o efeito da profundidade de pilhas; Y = A, B, C, D e E: eixo utilizado para avaliar o efeito da lateralidade na estufa; Z = 1 a 3 eixo utilizado para avaliar o efeito da altura de inserção de tábuas; Avatar = ótica de exibição dos resultados.

FIGURA 04 - SEQUENCIA DE LOCALIZAÇÃO E OBTENÇÃO DAS PILHAS E TÁBUAS DENTRO DA ESTUFA



Fonte: o Autor (2018)

3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Para cada tábua retirada das pilhas, foram retiradas duas amostras com 5 cm cada, desprezando 30 cm dos topos, conforme metodologia descrita por Wallis (1970).

Cada pilha contribuiu com 3 tábuas amostradas conforme o detalhe da pilha 5 na FIGURA 03 ou parte direita da FIGURA 04. Dessa forma cada estufa originou 270 amostras para análise, preparadas e aferidas no Laboratório de Secagem da madeira DETF-UFPR. A massa das amostras foi obtida em balança eletrônica digital, com precisão de 0,01g. Após pesagem, as amostras foram secas em estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até massa constante, em seguida, a massa foi novamente aferida possibilitando a determinação do teor de umidade, conforme a equação abaixo.

$$TU = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} * 100$$

Onde: TU = Teor de umidade (%); Mu = Massa úmida da amostra (g); Ms = Massa seca da amostra (g)

Dessa forma, cada resultado de teor de umidade final (TUF) referiu-se à média do valor das duas amostras oriundas da mesma tábua, enquanto a média das 3 tábuas inseridas na pilha referiu-se à média da pilha. Sobre todos os valores de tábuas foram realizadas análises descritivas fornecendo médias geral e local, desvios, valores máximos e mínimos presentes nas estufas. Os valores resultantes foram compilados conforme suas posições na estufa através do suplemento Xrealstats do MSEXcel, objetivando a comparação e verificação de diferenças estatísticas entre médias das diferentes posições, através do teste de Tukey. Foram também obtidos pelo software gráficos de comportamento horizontal, focados na influência do eixo “Y”, e vertical verificando “X” e “Z” conforme apontado em 3.1.

Para verificar de maneira mais específica a influência da posição espacial no TUF, foram criados dois grupos de influência vertical, sendo o primeiro representado pela altura da pilha, resultando em um valor médio oriundo de pilhas em mesmo nível vertical. O segundo grupo representa o valor médio de tábuas de diferentes setores, mas de mesma posição dentro destes, ou seja, sob um mesmo “Z” (FIGURA 03). Estes grupos foram denominados de “Pilhas” e “Tábuas”.

3.3 VELOCIDADE DO AR

Em ambas as estufas estudadas os ventiladores foram capazes de mudar o sentido do fluxo do ar durante a secagem. Dessa forma, a coleta dos dados ocorreu

com os ventiladores em funcionamento, primeiramente na parte frontal, seguida pela reversão do fluxo e nova coleta na parte traseira. Para obtenção dos dados utilizou-se um termoanemômetro digital de precisão (0,1m/s), visando representar todos os espaços dos equipamentos. Assim, esses foram obtidos no interior e exterior das pilhas, ao longo de toda a câmara de secagem. As medições forneceram 145 valores para cada área e, a partir deles, obteve-se o comportamento médio das velocidades de circulação do ar (VA) nas estufas. Os valores obtidos foram agrupados e processados nos mesmos *softwares* e assim como os valores de umidade, foram analisados conforme seus grupos de ocorrência espacial.

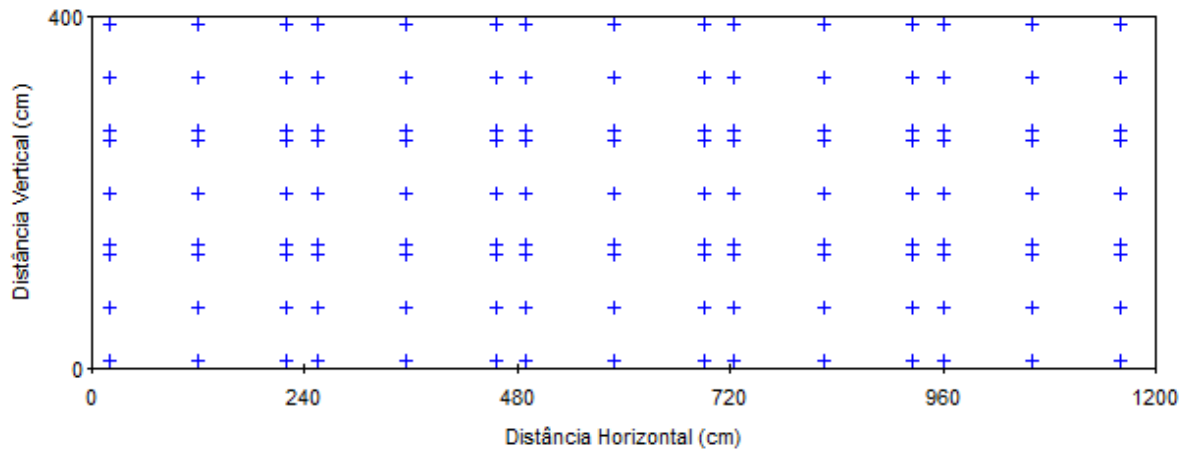
3.4 CORRELAÇÃO ESPACIAL DAS VARIÁVEIS

Os dados agrupados conforme suas posições foram compilados no *software* MSEXcel de maneira a gerar suas correlações. Buscando uma análise mais representativa da realidade, foram criadas duas variáveis para a velocidade do vento sendo V_{pontual} e V_{inf} , que representam respectivamente a velocidade medida no ponto onde foi obtida a umidade, e a velocidade de influência na área, sendo esta a média das velocidades mais próximas atuantes sobre as peças onde se mediram as umidades.

3.5 MODELAGEM ESPACIAL

Os dados foram compilados sistematicamente seguindo a amostragem apresentada no item 3.1. Foram utilizados os valores oriundos da frente e fundo dos equipamentos, objetivando comparar respostas de mesmas localidades tanto para os dados de umidade final quanto velocidades do ar. Seguindo esta proposta obteve-se uma grade regular de amostragem (FIGURA 05), que conforme Yamamoto e Landim (2013), reproduz de maneira superior a distribuição e variabilidade espacial da variável de interesse.

FIGURA 05 - REPRESENTAÇÃO DAS GRADES DE PONTOS AMOSTRADOS UTILIZADOS NA MODELAGEM ESPACIAL DE VELOCIDADES DO AR E TEORES DE UMIDADE FINAL DE TÁBUAS EM ESTUFA

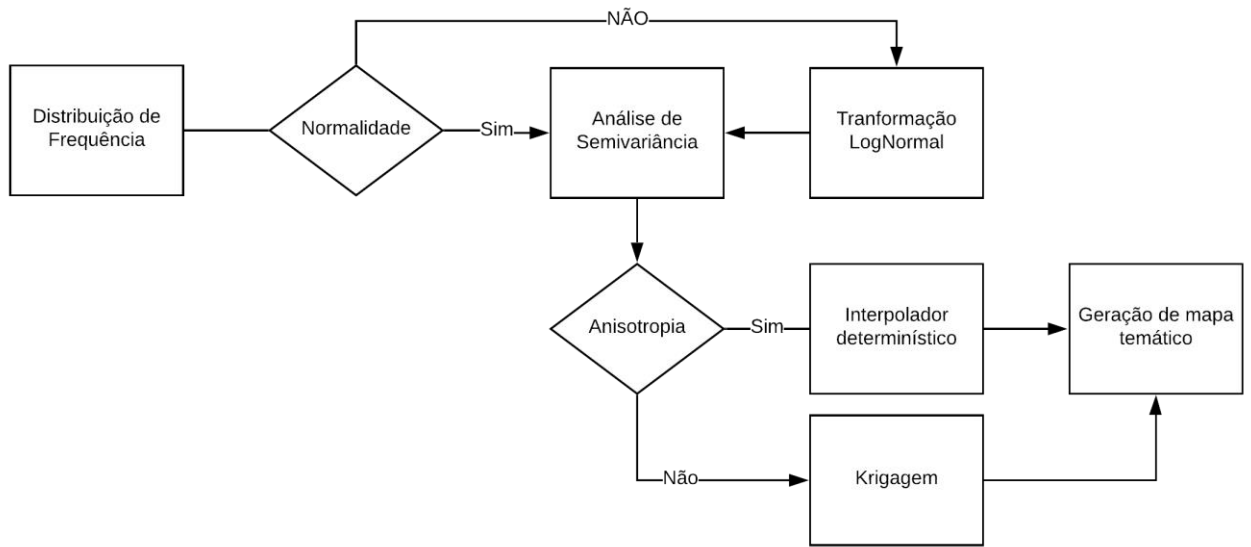


Fonte: o Autor (2019)

Anterior à geração dos mapas temáticos, foi avaliada a variogrametria do fenômeno espacial, essa também demanda análises prévias do comportamento dos dados em uso, de modo a verificar se as distribuições ocorrem de maneira normal, caso sejam verificadas distribuições não normais através do método *Shapiro-wilk*, existe a necessidade de normalização da distribuição, realizada neste trabalho através da conversão ponderada log-numérica. Os variogramas e mapas foram obtidos por meio do *software* GS+ sob diferentes parâmetros de alcance máximo (Active Lag Distance) e passos (Lag Class Distance Interval) de forma a retornar os melhores valores de ajuste de modelos, enquanto for observado fenômeno espacial. Para o ajuste se preferiu o uso de modelos esféricos e gaussianos.

Com os modelos ajustados a interpolação foi conduzida, os parâmetros utilizados foram a krigagem pontual sobre um grid uniforme, buscando pares em 16 vizinhos com o raio de busca de até 4 m. Foram mantidas linhas de eixos nos mapas temáticos, buscando representar os espaços entre as pilhas. Para analisar de maneira sistemática foi elaborado um fluxograma de tomada de decisão (FIGURA 06).

FIGURA 06 - FLUXOGRAMA PARA PROCESSAMENTO GEOESTATÍSTICO DOS DADOS NO SOFTWARE GS+



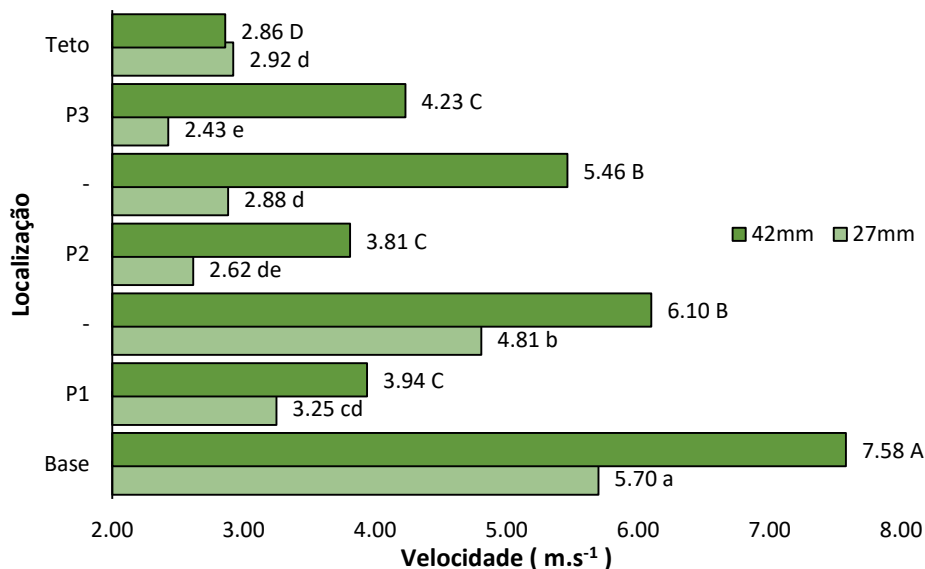
Fonte: o Autor (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VELOCIDADE DO AR

Os dados de velocidade de circulação do ar (VA) apresentaram uma tendência de distribuição vertical crescente, no sentido base-teto dos secadores, conforme FIGURA 07.

FIGURA 07 - COMPORTAMENTO VERTICAL DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFAS ATUANTES SOBRE TÁBUAS DE PINUS COM DIFERENTES ESPESSURAS



Fonte: O Autor (2019)

Legenda: P1,2 e 3: Localização das pilhas dentro das estufas; -: espaços entre as pilhas; diferentes letras após os valores representam diferença estatística de médias, avaliadas pelo teste de Tukey. Maiúsculas para as tábuas de 42mm e minúsculas para as de 27mm.

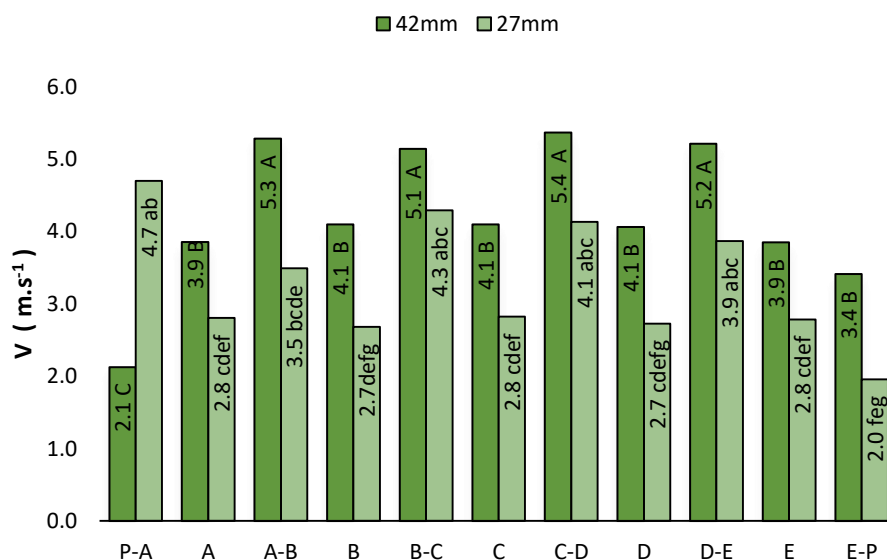
Pode-se observar para ambos os secadores, uma tendência de maiores velocidades na parte inferior dos equipamentos. A presença dos separadores de carga com maiores dimensões (pontaletes) podem favorecer o fluxo de ar nesta posição, uma vez que o vento sempre procurará fluir pelo caminho de menor resistência, neste caso, os espaços vazios. Pode-se verificar isto nos espaços entre pilhas, principalmente na parte inferior dos equipamentos. Isto pode ser atribuído ao movimento convectivo do vento que após se chocar com as paredes e aletas, é direcionado diretamente para a parte inferior do equipamento. Este fenômeno foi

verificado por Zadin et al. (2015) através de simulações multifísicas representando o comportamento do fluxo do ar em estufas de secagem.

As médias de VA dentro das cargas de madeira não diferiram no secador com tábuas de 42 mm, visto em P1, P2 e P3 na FIGURA 07. Por outro lado, o equipamento com tábuas de 27 mm apresentou diferença maior para as pilhas mais baixas. Este resultado pode ocorrer não apenas pela natureza do movimento convectivo, que força o ar para a parte inferior dos equipamentos, mas também pela menor espessura das peças, que respondem mais sensivelmente às condições do processo. A menor espessura das tábuas resulta em maior volume de espaços no equipamento e consequentemente no maior volume de ar em movimento, que apesar de apresentar velocidades menos expressivas, desloca uma massa de ar superior. Desta forma, entende-se que a quantidade maior de ar deslocada possui capacidade expandida de reter e transportar umidade, potencializando o efeito mencionado da convectividade conjuntamente à resposta mais sensível das peças menores.

Observa-se na FIGURA 08, que em ambos os secadores as médias de VA dentro das pilhas de tábuas não variaram estatisticamente para o comportamento horizontal. As diferenças de médias de velocidade em geral se justificam pela metodologia detalhada em 3.3, uma vez que foram comparadas não apenas as velocidades nas pilhas, mas também nos espaços vazios e proximidades das paredes.

FIGURA 08 - COMPORTAMENTO HORIZONTAL DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFAS ATUANTES SOBRE TÁBUAS DE PINUS COM DIFERENTES ESPESSURAS



Fonte: o Autor (2019)

Legenda: P = paredes; A,B,C,D e E = Localização das pilhas dentro dos secadores; n-n: espaços entre pilhas; diferentes letras após os valores representam diferença estatística de médias, avaliadas pelo teste de Tukey. Maiúsculas para as tábuas de 42mm e minúsculas para as de 27mm.

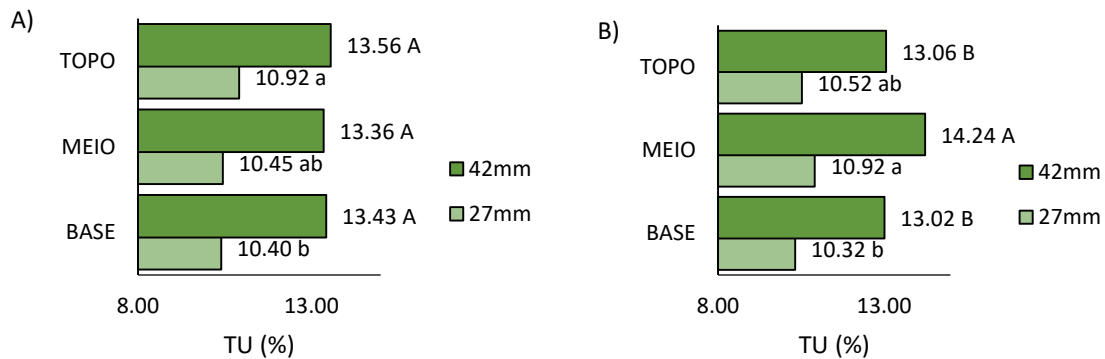
Os valores de VA se apresentaram maiores nos espaços entre as pilhas, independentemente do eixo analisado. Isto era esperado e já fora relatado em outros estudos (BIAN, 2001; VIKBERG; HÄGG; ELUSTONDO, 2015). A circulação horizontal do ar está adequadamente distribuída, principalmente na estufa de 42mm, uma vez que atende igualmente todas as distâncias relativas às paredes, mostrando que o carregamento e funcionamento dos equipamentos ocorreu de maneira uniforme. Dentro das estufas convencionais é comum a presença de defletores, também conhecidos como aletas, instalados no teto e paredes buscando reduzir os espaços vazios entre as extremidades dos equipamentos e as cargas de madeira. Os direcionadores são equipados com dobradiças, possibilitando um melhor ajuste após a montagem das cargas. Diante disto ao observar o comportamento elevado da velocidade na posição “Parede-Pilhas A” (P-A) do secador atuante sob peças de 27mm, pode-se atribuir defeitos nos direcionadores de ar, contudo, Henn (2017) aponta que, caso o controle de velocidades dos ventiladores não seja independente, aqueles próximos às paredes terão velocidades menores devido à interferência do atrito do ar com as paredes da estufa. Atribuindo mais uma possível causa ao comportamento observado.

4.2 UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS

O comportamento vertical dos teores finais de umidade das tábuas (TUF) pode ser verificado conforme a altura das pilhas dentro do secador (FIGURA 09A) e conforme a posição das tábuas dentro da pilha de secagem (FIGURA 09B).

FIGURA 09 - COMPORTAMENTO VERTICAL DO TEOR FINAL DE UMIDADE DE TÁBUAS DE DIFERENTES ESPESSURAS SECAS EM ESTUFA. A - EM DIFERENTES ALTURAS

DENTRO DO SECADOR; B - DIFERENTES ALTURAS DENTRO DA PILHA DE SECAGEM



Fonte: o Autor (2019)

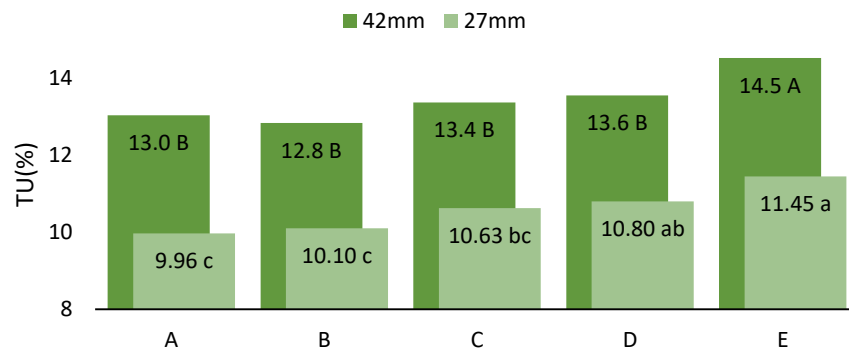
Legenda: A = Pilhas agrupadas conforme o eixo X; B = tábuas agrupadas conforme o eixo Z; Topo, Meio e Base: Localização das pilhas dentro dos secadores; Diferentes letras após os valores representam diferença estatística de médias, avaliadas pelo teste de Tukey. Maiúsculas para as tábuas de 42mm e minúsculas para as de 27mm.

Os maiores valores de TUF tábuas foram observados na parte superior do equipamento (FIGURA 09A). Estes resultados podem indicar dimensionamento incorreto do equipamento ou de seus sistemas de aquecimento, ventilação ou mesmo umidificação. Pode também indicar mau funcionamento de algum componente ou mesmo incoerências na composição de cargas das pilhas. As peças de menor dimensão se mostraram mais sensíveis à altura de armazenamento durante a secagem, visto que diferem de maneira significativa entre topo e base. O mesmo comportamento não foi observado para o secador de tábuas de 42 mm, reforçando a importância do volume do vento deslocado, maior no secador de tábuas de 27 mm, conforme discutido no comportamento das velocidades de circulação.

Os maiores TUFs das tábuas foram referentes a posição Z=2, representada pelo meio das pilhas em ambos os secadores. Para as peças de menor dimensão não houve diferença estatística entre meio e topo das pilhas, entretanto foi verificada entre meio e base (FIGURA 09B). Este resultado indica maior remoção de umidade das tábuas de pinus nas extremidades das pilhas, principalmente para as peças com 42 mm de espessura.

O comportamento horizontal do TUF apresentou tendência de distribuição no sentido de abertura da porta e novamente constatou-se resposta mais sensível para peças de menores dimensões, isto pode ser visto na FIGURA 10.

FIGURA 10 - COMPORTAMENTO HORIZONTAL DO TEOR FINAL DE UMIDADE DE TÁBUAS DE PINUS COM DIFERENTES ESPESSURAS SECAS EM ESTUFA



Fonte: o Autor (2019)

Legenda: A, B, C, D e E = Localização das pilhas dentro dos secadores; Diferentes letras após os valores representam diferença estatística de médias, avaliadas pelo teste de Tukey. Maiúsculas para as tábuas de 42mm e minúsculas para as de 27mm.

O comportamento da umidade em relação à porta para tábuas de 42mm apresentou maiores valores próximos às paredes do equipamento (FIGURA 10). Este resultado pode indicar isolamento ineficiente nas paredes, gerando condensação local e saturando o ar próximo mais rapidamente. Isto ocorre pois o ar retirará a umidade da parede ao invés da umidade superficial tábuas (JANKOWSKY; GALVÃO, 1985), para comprovar esta hipótese deveriam ser analisados novos comportamentos de secagens subsequentes. De maneira diferente o comportamento das peças de 27 mm apresenta o menor valor à esquerda do secador e maior valor à direita (FIGURA 10). Com estes resultados observa-se que ambos os secadores apresentam tendência decrescente em TUF no sentido da abertura da porta. O gráfico mostra que as peças de menores dimensões respondem estatisticamente de maneira acentuada.

4.3 CORRELAÇÃO

Os resultados da correlação das médias das variáveis apresentaram-se conforme a TABELA 01.

TABELA 01 - CORRELAÇÃO ENTRE MÉDIAS DE VELOCIDADES DE CIRCULAÇÃO DO AR NOS SECADORES E A UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS DE PINUS DE DIFERENTES ESPESSURAS

<i>Eixo Horizontal</i>	<i>Velocidade pontual</i>	<i>Velocidade na zona de influência</i>	<i>Eixo Vertical</i>	Pilhas		Tábuas	
				<i>Vpontual</i>	<i>Vinf</i>	<i>Vpontual</i>	<i>Vinf</i>
Tu% em peças de 42 mm	-0,76	-0,54	Tu% em peças de 42 mm	-0,32	-0,43	-0,88	0,31
Tu% em peças de 27 mm	0,18	-0,74	Tu% em peças de 27 mm	-0,74	-0,83	-0,60	-0,46

Fonte: o Autor (2019)

A correlação das médias de teores de umidade final com as velocidades de circulação do ar em estufas, mostrou-se inversamente proporcional na maioria dos casos, desta forma entende-se que conforme a velocidade de circulação aumenta, os teores finais de umidade apresentam-se mais baixos. Santini e Haselein (2002) constatam que as taxas de secagem apresentam relação direta com a temperatura, velocidade do ar e umidade da madeira, comprovando que de fato existe correlação entre as variáveis. Diversos autores observaram que a influência da velocidade do ar sob a taxa de secagem é decrescente a medida que o teor de umidade diminui (SANTINI; HASELEIN, 2002; WALLACE; AVRAMIDIS, 2016), assim a mudança observada no comportamento das correlações, principalmente no eixo horizontal para as peças de 27 mm, pode ser reflexo da diminuição de teores de umidade ao longo da coleta de dados. Outro fator que pode ter influenciado as correlações é a heterogeneidade das tábuas, fator inerente da madeira que altera entre árvores e conforme a região amostrada dentro do fuste (ZOBEL; JETT, 1995). Os métodos de desdobro também interferem na qualidade das tábuas (BLACKWELL; WALKER, 2006), não descartando possíveis irregularidades de empilhamento, comum em estufas de carregamento lateral.

4.4 MODELAGEM ESPACIAL

4.4.1 Análise descritiva

Os valores pertinentes encontrados na análise dos dados de velocidades de circulação em estufas e teores de umidade final, antecessora da variogrametria, pode ser observada na TABELA 02.

TABELA 02 - ANÁLISE DESCRITIVA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEOR DE UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS DE PINUS E A VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR NAS ESTUFAS

Parâmetro	42 mm		27 mm	
	Tu (%)	Velocidade (m.s ⁻¹)	Tu (%)	Velocidade (m.s ⁻¹)
Média	13,46	4,47	10,58	3,24
ErroPad	0,09	0,09	0,07	0,07
Mediana	13,21	4,25	10,41	3,00
Moda	12,32	3,80	10,12	3,00
DesvPad	1,04	1,44	0,76	1,10
Variância	1,08	2,08	0,58	1,21
Kurtose	1,15	0,71	0,25	0,82
Skewness	1,16	0,36	0,91	1,16
Alcance	4,59	8,10	3,20	5,75
Máximo	16,52	9,15	12,74	6,95
Mínimo	11,93	1,05	9,55	1,20
Assimetria	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
Grau	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
CV(%)	7,71	32,26	7,22	33,95

Fonte: o Autor (2019)

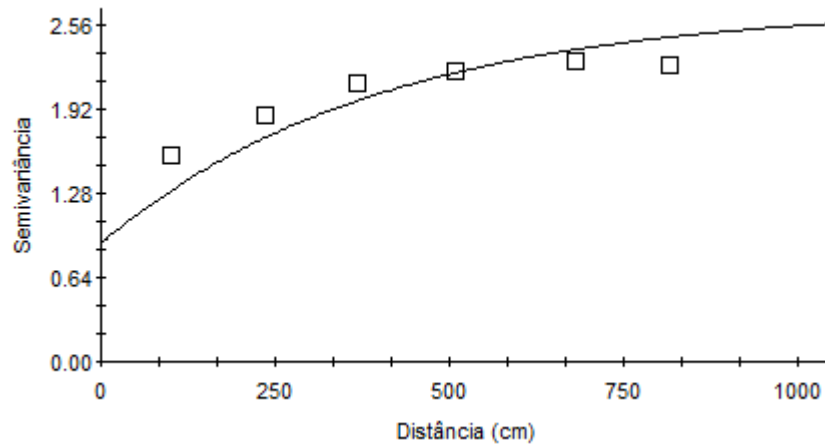
Os dados da TABELA 02 serviram como subsídio para a geração dos variogramas. Nestes dados pode-se verificar a assimetria nas distribuições dos valores, o que demandará correções prévias para a variogrametria, de maneira a evitar que poucos valores representem significativamente a amostra.

Em adição os coeficientes de variação fornecem uma ideia do comportamento das variáveis, onde os valores de VA no interior das estufas apresentaram variação superior a 30% enquanto os valores de TUF das tábuas não superaram 8% de CV (TABELA 02). Indicando mais uma vez que a ventilação não atuou de maneira ótima.

4.4.2 Variogramas

O variograma representando o modelo de ajuste para a krigagem de VA na estufa de secagem das tábuas de 42 mm foi expresso na FIGURA 11.

FIGURA 11 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO A VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR NA ESTUFA ATUANTE SOBRE TÁBUAS DE PINUS DE 42 MM DE ESPESSURA

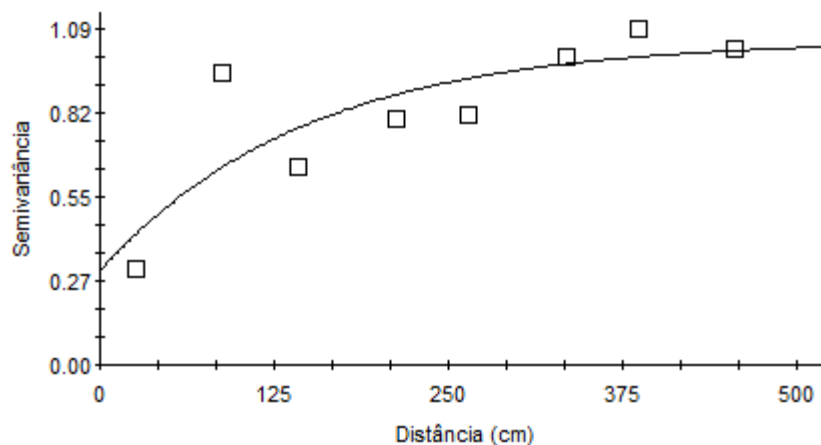


Fonte: o Autor (2019)

O ajuste apresentou boa correlação com o modelo, observada na variogrametria pela ocorrência de pontos próximos à linha, representando o comportamento teórico. Dessa forma, se observou que para os parâmetros adotados, existe diferença espacial entre os valores, progredindo com seu distanciamento. Interpreta-se que o limite da correlação espacial para os valores de VA não atingiu o momento de estagnação, chamado de patamar. Isto indica que a variável estudada variou continuamente não apenas no intervalo de distância analisado, mas também em caso de aumento deste intervalo, sem previsão para estabilização.

O variograma representando o modelo de ajuste para a krigagem do TUF das tabuas de pinus de 42 mm foi expresso na FIGURA 12.

FIGURA 12 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO TEOR DE UMIDADE FINAL DAS TÁBUAS DE PINUS DE 42 MM DE ESPESSURA

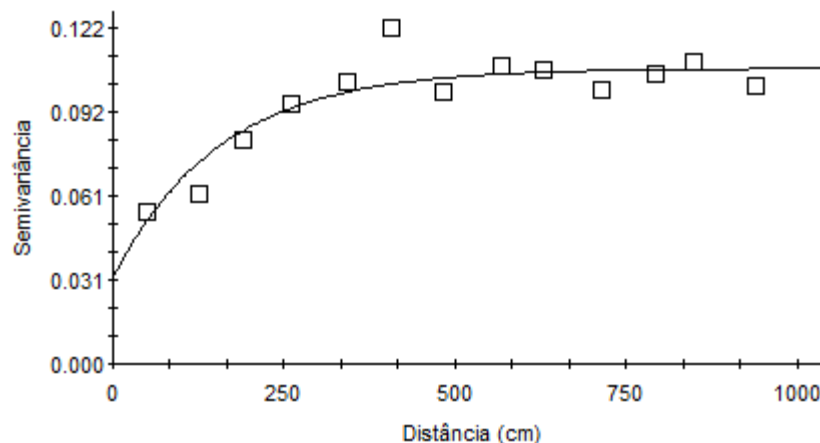


Fonte: o Autor (2019)

A mesma tendência de ausência de patamar observada em VA (FIGURA 11) também foi observada para o TUF das tábuas de pinus de 42 mm (FIGURA 12), contudo os teores de umidade das tábuas, conforme o modelo, apresentaram um impacto maior da distância nos primeiros metros de separação. Justifica-se este comportamento pela dimensão das pilhas de secagem, não superando os dois metros de comprimento. Em adição a semivariância foi menor, indicando que esta alteração apesar de ocorrer mais cedo no espaço, não foi acentuada. Esta constatação pode ser efeito da variação dentro das tábuas, mascarando possíveis respostas espaciais mais expressivas. Este modelo apresentou-se menos preciso que o anterior, fator esperado, levando em conta a heterogeneidade inerente da madeira.

A análise da variogrametria para a velocidade de circulação do ar na estufa com as tábuas de 27 mm presente na FIGURA 13, aponta que o comportamento geral diferiu daquele obtido na secagem das tábuas de 42 mm.

FIGURA 13 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFA ATUANTE SOBRE TÁBUAS DE PINUS DE 27 MM DE ESPESSURA

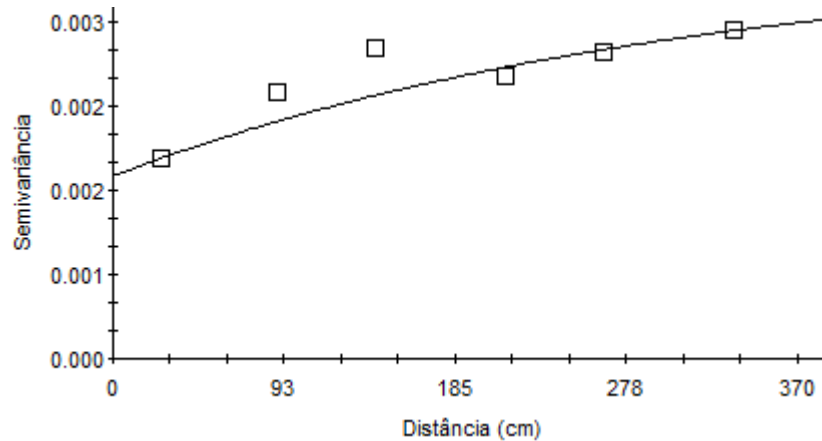


Fonte: o Autor (2019)

A semivariância para a velocidade da circulação do ar na estufa com as tábuas de 27 mm foi menor (FIGURA 13). Não foi observado um patamar definido de distribuição, contudo, foi possível verificar a partir de qual distância, a influência espacial se torna muito pequena. O variograma mostrou que após 2,5 metros a distância alterará muito pouco o grau de diferença entre os valores de VA. Este modelo apresentou boa correlação.

O variograma do comportamento de TUF para as peças de 27 mm de espessura foi representado pela FIGURA 14.

FIGURA 14 - VARIOGRAMA REPRESENTANDO TEOR DE UMIDADE FINAL EM TÁBUAS DE PINUS DE 27 MM DE ESPESSURA



Fonte: o Autor(2019)

O variograma obtido mostra que apesar dos valores dos teores de umidade das tabuas mudarem com a distância, sua alteração foi muito pequena. Novamente não houve tendência de surgimento de um patamar de equilíbrio.

Os variogramas obtidos para os TUFs apresentaram menor correlação espacial, verificada pela semivariância (FIGURA 12 e FIGURA 14). Os modelos para responderem de maneira satisfatória tiveram que ser marcados por intervalos grandes, ou seja, as umidades finais por conta da metodologia de amostragem, não apresentaram forte relação com sua posição na estufa, ainda assim não se pode descartar a hipótese da espacialidade do teor da umidade, sendo necessários mais estudos e como sugestão, maior malha amostral de umidade ou homogeneidade das cargas.

Os variogramas de VA por outro lado apresentaram boa correlação espacial e sua distribuição pode ser melhor explicada pelos modelos (FIGURA 11 e FIGURA 13). Reforçando que as áreas próximas aos pontos amostrados tem maior chance de conterem valores semelhantes de velocidade de circulação do ar, como relatado por Yamamoto e Landim (2013).

Os parâmetros gerados pela variogrametria, fomentadores da interpolação, podem ser vistos na TABELA 03.

TABELA 03 - PARÂMETROS ORIGINADOS PELA VARIOGRAMETRIA

Espessura	Variável	Co	Co+C	Ao	R ²	Rss
42mm	Velocidade do ar	0,900	2,704	400	0,957	0,172
	Umidade	0,305	1,059	1470	0,667	0,152
27mm	Velocidade do ar	0,031	0,107	157	0,835	7,15E-04
	Umidade	1,800E-03	3,97E-03	312	0,784	3,15E-07

Fonte: o Autor(2019)

Onde Co = Efeito pepita; Co+C = Patamar; Ao = Alcance; Rss = Resíduo.

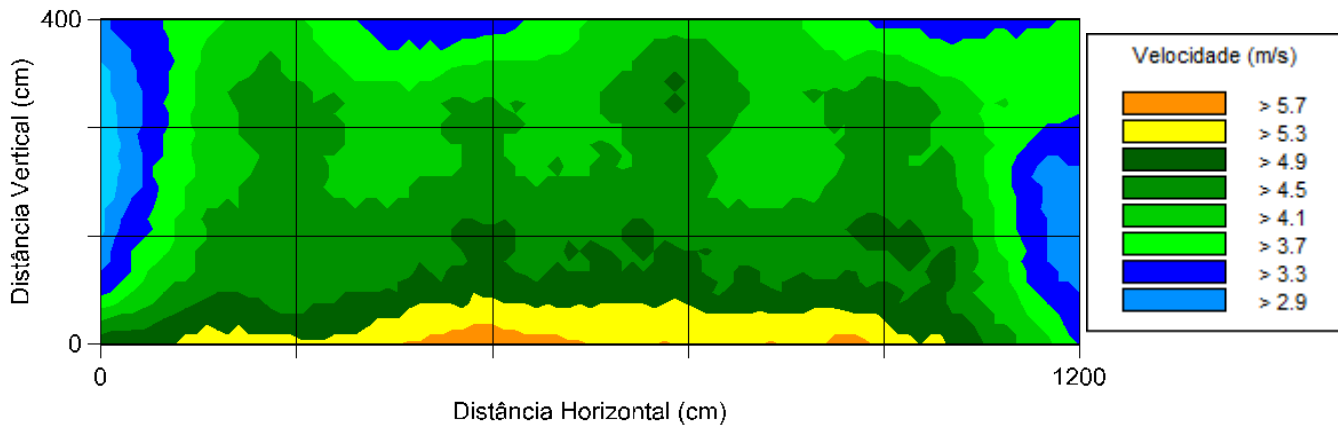
Observa-se que o fenômeno espacial, dentro dos parâmetros adotados no software, apresentou correlação razoável com o modelo exponencial, contudo ainda diferiu do esperado. No ideal teórico esperava-se observar para as umidades o chamado efeito pepita puro. Onde a distribuição espacial de teores de umidade fosse completamente aleatória. Este cenário somente poderia ser verificado com a uniformidade das demais variáveis em ação, como velocidade do vento, que apresentou influência espacial (FIGURA 11 e FIGURA 13), temperatura e umidade relativa do ar, cujos comportamentos não foram aferidos neste estudo. Mostrando desta forma que as estufas estudadas não foram totalmente adequadas em pelo menos um dos aspectos operacionais, entre estes a composição das cargas e dimensionamento dos equipamentos, reduzindo por consequência a uniformidade do produto final e a eficiência do processo como um todo.

As pequenas variações de umidade refletem diretamente na qualidade do produto final obtido, visto que os defeitos como distorções dimensionais, danos físicos e umidade incompatível ao uso, são consequências da má condução da secagem. Alguns destes defeitos além de diminuir o valor das peças, aumentam a necessidade de trabalho em cima das mesmas. Um dos exemplos é a dificuldade na colagem de peças insuficientemente secas e a necessidade de acabamento extra nas peças com rachaduras superficiais.

4.4.3 Mapas temáticos

Os variogramas permitiram que fosse conduzida a krigagem pontual, resultando mapas de distribuição das variáveis. O comportamento da VA no interior do equipamento de secagem pode ser observado na FIGURA 15.

FIGURA 15 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFA ATUANTE SOB TÁBUAS DE PINUS COM 42 MM

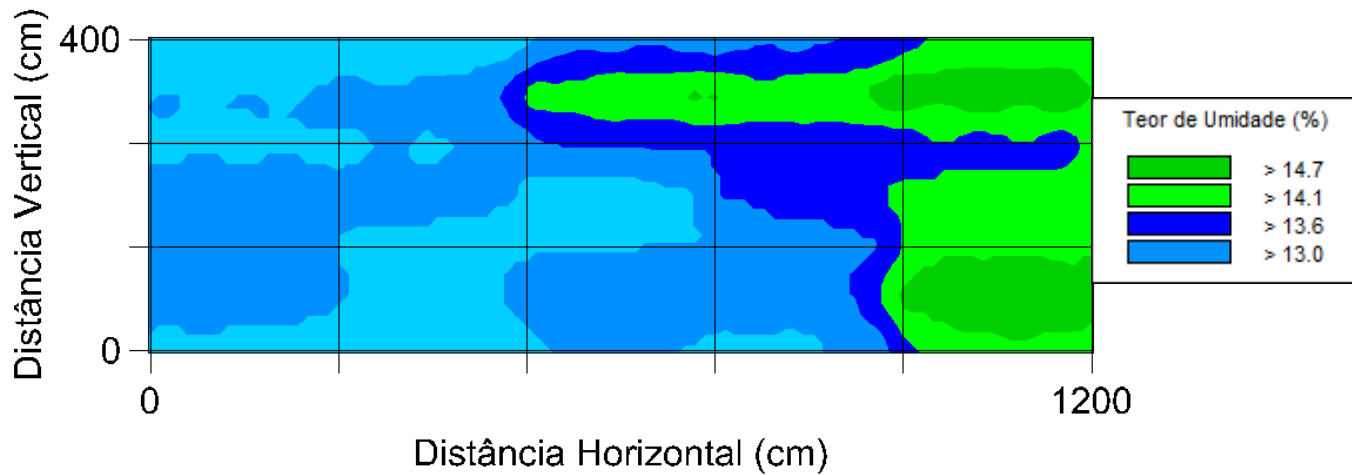


Fonte: o Autor(2019)

Observou-se a tendência de maiores valores no sentido base-topo, bem como menores valores nas laterais do equipamento de secagem (FIGURA 15), sintetizando o que foi observado na FIGURA 07 e FIGURA 08. As linhas mantidas no mapa temático apontam os espaços entre as pilhas, seus comprimentos e intersecções coincidem com focos de velocidades elevadas, reiterando o observado por Vikberg, Hägg e Elustondo (2015), e complementando que a montagem das composições de carga é essencial para a uniformidade das velocidades de circulação.

A distribuição dos teores de umidade das tábuas de pinus para a estufa atuante sobre peças de 42 mm de espessura apresentou um mapa temático representado pela FIGURA 16.

FIGURA 16 - COMPORTAMENTO DOS TEORES DE UMIDADE FINAIS EM ESTUFA ATUANTE SOB TÁBUAS DE PINUS COM 42 MM

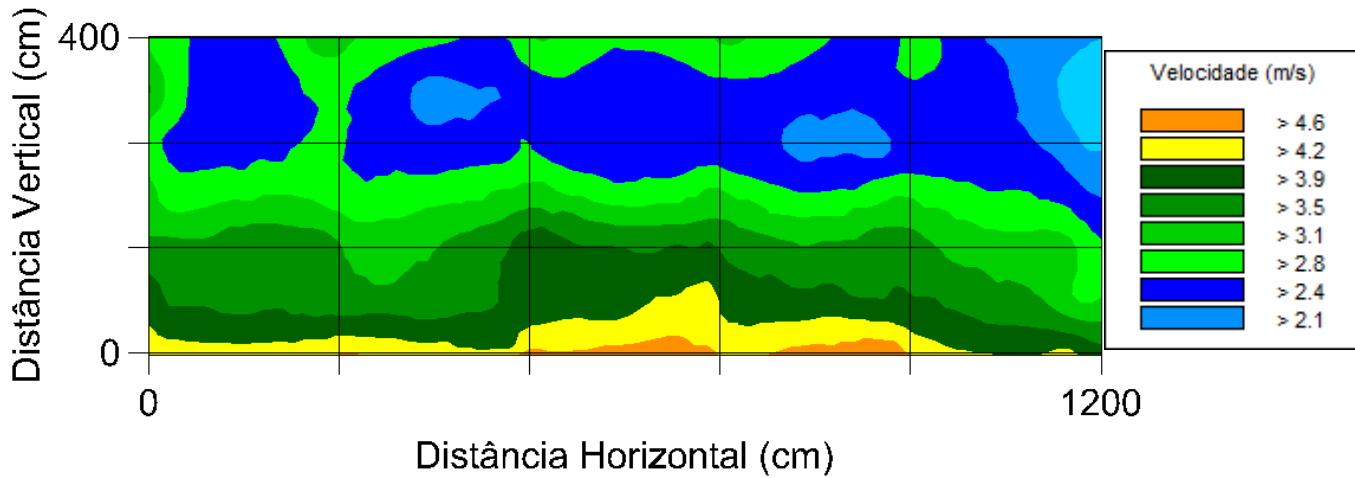


Fonte: o Autor(2019)

Novamente, o mapa temático sintetizou a dinâmica espacial do comportamento apresentado anteriormente (FIGURA 09 e FIGURA 10), reiterando a diminuição do TUF no sentido oposto à abertura da porta e crescente no sentido base-teto, bem como a maior umidade no meio das pilhas, abordada neste volume como Z2 (FIGURA 16). Esses resultados quando visualmente comparados ao mapa temático de VA (FIGURA 15), confirmam parcialmente a correlação inversamente proporcional entre as variáveis, apresentada no item “4.3”, sendo verdadeira em apenas alguns pontos dos equipamentos. Isto implica em dizer que é certo que a correlação entre as variáveis não é a única força atuante no processo, pois, nesse caso, seriam encontrados teores de umidades das tábuas maiores também na parte esquerda do equipamento, nas posições A e B da FIGURA 03.

Ao analisar os mapas temáticos da estufa atuante em peças de menor dimensão o cenário se alterou (FIGURA 17).

FIGURA 17 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO AR EM ESTUFA ATUANTE SOB TÁBUAS DE PINUS COM 27 MM

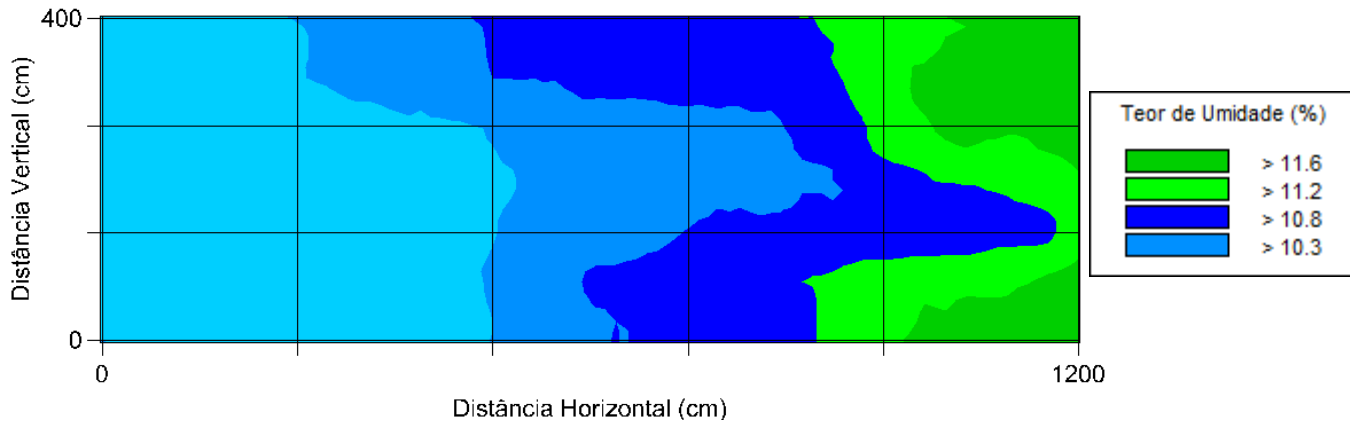


Fonte: o Autor (2019)

As velocidades de circulação do ar na estufa com tábuas de 27 mm foram menores e mais homogêneas no eixo y quando comparadas com a estufa com tábuas de 42 mm (FIGURA 15). Esse comportamento deve-se ao programa de secagem utilizado, onde tábuas menos espessas trabalham com velocidades menores, algo condizente no ponto de vista operacional, uma vez que a espessura das peças atua sobre as variáveis do processo, em especial no tempo de secagem (SIMPSON, 1991). O comportamento na parte superior mostra o que esperava ser verificado para toda a estufa, apresentando menores valores no meio das pilhas, uma vez que ali, por conta das tábuas, há maior impedimento físico e conseqüentemente menor fluxo de ar.

O mapa temático referente aos teores de umidade final das peças de 27 mm de dimensão pode ser visto na FIGURA 18.

FIGURA 18 - COMPORTAMENTO DOS TEORES DE UMIDADE FINAIS EM ESTUFA ATUANTE EM PEÇAS DE 27 MM



Fonte: o Autor (2019)

Por meio da krigagem realizada, observamos mais uma vez a síntese do que fora apresentado nos gráficos (FIGURA 09 e FIGURA 10). Os TUFs das tábuas de pinus se comportaram de maneira similar ao que fora visto horizontalmente na estufa de maiores peças (FIGURA 16), onde os maiores valores coincidiram com o sentido de abertura da porta, enquanto verticalmente se apresentaram de maneira menos clara, indicando que fatores além da velocidade de circulação determinaram o comportamento.

O uso dos secadores implica em dificuldades atreladas não apenas ao processo e aos equipamentos, mas também às características intrínsecas da madeira. Em geral, os problemas ou inadequações do processo se manifestam como defeitos ou teores de umidade inadequados para o uso. Os problemas são capazes de causar perdas no valor do produto e indicam desperdício dos recursos empregados na secagem. Portanto, poder-se-ia sanar a demanda por um processo rápido, eficiente e de boa qualidade final a partir do conhecimento das variáveis, seu comportamento e consequente gestão dentro dos limites da eficiência. Uma vez que ao entender as particularidades dos processos, pode-se alocar recursos de maneira mais eficiente.

A abordagem geoestatística permitiu a visualização da dinâmica espacial das variáveis de interesse, velocidade do ar no interior da estufa e teor de umidade das tábuas nas diferentes regiões das estufas. A metodologia apresenta potencial para ser replicada para demais variáveis, como umidade relativa e temperatura, dando subsídios para o controle total do processo de secagem, deixando assim o fator matéria prima como principal fonte de variação no processo, passível à otimização por

meio da classificação prévia do material a ser seco, bem como por meio da seleção de materiais genéticos mais adaptados para estes usos.

No caso da utilização de material heterogêneo nas indústrias, como por exemplo em indústrias de madeiras nativas, esses mapas de comportamento espacial das variáveis poderiam oferecer subsídio para a tomada de decisão de alocação eficiente de recursos. Um exemplo prático seria, após triagem do teor de umidade das tábuas, alocar as peças mais úmidas nas partes inferiores dos secadores, onde estariam sujeitas a maior velocidade do ar e, conseqüentemente, seriam secas de maneira a compensar seu excesso de umidade.

A técnica geoestatística pode representar o comportamento espacial das estufas e quando aliada à tecnologia existente de obtenção de dados, permite a aquisição de maior volume de informação, sem aumentar o número de amostras. Ainda é necessário o desenvolvimento de produtos ou técnicas para que a geoestatística possa ser aplicada para o acompanhamento em tempo real do processo de secagem. Dessa forma, essa abordagem pode ser a entrada para a avaliação do grande banco de dados obtidos da secagem e aproximação do Conceito de *Indústria 4.0* na secagem. Estas ferramentas podem promover retorno do investimento em forma de qualidade do produto, certificando a alocação eficiente de recursos enquanto gera estimativas dos dados para o constante aprimoramento das técnicas e processos.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados referentes aos teores de umidade final das tábuas e da velocidade de circulação do ar obtidos com a secagem das tábuas de pinus e pela comparação dos comportamentos oriundos dos diferentes métodos de análise, pode-se concluir que:

- A velocidade de circulação do vento no interior dos equipamentos de secagem, possui tendência no comportamento espacial atrelada principalmente ao sentido vertical.
- O teor de umidade final das tábuas, possui tendência no comportamento espacial atrelada principalmente ao sentido horizontal dos equipamentos.
- As variáveis, teor de umidade das tábuas e velocidade de circulação do ar apresentam correlação negativa em pontos.
- Os modelos exponenciais ajustados forneceram mapas temáticos de teores finais de umidade e velocidades de circulação com as mesmas tendências de comportamento observadas na análise gráfica.
- Houve diferenças de natureza paramétrica nas diferentes espessuras, contudo seus comportamentos espaciais apresentaram-se similares.

A geoestatística pode ser aplicada para representação de variáveis em estufa, diminuindo a necessidade de amostragem.

REFERÊNCIAS

ABIMCI. Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo Setorial 2019**. 2019. 160p.

BATISTA, D. C. et al. Ensaio de Taxa de Secagem e Escore de Defeitos para a Predição da Qualidade da Secagem Convencional da Madeira de *Eucalyptus* sp. – Parte 2. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 135–141, 2016.

BIAN, Z. **Airflow and wood drying models for woodkilns**. 2001.

BLACKWELL, P.; WALKER, J. **Sawmilling**. In: Primary Wood Processing. 2. ed.: Springer Netherlands, 2006. p. 203–205.

BOND, B. H.; ESPINOZA, O. **A Decade of Improved Lumber Drying Technology**. Current Forestry Reports, v. 2, n. 2, p. 106–118, 2016.

BRAZ, R. L. et al. **Curva característica de secagem da madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao ar livre**. Floresta e Ambiente, v. 22, n. 1, p. 117–123, 2015.

BUEHLMANN, U.; EDWARD THOMAS, R. **Impact of human error on lumber yield in rough mills**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v. 18, n. 3–4, p. 197–203, 2002.

DE CARVALHO, J. A. D. et al. **MODELAGEM DO SISTEMA TÉRMICO EM UM AQUECEDOR PARA SECAGEM DE MADEIRA**. Caleidoscópio, v. 1, n. 5, p. 99–104, 2015.

DE SOUZA LIMA, J. S. et al. **Estudo da viabilidade de métodos geoestatísticos na mensuração da variabilidade espacial da dureza da madeira de paraju (*Manilkara* sp)**. Revista Árvore, v. 30, n. 4, p. 651–657, 2006.

DOS SANTOS, G. R. et al. **O USO DA GEOESTATÍSTICA EM PROPRIEDADES DA MADEIRA**, 2010.

ENGELUND, E. T. et al. **A critical discussion of the physics of wood-water interactions**. Wood Science and Technology, v. 47, n. 1, p. 141–161, 2013.

FAO. Visualize data on FAOSTAT; **Roundwood & Sawnwood**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>.

GUEDES, G.; MAGOSSO, D. C. **ANÁLISE DA QUALIDADE DA MADEIRA DE DUAS ESPÉCIES DE Pinus sp. (PINACEAE) RESULTANTE DO MÉTODO DE SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL**. Revista da União Latino Americana de Tecnologia, v. 1, p. 27–41, 2013.

HENN, M. C. **Estufa automática para secagem de madeira**. 2017.

HUIJBREGTS, C. J. **Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data**. Display and analysis of spatial data, p. 38–53, 1975.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **As árvores plantadas e seus múltiplos usos**. 2016. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/multiplos-usos-da-madeira.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2019.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2019**. 2019 80p.

JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. Secagem de madeiras. **Curso Técnico. Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira**, 2013.

JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO, A. P. M. **Secagem racional da madeira**. 2. ed. São Paulo: Editora Nobel SA, 1985.

KLITZKE, R. J. et al. **Relatório - Avaliação da ocorrência de empenamentos em molduras de Pinus**. Solicitante: Indústria de Molduras Moldurarte Ltda em parceria com FUPEF e UFPR. São Ludgero - SC, Brasil. 2019 .

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1968.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do Pinus no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.

LAZAROTTO, M. et al. **Identificação de fungos emboloradores em madeira de pinus spp. em laboratório**. Floresta e Ambiente, v. 23, n. 4, p. 602–605, 2016.

LOURENÇO, P.; BRANCO, J. **Dos Abrigos da Pré-história aos Edifícios de Madeira do Século XXI**. In: História da Construção: Arquiteturas e Técnicas Construtivas.: Centro de Investigação Transdisciplinar «Cultura, Espaço e Memória» (CITCEM), 2012. p. 201–213.

NASIR, V.; COOL, J. **A review on wood machining : characterization , optimization , and monitoring of the sawing process**. Wood Material Science & Engineering , v. 0, n. 0, p. 1–16, 2018.

NAYA, S. **Industry 4.0. An opportunity for the relationship between University and Shipbuilding in the future**. In: PROCEEDINGS OF THE 25TH PAN-AMERICAN CONFERENCE OF NAVAL ENGINEERING—COPINAVAL 2019, Anais.

OLIVEIRA, L. et al. **Canadian Developments in Kiln Drying**. Drying Technology, v. 30, n. 15, p. 1792–1799, 2012.

PELISSARI, A. L. et al. **MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DA DINÂMICA E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ÁREA BASAL EM POVOAMENTO DE TECA**. Enciclopédia Biosfera, v. 9, n. 16, p. 1454–1464, 2013.

REDMAN, A. L. et al. **Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade**. Wood Science and Technology, v. 50, n. 4, p. 739–757, 2016.

REITZ, J.; SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. **Industry 4.0 beyond the Factory: An Application to Forestry**. In: TAGUNGSBAND DES 4. KONGRESSES MONTAGE HANDHABUNG INDUSTRIEROBOTER 2019, Berlin, Heidelberg. Anais... Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.

ROBLOT, G. et al. **Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber**. European Journal of Environmental and Civil Engineering, v. 14, n. 10/2010, p. 1317–1332, 2010.

RODRIGUES, C. K. et al. **MODELAGEM GEOESTATÍSTICA APLICADA AO MICROPLANEJAMENTO DA COLHEITA DE MADEIRA EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO**. BIOFIX Scientific Journal, v. 4, n. 2, p. 172, 2019.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. **EFEITO DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR SOBRE A TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE Pinus elliottii Engelm.** Ciência Florestal, v. 12, p. 99–106, 2002.

SHIMIZU, J. et al. **Esforço cooperativo para suporte à silvicultura de pinus no Brasil**. In: 4º ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA 2018, Ribeirão Preto, SP, Brasil. Anais. Ribeirão Preto, SP, Brasil

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Do. **Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas**. Acta Amazonica, v. 43, n. 2, p. 179–184, 2013.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison, Wisconsin: United States Government Printing, 1991. v. 188

TAKESHITA, S.; JANKOWSKY, I. P. **Redução na movimentação dimensional da madeira de Jatobá (*Hymenaea sp.*) e Muiracatiara (*Astronium sp.*) submetidas a tratamento térmico adicional**. Scientia Forestalis, v. 43, n. 106, p. 345–352, 2015.

VIKBERG, T.; HÄGG, L.; ELUSTONDO, D. **Influence of fan speed on airflow distribution in a batch kiln**. Wood Material Science & Engineering, v. 10, n. 2, p. 197–204, 2015.

WALLACE, J.; AVRAMIDIS, S. **Impact of airflow on hem-fir kiln drying**. Drying Technology, v. 34, n. 11, p. 1354–1358, 2016.

WALLIS, N. K. **AUSTRALIAN TIMBER HANDBOOK**. Sydney: Halstead Press, 1970.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

ZADIN, V. et al. **Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns**. Applied Mathematics and Computation, v. 267, p. 465–475, 2015.

ZOBEL, B. J.; JETT, J. B. **Genetics of Wood Production**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.