Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

ISSN 2237-8642

AVALIAÇÃO DA UMIDADE EM PILHAS DE FARDOS DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO CAMPO COM A UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS

Evaluation of moisture in sugarcane straw bales piles in the field using geoestatistical techniques

Evaluación de la Humedad em fardos de paja de caña de azúcar mediante técnicas geostadísticas

Marcelo Scantamburlo Denadai
Faculdade de Tecnologia – Fatec Botucatu
marcelo.denadai@fatec.sp.gov.br

Saulo Philipe Sebastião Guerra
Universidade Estadual Paulista – FCA/UNESP
saulo.guerra@unesp.br

Emanuel Rangel Spadim
Universidade Estadual Paulista – FCA/UNESP
emanuel.spadim@unesp.br

Humberto de Jesus Eufrade Junior
Universidade de São Paulo – ESALQ/USP
h.eufrade@usp.br

Resumo: A cana-de-açúcar é plantada em 23 estados brasileiros totalizando mais de 10,2 milhões de hectares, e para cada hectare existem em torno de 10 toneladas de palhiço (base seca), biomassa resultante da colheita mecanizada. No Brasil, o palhiço é relevante para o setor pelo volume produzido, e pode ser utilizado para a produção de vapor, energia elétrica, etanol de segunda geração e papel, sendo o enfardamento a forma mais utilizada no recolhimento a campo. Devido à entressafra da cana-de-açúcar, é necessário a estocagem dos fardos produzidos em grandes pilhas por até um ano. A maneira mais adequada para armazenar fardos de palhiço ainda não é eficiente, o que acarreta em perdas de biomassa, maiores custos e redução dos lucros. Com o objetivo de propor técnicas mais eficientes no armazenamento de palhiço, foi avaliada, por meio de técnicas geoestatísticas, a distribuição da umidade no interior de pilhas de palhiço de cana-de-açúcar armazenadas em campo,

sem cobertura. Foram consideradas duas densidades de enfardamento, três níveis de precipitação acumulada e a picagem ou não do palhiço antes do enfardamento. Ao todo, nove pilhas foram instaladas, sendo amostrados 294 pontos de umidade por pilha. A análise e processamento dos dados consistiu em verificar a existência de dependência espacial, e existindo, realizou-se a interpolação dos dados pelo método de Krigagem ordinária por predição, para estimar valores em locais não medidos e serem criados os mapas de distribuição da umidade nas pilhas. Em todos os tratamentos avaliados foi observada a existência de dependência espacial, sendo possível a utilização de métodos geoestatísticos para análise. O modelo esférico foi o mais adequado para descrever o comportamento da umidade no interior das pilhas. A picagem do palhiço interferiu na distribuição da umidade, assim como a densidade e a quantidade de precipitações acumuladas. Para curtos períodos de armazenamento, fardos de palhiço picado permaneceram mais secos, enquanto que para períodos mais longos, fardos de palhiço não picado mantiveram-se mais secos. Além disso, pilhas de fardos com alta densidade demonstraram maior eficiência na manutenção de biomassa seca.
Palavras-chave: Armazenamento. Biomassa. Densidade. Dependência espacial.

Abstract: Sugarcane is planted in 23 Brazilian states totaling more than 10.2 million hectares, and for each hectare there are around 10 tons of straw (db), biomass resulting from mechanized harvesting. In Brazil, the straw is of relevance to the sector by the volume produced and can be used for the production of steam, electricity, second-generation ethanol, and paper, and the bale is the most used form in field harvesting. Due to the sugarcane harvesting, it is necessary to store the bales produced in large piles for up to one year. The best way to store bales of straw is still unknown, which leads to biomass losses, higher costs, and reduced profits. In order to provide more efficient techniques for the storage of straw, we evaluated the distribution of moisture inside the piles stored in the field, without coverage, in two baling densities, three accumulated amounts of precipitation, and the picking or not of the straw before the baling. Over all, nine piles were assembled, and 294 moisture points per pile were sampled. The analysis and data processing consisted in verifying the existence of spatial dependence, and existing, the data interpolation was carried out by the ordinary kriging method by prediction, to estimate values at unmeasured locations and to create the moisture distribution maps in the stacks. In all the evaluated treatments the existence of spatial dependence was observed, being possible the use of geostatistical methods for analysis. The spherical model was the most appropriate to describe the behavior of moisture inside the cells. The chopping of straw affected the distribution of moisture, as well as the density and amount of precipitation accumulated. For short periods of storage, bales of chopped straw remained drier, while for longer periods, bales of chopped straw remained drier. High-density bales were more efficient in maintaining the driest biomass.
Keywords: Storage. Biomass. Density. Spatial dependence.

Resumen: La caña de azúcar se planta en 23 estados brasileños, totalizando más de 10,2 millones de hectáreas, y por cada hectárea se producen alrededor de 10 toneladas de paja (bs), biomasa resultante de la cosecha mecanizada. En Brasil, la paja es relevante para el sector por el volumen producido y puede utilizarse para producir vapor, electricidad, etanol de segunda generación y papel, siendo el empacado la forma más utilizada de recolección en el campo. Debido a la temporada baja de la caña de azúcar, es necesario almacenar los fardos producidos en grandes montones hasta por un año. La forma más adecuada de almacenar fardos de paja aún no es eficiente, lo que provoca pérdidas de biomasa, mayores costes y menores beneficios. Con el objetivo de brindar técnicas más eficientes de almacenamiento de paja, se evaluó la distribución de la humedad dentro de montones de paja de caña almacenada en campo, sin cobertura, en dos densidades de empacado, mediante técnicas geoestadísticas de tres cantidades de agua acumulada por la precipitación y el picado o. no de paja antes del empacado. En total, se instalaron nueve pilotes y se tomaron muestras de 294 puntos de humedad por pilote. El análisis y procesamiento de los datos consistió en verificar la existencia de

dependencia espacial, y de existir, se realizó la interpolación de datos mediante el método Kriging ordinario por predicción, para estimar valores en ubicaciones no medidas y crear mapas de distribución de humedad en las baterías. En todos los tratamientos evaluados se observó la existencia de dependencia espacial, lo que permitió utilizar métodos geoestadísticos para el análisis. El modelo esférico fue el más apropiado para describir el comportamiento de la humedad en el interior de las pilas. Cortar la paja interfirió con la distribución de la humedad, así como con la densidad y cantidad de precipitación acumulada. Durante períodos de almacenamiento cortos, los fardos de paja picada permanecieron más secos, mientras que durante períodos más largos, los fardos de paja sin picar permanecieron más secos. Las pilas de fardos de alta densidad fueron más eficientes para mantener la biomasa más seca.

Palabras clave: Almacenamiento. Biomasa. Densidad. Dependencia espacial.

Submetido em: 10/09/2024
Aceito para publicação em: 10/09/2025
Publicado em: 23/10/2025

1. INTRODUÇÃO

A fim de evitar interrupções na cadeia de abastecimento das indústrias, é necessário armazenar biomassa na fábrica ou nas fazendas (Kanzian, 2009), porém, a longo prazo pode ocorrer decomposição microbiológica, aumento do teor de umidade e redução do poder calorífico (Krzyzaniak et al., 2016).

Fatores ambientais como radiação solar, velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa e umidade do solo influenciam o comportamento de secagem das culturas no campo. Estes parâmetros meteorológicos são altamente correlacionados em condições de campo e torna-se difícil analisar o efeito de um parâmetro individual sobre o potencial de secagem da cultura (Borreani; Tabacco, 1998). De todos os fatores ambientais, a radiação solar tem a maior relevância na taxa de secagem. Assim, a radiação solar deve ser incluída nos modelos para prever as taxas de secagem das culturas nas condições de campo (Bartzanas et al., 2010; Khanchi et al., 2013; Smith, 1990).

As diferenças de umidade dos pontos de monitoramento dentro dos fardos indicam que a densidade da palha é uma variável importante, assim como a temperatura no ponto de medição. Destacam-se também várias lacunas no conhecimento, incluindo o efeito da densidade da palha, transição de vapor e taxas de transferência de umidade através de um fardo (Robinson et al., 2017).

A palha tem capacidade aparente para tolerar certa capacidade de umidade (Straube, 2009; Straube; Schumacher, 2003; Lawrence et al., 2009; Carfrae, 2011), mas é recomendado que não exceda 25 % (Carfrae, 2011). Outros experimentos incluem a capacidade aparente da palha suportar umidade superior a 25 %, entretanto outros fatores que influenciam, como tempo e temperatura, devem ser levados em consideração. A velocidade na qual ocorre o equilíbrio levanta uma questão acerca da taxa de transferência de umidade através de um fardo quando afetado pela umidade relativa do ar (Robinson et al., 2017).

A qualidade da biomassa de madeira, por exemplo, durante o armazenamento, é afetada por diversos fatores como condições climáticas, temperatura, dimensão da pilha, aeração das pilhas, e o método de armazenamento. O uso de cobertura feita de material permeável melhora a qualidade dessa biomassa, diminuindo o teor de umidade e aumentando a energia contida no material (Krzyzaniak et al., 2016). Para o palhiço de cana-

de-açúcar, as condições podem ser semelhantes, uma vez que o tecido da palha de cana contém os mesmos componentes químicos que o bagaço ou a madeira (Olivares et al., 2008).

No armazenamento de pilhas de fardos de cavacos de madeira, o uso de filme plástico é uma alternativa aceitável a outras técnicas de armazenagem por não apresentar perdas de energia, mas, por outro lado, a biomassa não perde água. Esse resultado não é alterado em função do local, no entanto, é necessário equipamento especializado para realizar esse tipo de revestimento no fardo e que não o danifique em movimentações posteriores (Manzone, 2017).

Na construção de casas com isolamento térmico provenientes de fardos de palha, existem divergências sobre a resiliência da palha exposta a elevados níveis de umidade, podendo proporcionar certos riscos (Robinson, 2014). O processo de enfardamento de palha ainda precisa ser mais estudado (Leblicq, 2015).

O geoprocessamento utiliza técnicas matemáticas e computacionais na análise espacial dos dados, com instrumentos e softwares diversificados. Informações que são subsidiadas por técnicas de geoprocessamento e geoestatística apresentam melhor suporte e segurança para a tomada de decisões (Medeiros, 2012). 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 (Yamamoto; Landim, 2015).

Diante da complexidade da interação palha e água, e ao nível insuficiente de informação no armazenamento de palhiço no Brasil, algumas indústrias brasileiras já tiveram problemas com incêndios em seus estoques de fardos, como a Granbio, Fibraresist, e Usina Barra Grande, ambas referências no aproveitamento dessa biomassa. A utilização do palhiço é relevante para o setor sucroalcooleiro e, nesse intuito, o objetivo deste trabalho foi avaliar, a partir de técnicas geoestatísticas, a distribuição da umidade no interior de pilhas de palhiço de cana-de-açúcar armazenados em campo, sem cobertura, em diferentes densidades, quantidades de água acumuladas de precipitações, e a picagem ou não do palhiço antes do enfardamento.

2. METODOLOGIA

O experimento foi desenvolvido em fazenda produtora de cana-de-açúcar, localizada no município de Lençóis Paulista/SP, que, além de produzir cana-de-açúcar para usina sucroalcooleira, também enfardava e comercializava palhiço em fardos. Estes foram empilhados (Figura 1) a fim de avaliar a distribuição da umidade em diferentes pilhas de fardos.

Foi escolhida uma área plana para a alocação das pilhas de fardos (Figura 2), sendo selecionado um talhão de cana-de-açúcar recém colhido e, por segurança, com vista para a sede da fazenda.

Figura 1 - Instalação das pilhas de fardos no campo



Fonte: Marcelo Scantamburlo Denadai (2016).

O enfardamento geralmente é realizado entre sete e 15 dias após a colheita da cana-de-açúcar devido a necessidade de a umidade ficar abaixo de 15 %, o que acarreta problemas para os tratos culturais subsequentes na usina.

Figura 2 - Pilhas de fardos instaladas no campo



Fonte: Marcelo Scantamburlo Denadai (2016).

As pilhas foram alocadas no centro do talhão, evitando a proximidade de estradas, para dificultar o acesso de pessoas não autorizadas e reduzir o risco de um possível incêndio acidental dos fardos armazenados.

A fazenda contava com infraestrutura adequada de máquinas, área disponível e mão de obra para a execução do experimento. As pilhas foram organizadas próximas à coordenada 22°30’21” S e 48°48’43” W, e avaliadas no período de 08/10/2015 a 16/12/2015.

O aleiramento e enfardamento do palhiço foram realizados no mesmo dia do carregamento e instalação do experimento das pilhas no campo, sendo a umidade média da biomassa de 10 % em base úmida. O aleiramento foi realizado com um enleirador Massey Ferguson 5130 e o enfardamento com as enfardadoras (Figura 3) Challenger 2270 XD e Krone Big Pack 1290 XC com “triturador frontal”.

Figura 3 - Enfardadoras disponíveis na propriedade, sendo utilizadas as duas primeiras (da esquerda para a direita)



Fonte: Marcelo Scantamburlo Denadai (2016).

As pilhas de fardos consistiram em três tratamentos, considerando a densidade dos fardos e a picagem ou não do palhiço antes do enfardamento. Essa composição resultou nos tratamentos NPAD (pilha de fardos de palhiço não picado e de alta densidade), NPBD (pilha de fardos de palhiço não picado e de baixa densidade) e PBD (pilha de fardos de palhiço picado e de baixa densidade). Não foi possível o enfardamento de um tratamento PAD (palhiço picado e de alta densidade) devido à enfardadora não ter atingido a mesma densidade de fardos do tratamento NPAD. Apesar do ajuste realizado por meio de um painel eletrônico instalado no trator, para aumento na densidade dos fardos, não foi obtido valor correspondente ao tratamento NPAD, possivelmente pelo efeito mola da palha. O palhiço picado refere-se à presença e utilização de um picador, denominado “pre-chopper” (triturador frontal), que é acoplado ao “pick-up” (frontal recolhedor de palhiço) da enfardadora.

Os três tratamentos foram instalados em três repetições na data de 08/10/2015 (0 DAM – dias após instalação), sendo possível a avaliação da umidade no interior das pilhas em três períodos distintos. Os três períodos avaliados referem-se às medições realizadas nas datas de 28/10/2015 (20 DAM), 01/12/2015 (54 DAM) e 16/12/2015 (69 DAM), resultando em diferentes quantidades de água acumuladas de precipitações (Tabela 1), para cada tratamento. Para a avaliação, foi necessário desmontar cada pilha, afastando os fardos para possibilitar as medições com o sensor de umidade, modelo Preagro 25 da Farmcomp.

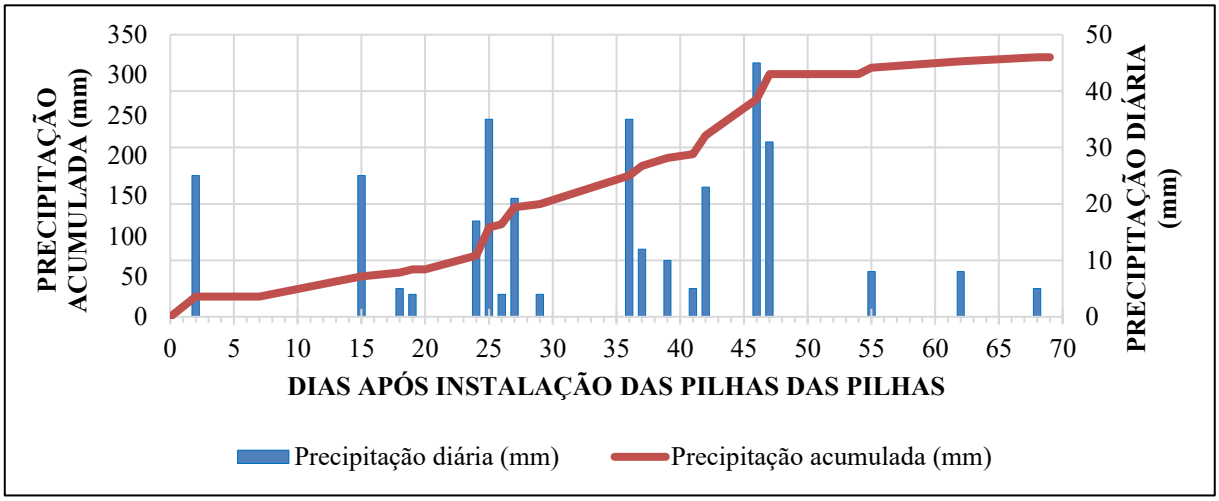
Tabela 1 - Tratamentos das pilhas de fardos, precipitação acumulada, datas de avaliação e nomenclatura utilizada nos resultados

	Palhiço no fardo	Densidade dos fardos	Precipitação acumulada até a avaliação	Data da medição	Dias após instalação das pilhas	Nomenclatura utilizada
Tratamentos	Palhiço não picado (NP)	Alta densidade (AD) 193 kgMS m^{-3}	59 mm	25/10/2015	20	NPAD-59
			301 mm	01/12/2015	54	NPAD-301
			322 mm	16/12/2015	69	NPAD-322
		Baixa densidade (BD) 147 kgMS m^{-3}	59 mm	25/10/2015	20	NPBD-59
			301 mm	01/12/2015	54	NPBD-301
			322 mm	16/12/2015	69	NPBD-322
	Palhiço picado (P)	Baixa densidade (BD) 147 kgMS m^{-3}	59 mm	25/10/2015	20	PBD-59
			301 mm	01/12/2015	54	PBD-301
			322 mm	16/12/2015	69	PBD-322

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

As precipitações acumuladas (Figura 4) nos períodos avaliados foram de 59, 301 e 322 mm, da primeira para a última data de avaliação, sendo essas coletadas a partir de um pluviômetro analógico instalado na área do experimento.

Figura 4 - Precipitações diárias e acumuladas durante o período do experimento



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

As densidades, definidas pela razão entre a massa e o volume dos fardos foram selecionadas a partir da mínima e máxima densidade disponível na enfardadora, ajustadas por meio de um painel eletrônico instalado na cabine do trator. Para a menor e maior densidades ajustadas, corrigida a umidade para massa seca (base seca), obteve-se fardos de 147 e 193 kgMS m^{-3}, sendo a maior densidade 31 % superior a menor.

A massa dos fardos utilizada no cálculo da densidade foi mensurada no início do experimento a partir de uma balança portátil, com capacidade máxima de 1000 kg e resolução mínima de um quilograma (Figura 5), sendo corrigida a umidade para massa seca. O desvio padrão da massa dos fardos foi calculado, resultando nos valores de 9, 11 e 5 kg respectivamente para os tratamentos NPAD, NPBD e PBD.

Figura 5 - Balança portátil com engate para carro



Fonte: Marcelo Scantamburlo Denadai (2016).

O volume foi obtido pela multiplicação das medidas efetuadas nos três eixos dos fardos, sendo essas a largura, altura e comprimento, mensurados individualmente a partir de trena graduada com fundo de escala de um milímetro.

Cada pilha consistiu em 27 fardos (3 x 3 x 3 fardos) de 0,90 m x 1,20 m x 2,20 m (altura x largura x comprimento), totalizando pilhas de 2,70 m x 3,60 m x 6,60 m, respectivamente (64 m3). A umidade no interior da pilha foi obtida por meio de um sensor de umidade resistivo (Figura 6), previamente calibrado no Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia

(LABB) da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP). Este sensor tem ampla faixa de leitura, possibilitando medições entre 8 e 73 % de umidade em base úmida.

Figura 6 - Medição da umidade nas pilhas a partir do sensor Preagro 25



Fonte: Marcelo Scantamburlo Denadai (2016).

Os pontos de medição de umidade foram coletados em seis faces para cada pilha de fardos, distribuídos ao longo dos 6,60 m de comprimento das pilhas. Cada face consistiu na medição de 49 pontos de umidade, compondo uma malha de 7 x 7 pontos, respectivamente para altura e largura. Portanto, em cada pilha foram coletados 294 pontos de umidade, compostos por seis faces de 49 pontos (Figura 7).

Para cada tratamento foi gerado um mapa da distribuição da umidade no interior da pilha, composto pelos pontos médios de umidade das seis faces de cada pilha. Primeiramente, verificou-se a existência de dependência espacial, expresso pelo Índice de Dependência Espacial (IDE), que foi estimado pela fórmula proposta por Cambardella et al. (1994) e modificada por Zimback (2001):

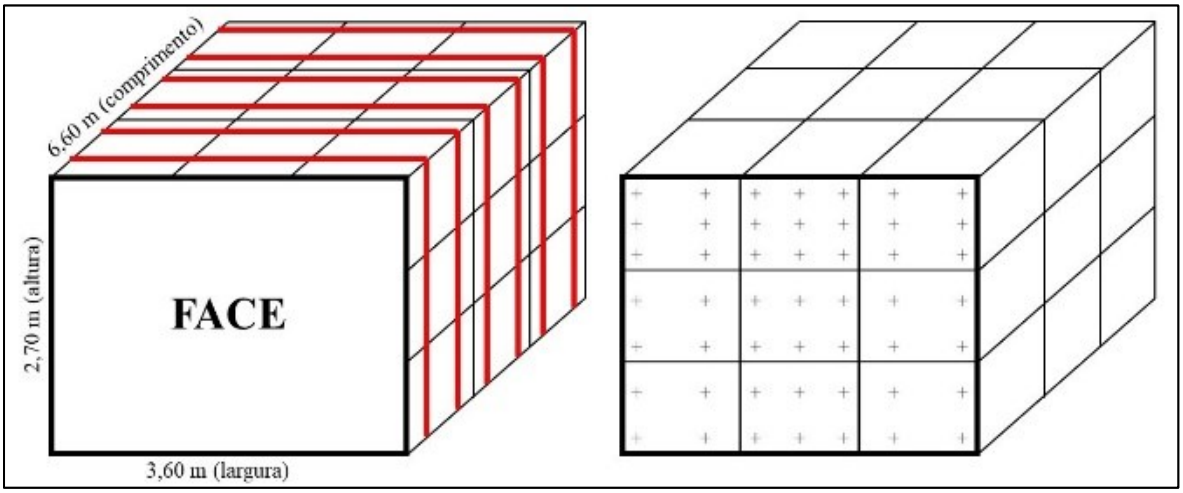
$$IDE\ (\%)=C/(C+Co)\ \times 100 \qquad (1)$$

Onde C é a variância estrutural ou espacial, Co é o efeito pepita, C+Co é o patamar.

Zimback (2001) classificou como forte dependência espacial para IDE maior que 75 %, moderada dependência entre 25 % a 75 % e baixa dependência para relação menor que 25 %.

Comprovada a existência de dependência espacial, realizou-se a interpolação dos dados pelo método de Krigagem ordinária por predição, para estimar valores em locais não medidos.

Figura 7 - Croqui em perspectiva da pilha de 27 fardos evidenciando a localização das seis faces (à esquerda) e a disposição dos 49 pontos de medição por face (à direita)



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

A análise espacial foi elaborada a partir do programa ArcMac, versão 10.3, sendo o variograma resultante ajustado, permitindo melhor correspondência do modelo com os dados. A partir disto, os mapas de distribuição de umidade nas pilhas de fardos foram gerados, permitindo a visualização das diferenças entre os tratamentos.

3. DESENVOLVIMENTO

O Índice de Dependência Espacial (IDE) para os tratamentos variou de moderado a forte, não havendo o efeito pepita puro (Tabela 2), que significa ausência de dependência espacial. Dessa forma, foi possível utilizar a Krigagem ordinária para análise dos dados e confecção dos mapas de umidade. Foi observado forte dependência espacial para oito dos nove tratamentos avaliados. Somente para o tratamento NPAD, no primeiro período avaliado (59 mm de precipitação acumulada), foi observado IDE de 69%, sendo classificado como dependência espacial moderada. O tamanho do passo que melhor ajustou-se ao modelo para todos os tratamentos foi 0,46 m, que representa a distância entre os pontos que irão compor o cálculo da variância média.

Observa-se que quanto maior a quantidade de água acumulada nas pilhas de fardos, maior foi o efeito pepita para os três tratamentos quanto à picagem ou não do palhiço, podendo estar associado a um erro na medição da umidade ou uma variabilidade de pequena escala não observada na amostragem realizada. Associado à essa observação, os IDE foram menores para os tratamentos NPAD, quando comparado com os tratamentos NPBD, respectivamente para cada período avaliado. A redução da dependência espacial entre os pontos pode estar relacionada com o aumento da densidade dos fardos.

Tabela 2 - Análise geoestatística das pilhas de fardos de palhiço de cana-de-açúcar avaliados em diferentes tratamentos e chuvas acumuladas

Pilhas	Precipitação (mm)	Efeito pepita (C_0)	Alcance (m)	Patamar ($C+C_0$)	Modelo	IDE (%)
NPAD	59	11	3,00	36,00	Esférico	69
	301	35	4,00	809,68	Esférico	96
	322	60	4,20	700,91	Esférico	91
NPBD	59	5	4,20	57,83	Esférico	91
	301	15	3,81	744,76	Esférico	98
	322	20	4,30	560,07	Esférico	96
PBD	59	2	5,52	10,07	Esférico	80
	301	15	5,52	845,86	Esférico	98
	322	40	3,33	589,61	Esférico	93

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

O modelo esférico foi o que mais se adequou aos dados no variograma. Vários pesquisadores afirmaram que o modelo esférico é o mais adaptado para descrever o comportamento de variogramas de atributos de plantas e de solos (Trangmar et al., 1987; Paz et al., 1996; Salviano, 1996; Vieira, 2000). Neste, o patamar e o alcance são claramente identificados e geralmente o efeito pepita é pequeno em relação a este patamar (Lamparelli et al., 2001), como observado neste trabalho com pilhas de fardos de palhiço.

Na bibliografia não existem relatos da avaliação da umidade em pilhas de fardos de palhiço de cana-de-açúcar e outros materiais a partir de métodos geoestatísticos, sendo este

o primeiro trabalho a avaliar este material enfardado, empilhado, sob ocorrência de precipitações, e durante 69 dias. As pilhas de fardos apresentaram dependência espacial, sendo possível a utilização de métodos geoestatísticos para análise. Os valores observados na análise do variograma podem ser utilizados como referência para trabalhos futuros com palhiço.

A partir dos modelos ajustados, nove mapas relativos às nove pilhas de fardos foram confeccionados (Figura 8), sendo possível verificar a distribuição da umidade no interior das pilhas. Observou-se que para o primeiro período avaliado (precipitação acumulada de 59 mm), a pilha PBD-59 foi superior, ou seja, mais seca, aos demais tratamentos com mesmo acúmulo de chuvas (NPAD-59 e NPBD-59). A pilha PBD-59 manteve-se mais seca, seguida da pilha NPAD-59 e, por último, da pilha NPBD-59.

O fato da pilha PBD ser composta de fibras de menor comprimento, devido à picagem antecedendo o enfardamento, pode ocasionar em melhor acomodação do palhiço nos fardos, permitindo que a água penetre com maior dificuldade do que na pilha composta de fibras de maior comprimento (NPAD e NPBD). Fibras mais longas facilitariam a entrada de água pela disposição mais heterogênea destas nos fardos. A disposição das fibras também pode ter facilitado a absorção de água do solo para as pilhas, sendo este fenômeno observado em todas as pilhas NPAD e NPBD.

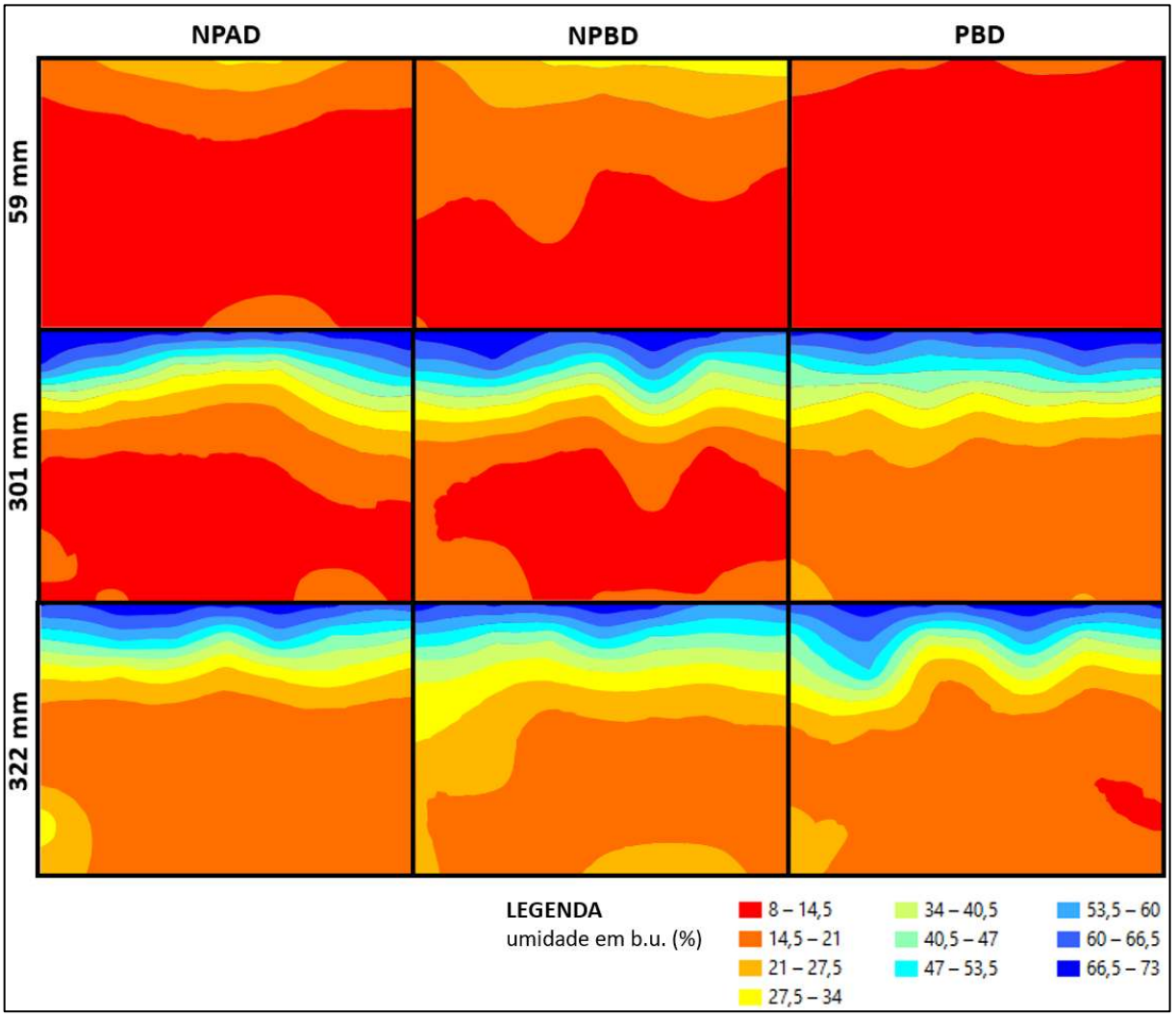
Quando analisadas as pilhas em maior tempo e acúmulo de precipitações, a pilha PBD-301 foi inferior, ou seja, mais úmida, às pilhas NPAD-301 e NPBD-301, sendo mais afetada pela água, comportamento inverso do observado para o primeiro período avaliado (59 mm). A disposição das fibras pode ter contribuído para uma aeração mais eficiente nas pilhas de palhiço não picado (NPAD-301 e NPBD-301). A melhor acomodação das fibras na pilha de palhiço picado (PBD-301) pode ter reduzido as trocas gasosas no interior desta, acarretando maior retenção da água.

As pilhas de palhiço não picado (NPAD-301 e NPBD-301), apesar de também terem absorvido água do solo, mantiveram-se mais secas em seu interior do que a pilha de palhiço picado (PBD-301). A retenção de água pode ser atrativa para usinas que não dispõem de caldeiras preparadas para o palhiço, onde este deve ser queimado com maior umidade e, desta forma, não exceder a pressão limite da caldeira. Essas caldeiras foram projetadas para queimar bagaço de cana-de-açúcar, que tem PCI inferior ao do palhiço. As caldeiras

preparadas para queimar o palhiço operam em 67 bar de pressão, enquanto que as não preparadas, de 21 bar.

Pilhas formadas por fardos de alta densidade (NPAD) foram superiores, mantendo-se mais secas, comparado às de baixa densidade (NPBD) para os três períodos avaliados. A densidade superior do palhiço nos fardos contribuiu na manutenção das pilhas mais secas.

Figura 8 - Mapas geoestatísticos das nove pilhas avaliadas em campo



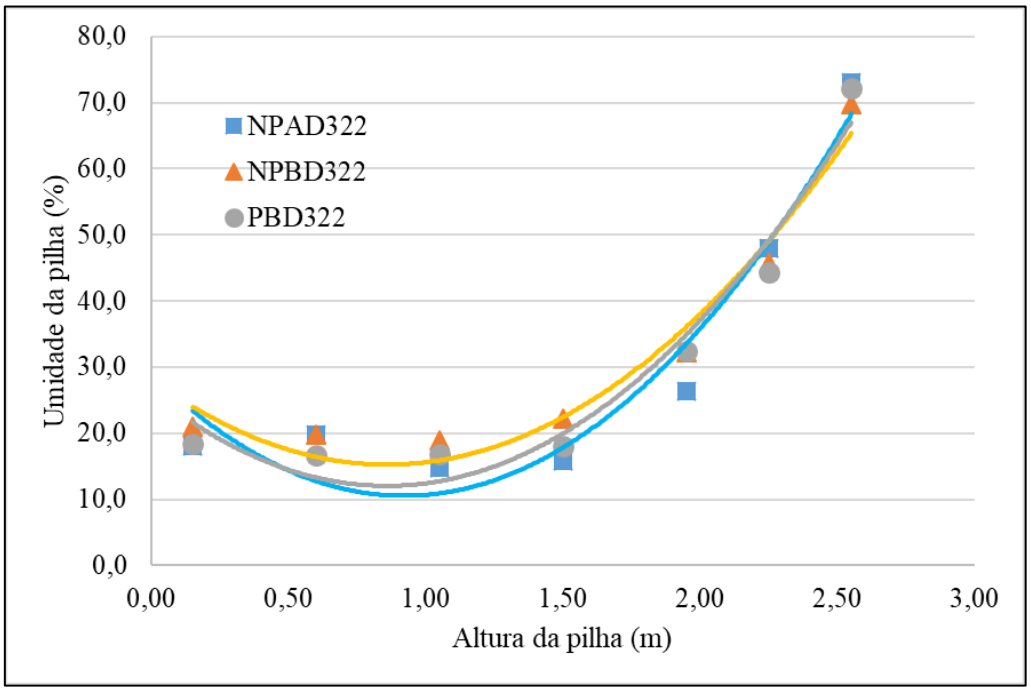
Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Para o período de 322 mm de precipitações acumuladas, somente a análise visual dos mapas não foi suficiente para a interpretação dos resultados. A partir do gráfico da umidade em função da altura das pilhas NPAD-322, NPBD-322 e PBD-322, foi possível identificar que a pilha de densidade maior se manteve mais seca (Figura 9). A umidade do palhiço aumentou

proporcionalmente à altura das pilhas, independentemente dos tratamentos.

Em experimento semelhante a este, Krzyzaniak et al. (2016) observaram que o armazenamento de pilhas de madeira em espaço aberto pode ser uma alternativa mais barata quando comparada aos armazéns cobertos, porém a longo prazo observaram decomposição microbiológica da biomassa, aumento da umidade e diminuição do poder calorífico. Além dos problemas ligados às perdas de biomassa, o armazenamento é crítico pela grande área requerida (Manzone; Balsari, 2016).

Figura 9 - Umidade em função da altura das pilhas no tratamento com 322 mm de precipitações acumuladas no período de 69 dias



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Em condições de armazenamento em espaço aberto e sem cobertura, a biomassa estará sujeita às precipitações que podem ocorrer no período, porém foi observado, no experimento com fardos de palhiço de cana-de-açúcar, que a técnica utilizada no enfardamento reduz a interferência das precipitações na biomassa. Além da manutenção da biomassa mais seca, o aumento da densidade contribuirá em ganhos logísticos pela maior capacidade transportada para um mesmo volume disponível nos caminhões.

Independentemente do local ou técnica adotada no armazenamento da biomassa, existe o problema da área necessária para o armazenamento devido à baixa densidade

(Manzone et al., 2013; Manzone; Balsari, 2016; Jirijs, 2005), portanto, fardos de densidade superior devem ser selecionados nessas condições. Com a utilização de enfardadoras é possível aumentar a densidade da biomassa, reduzindo a área de armazenamento em até 10 vezes (Manzone, 2015).

Para forragem de milho, a trituração, densidade e as condições climáticas influenciaram na umidade final do experimento em Wisconsin, EUA (Shinners et al., 2007), assim como observado para densidade e trituração do palhiço no experimento com pilhas de fardos.

Fatores ambientais como radiação solar, velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa e umidade do solo influenciam o comportamento de secagem das culturas no campo. Estes parâmetros são altamente correlacionados em condições de campo e torna-se difícil analisar o efeito de um parâmetro individual sobre o potencial de secagem da cultura (Borreani; Tabacco, 1998). Neste experimento, todos os tratamentos foram submetidos às mesmas condições de campo, sendo os tratamentos afetados somente pelo comprimento das fibras de palhiço, densidade dos fardos e acúmulo de precipitações.

As observações realizadas com base nos resultados deste experimento são essenciais para a tomada de decisão na escolha das enfardadoras a serem utilizadas na propriedade e na técnica de produção e armazenamento dos fardos de palhiço de cana-de-açúcar. O empresário, no Brasil, é remunerado pelo fornecimento de fardos à usina sucroalcooleira em função de três fatores, sendo eles a impureza mineral, o comprimento da fibra e a umidade. O lucro pode ser maximizado em função destes dois últimos fatores, analisados neste experimento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pilhas de palhiço de cana-de-açúcar apresentaram dependência espacial, sendo possível a utilização de métodos geoestatísticos para análise de umidade. O tamanho do passo utilizado para a confecção de mapas geoestatísticos da distribuição da umidade em pilhas de palhiço deve ser de 0,46 m, sendo o que ajustou mais eficientemente o variograma. O modelo esférico foi o mais adequado para descrever o comportamento da umidade em pilhas de palhiço, sendo o mais sensível à análise dos dados no variograma. A utilização de técnicas

geoestatísticas foram eficientes para mapear e analisar a distribuição da umidade no interior de pilhas de fardos de palhiço. O comprimento do palhiço, no enfardamento, interferiu na distribuição da umidade no interior das pilhas quando armazenados em condições de campo, sem cobertura, e sujeito a precipitações. Para curtos períodos de armazenagem, até 20 dias, pilhas de fardos de palhiço picado são mais recomendadas, enquanto que, para períodos mais longos, acima de 60 dias, pilhas de fardos de palhiço não picado. Pilhas de fardos de alta densidade são mais eficientes para a manutenção da biomassa mais seca, no armazenamento em condições de campo. A umidade do palhiço aumentou proporcionalmente com a altura da pilha.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) e ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB), vinculado ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN), pela estrutura e equipe disponibilizada para a execução do projeto. Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Energia na Agricultura. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida. À Agrícola Três Lagoas (ATL) pela área, fardos, equipe e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

BARTZANAS, T.; BOCHTIS, D. D.; SORENSEN, C. G.; SAPOUNAS, A. A.; GREEN, O. A numerical modelling approach for biomass field drying. **Biosystems Engineering**, v. 106, p. 458-469, 2010.

BORREANI, G.; TABACCO, E. Effects of crop properties, weather conditions and mechanical treatments on the wilting rate of diploid and tetraploid Italian rye grass for silage. **Grass Forage Science,** v. 53, p. 179-188, 1998.

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, p. 1501-1511, 1994.

CARFRAE, Jim. The moisture performance of straw bale construction in a temperate maritime climate. 2011. 276 f. Tese (Doutorado) – University of Plymouth, School of Architecture, Design and Environmental, 2011.

JIRIJS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted Salix viminalis. **Biomass and Bioenergy,** v. 28, p. 193-201, 2005.

KANZIAN, C.; HOLZLEITNER, F.; STAMPFER, K.; ASHTON, S. Regional energy wood logistics – optimizing local fuel supply. **Silva Fennica**, v. 43, p. 113-128, 2009.

KHANCHI, A.; JONES, C. L.; SHARMA, B.; HUHNKE, R. L.; WECKLER, P.; MANESS, N. O. An empirical model to predict infield thin layer drying rate of cut switchgrass. **Biomass and Bioenergy,** v. 58, p. 128-135, 2013.

KRZYZANIAK, M.; STOLARSKI, M. J.; NIKSA, D.; TWORKOWSKI, J.; SZCZUKOWSKI, S. Effect of storage methods on willow chips quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 92, p. 61-69, 2016.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BHORGUI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2001. v. 1, 118 p.

LAWRENCE, M.; HEATH, A.; WALKER, P. Determining moisture levels in straw bale construction. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2763-2768, 2009.

LEBLICQ, S.; VAMAERCKE, S.; RAMON, H.; SAEYS, W. Mechanical analysis of the bending behavior of plant stems. **Biosystems Engineering**, v. 129, p. 87-99, 2015.

MANZONE, M. Efficiency of a compactor in wood chips volume reduction. **Biomass and Bioenergy**, v. 80, p. 303-306, 2015.

MANZONE, M. Storage of woodchips in pressed bales. **Fuel Processing Technology**, v. 157, p. 59-64, 2017.

MANZONE, M.; BALSARI, P. Poplar woodchip storage in small and medium piles with different forms, densities and volumes. **Biomass and Bioenergy**, v. 87, p. 162–168, 2016.

MANZONE, M.; BALSARI, P.; SPINELLI, R. Small-scale storage techniques for fuel chips from short rotation forestry. **Fuel**, v. 109, p. 687-692, 2013.

MEDEIROS, A. M. L. **Artigos sobre conceitos em geoprocessamento**. E-book, 2012. Disponível em: <http://197.249.65.74:8080/biblioteca/bitstream/123456789/563/1/E-book-Artigos-sobre-Conceitos-em-Geoprocessamento-Anderson-Medeiros.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2017.

OLIVARES, E. G.; CORTEZ, L. A. B.; ROCA, G. A. A.; BROSSARD, L. E. **Resumos do 7º Congresso Internacional Sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – Semiárido, Energia e Desenvolvimento Sustentável – Agrener**, Anais, Brasil, 2008.

PAZ, A.; TABOADA, M. T.; GÓMEZ, M. J. Spatial variability in topsoil micronutrients contents in one-hectare cropland plot. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, n. 3/4, p. 479-503, 1996.

ROBINSON, Julian. Quantifying and evaluating risk posed to straw bale constructions from moisture. 2014. 335 f. Tese (Doutorado) – Nottingham Trent University, School of Architecture, Design and the Build Environment, 2014.

ROBINSON, J.; AOUN, H. K.; DAVISON, M. Determining moisture levels in straw bale construction. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 1526-1534, 2017.

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

SHINNERS, K. J.; BINVERSIE, B. N.; MUCK, R. E.; WEIMER, P. J. Comparison of wet and dry corn stover harvest and storage. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, p. 211-221, 2007.

SMITH, E. A. A review on field drying of grass. **Drying Technology**, v. 8, p. 465-498, 1990.

STRAUBE, J. **BSD-112: Building Science for straw-bale buildings**. **Building Science Digest**, 2009. Disponível em: <http://www.buildingscience.com/documents/digests/bsd-112-building-science-for-strawbale-buildings>. Acesso em: 28 mar. 2018.

STRAUBE, J.; SCHUMACHER, C. Monitoring the hygrothermal performance of straw bale walls. **Balanced Solutions**, 2003. Disponível em: <http://www.ecobuildnetwork.org./imagens/Straw_Bale_Test_Downloads/monitoring_the_hygrothermal_performance_of_strawbale_walls_straube_Schumacher_2003.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2018.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G.; SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 668-674, 1987.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 215 p.

ZIMBACK, Célia Regina Lopes. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.