

MARCELO SCANTAMBURLO DENADAI

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA UMIDADE EM FARDOS DE PALHIÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR E ECONOMICIDADE DE PROCESSOS DE RECOLHIMENTO**

**Botucatu
2018**

MARCELO SCANTAMBURLO DENADAI

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA UMIDADE EM FARDOS DE PALHIÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR E ECONOMICIDADE DE PROCESSOS DE RECOLHIMENTO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Saulo Philipe
Sebastião Guerra

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

D391c Denadai, Marcelo Scantamburlo, 1990-
Caracterização e avaliação da umidade em fardos de palhiço de cana-de-açúcar e economicidade de processos de recolhimento / Marcelo Scantamburlo Denadai. - Botucatu: [s.n.], 2018
68 p.: fots. color., ils. color., grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2018
Orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra
Inclui bibliografia

1. Enfardamento. 2. Triturador frontal. 3. Custos. 4. Rentabilidade. 5. Biomassa agrícola. I. Guerra, Saulo Philipe Sebastião. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA UMIDADE EM FARDOS DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E ECONOMICIDADE DE PROCESSOS DE RECOLHIMENTO

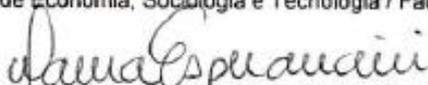
AUTOR: MARCELO SCANTAMBURLO DENADAI

ORIENTADOR: SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA
Dep de Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Profa. Dra. MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI
Dep de Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP



Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP



Prof. Dr. GUSTAVO KIMURA MONTANHA
Depto de Tecnologia em Agronegócio / FATEC



Prof. Dr. JORGE LUIS MANGOLINI NEVES
Divisão Agrícola - Projeto SUCRE / CTBE/CNPEM

Botucatu, 30 de maio de 2018

À minha família, Santo, Jandira e Daniela,
dedico esta tese.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas bênçãos e proteção concedidas.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP) – Campus de Botucatu e aos seus servidores que, diretamente ou indiretamente, me proporcionaram toda estrutura necessária para a execução do projeto.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra, pela constante orientação e conselhos nestes seis anos de convivência na pós-graduação.

Às professoras doutoras Maura Seiko Tsutsui Esperancini e Célia Regina Lopes Zimback, aos professores doutores Kléber Pereira Lanças, Marcelo de Almeida Silva e Gustavo Kimura Montanha, ao Dr. Jorge Luís Mangolini Neves, e à professora mestra Letícia Diniz Vieira, por todas as contribuições feitas na qualificação e defesa desta tese.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida.

A todos os docentes e servidores do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia pelos conhecimentos, conselhos e risadas nestes anos de convivência diária.

À empresa Agrícola Três Lagoas, em nome do Sr. Marcos Luís Geraldi, que disponibilizou toda a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho.

À toda equipe do Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN) pela amizade, companheirismo e ajuda, fora e dentro do âmbito acadêmico.

Aos meus pais, Santo Denadai Sobrinho e Jandira Scantamburlo Denadai, e irmã, Daniela Scantamburlo Denadai, por sempre estarem ao meu lado me aconselhando em todos os momentos.

Meus mais sinceros agradecimentos a cada um.

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.

(George Bernard Shaw)

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 (bs), biomassa resultante da colheita mecanizada. O aproveitamento deste material é importante economicamente devido à quantidade disponível, diversificação da matriz energética, geração de energia elétrica, e produção de etanol e de papel. Devido à entressafra na produção de cana-de-açúcar, é necessário a estocagem dos fardos produzidos em grandes pilhas por até um ano, sendo a forma mais adequada de armazenamento de fardos de palhiço ainda desconhecida, o que proporcionou incêndios de grandes proporções em algumas usinas. Com o objetivo de proporcionar técnicas mais eficientes no armazenamento de palhiço, foi avaliada, a partir de técnicas geoestatísticas, a distribuição da umidade no interior de pilhas armazenadas em campo, sem cobertura, em duas densidades de enfardamento, três quantidades de água acumuladas de precipitações, e à picagem ou não do palhiço antecedendo o enfardamento. Também, foi analisada a viabilidade econômica entre duas rotas de aproveitamento do palhiço, desde o campo até a indústria, diferindo-se pelo momento em que é realizada a trituração do palhiço. 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. Pilhas de fardos de alta densidade foram mais eficientes na manutenção da biomassa mais seca. O custo de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar via rota “triturador frontal” foi superior à rota de enfardamento convencional. Atualmente, a indústria subsidia o custo adicional que o fornecedor de palhiço tem com a rota “triturador frontal”. A trituração do palhiço na indústria é economicamente mais viável que a trituração no campo a partir da enfardadora com “triturador frontal”.

Palavras-chave: Armazenamento. Custo de produção. Biomassa agrícola. Pilhas de fardos.

ABSTRACT

Sugarcane is planted in 23 Brazilian states totalling more than 10.2 million hectares, and for each hectare there are around 10 tons of straw (db), biomass resulting from mechanized harvesting. The use of this material is economically important due to the quantity available, energy matrix diversification, electric power generation, and ethanol and paper production. Due to the off-season in the production of sugarcane, it is necessary to store the bales produced in large piles for up to one year, being the most adequate form of storage of bales still unknown, which caused fires of great proportions in some plants. In order to provide more efficient techniques for the storage of straw, we evaluated the distribution of moisture inside piles stored in the field, without cover, in two baling densities, three accumulated amounts of precipitation, and to the crushing or not of the straw before the baling. Also, the economic viability between two routes of exploitation of the straw was analyzed, from the field to the industry, differing by the moment in which the straw is crushed. 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 crushing of straw affected the distribution of moisture, as well as the density and amount of precipitation accumulated. For short storage periods, bales of crushed straw remained drier, while for longer periods, bales of uncrushed straw remained drier. High density bales were more efficient in maintaining the driest biomass. The cost of collecting sugarcane straw via the "pre-chopper" route was higher than the conventional bale route. Currently, the industry subsidizes the additional cost that the straw supplier has with the "pre-chopper" route. Crushing of straw in the industry is economically more feasible than crushing in the field from the "pre-chopper" baler.

Keywords: Storage. Production cost. Agricultural biomass. Pile of bales.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DA UMIDADE EM PILHAS DE FARDOS DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO CAMPO COM A UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS	25
1.1 INTRODUÇÃO	26
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	28
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
CONCLUSÕES.....	39
REFERÊNCIAS	40
CAPÍTULO 2 - ECONOMICIDADE DE PROCESSOS DE RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FARDOS: CAMPO À INDÚSTRIA	43
2.1 INTRODUÇÃO	44
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS	65

INTRODUÇÃO GERAL

O desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de fontes alternativas de energia aumenta a cada dia, sendo que o Brasil possui potencial para ser um dos maiores produtores de bioenergia no mundo, fato justificado pelo clima favorável, disponibilidade de mão de obra, e extensas áreas com biomassa ainda não aproveitadas.

No país, a cana-de-açúcar é cultivada em mais de 8,8 milhões de hectares. A biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar, denominada palhiço, que inclui ponteiros, folhas verdes, palha seca, toletes, raízes e impurezas minerais, representa mais de 15%, em massa, da produção do canavial, podendo ser obtidas mais de 30 toneladas (base úmida) por hectare dependendo da variedade e região.

O recolhimento do palhiço é encontrado em muitas propriedades produtoras de cana-de-açúcar, e as pesquisas em andamento têm sido aliadas no aprimoramento de máquinas para as condições brasileiras, visto que as enfardadoras utilizadas foram projetadas inicialmente para fenação.

O enfardamento tem sido a rota mais utilizada para o recolhimento do palhiço nos canaviais, que é compactado em grandes fardos variando de 300 a 500 kg de matéria seca. Após essa operação, os fardos produzidos ficam dispersos na área, sendo necessário o recolhimento destes, do talhão para os carregadores, para assim serem carregados em carretas específicas para o transporte de fardos.

Nas operações de campo, muitas variáveis influenciam o cumprimento do cronograma, e faz com que os fardos permaneçam no campo, sem proteção contra chuva. No caso de chuvas após o palhiço compactado no fardo, as impurezas minerais não são afetadas, porém a massa e qualidade dos fardos podem comprometer sua utilização.

No campo ou na indústria, para a segurança no abastecimento da indústria e em função da sazonalidade da produção da cana-de-açúcar, é necessário realizar o armazenamento destes fardos em grandes pilhas. Em sua grande maioria, esse armazenamento é feito sem a utilização de cobertura, devido à extensa área a ser trabalhada, além de grande preocupação com o fogo, combustão instantânea, devido à fermentação e oxigênio no interior de pilhas de fardos.

O comportamento da umidade no interior das pilhas de fardos é uma questão que vem sendo abordada por pesquisadores e empresários do setor. Na bibliografia,

muito pouco é abordado sobre o assunto, e no campo, o que se encontra são experimentos privados e com metodologia própria. O aumento da umidade no interior dos fardos acarreta queda da qualidade e preço dos fardos. O mercado agrícola paga os fornecedores pela qualidade da matéria-prima entregue na usina, além de bonificação por redução de impureza mineral e umidade.

Outro importante assunto está relacionado à rota de recolhimento do palhiço enfardado. Dentre as rotas mais utilizadas, duas são definidas comercialmente em função da trituração do palhiço: no campo, simultaneamente à operação de enfardamento, ou na indústria, por meio da trituração do fardo com triturador estacionário, sendo importante determinar a rota mais econômica.

Devido à relevância para o setor sucroalcooleiro e à complexidade da cadeia de produção, este trabalho teve como objetivo avaliar a umidade no interior de pilhas de fardos, em diferentes tratamentos, e analisar a viabilidade do recolhimento em duas rotas de enfardamento, gerando informação para a tomada de decisão de fornecedores de palhiço em fardos e empresários.

REVISÃO DE LITERATURA

A temperatura adequada e a grande quantidade de energia solar e água forneceram o ambiente ideal para que a cana-de-açúcar se aclimatasse no Brasil (CORDEIRO, 2008), sendo cultivada desde o século XVI, e com grande importância no cenário nacional e internacional (LEITE et al., 2008).

A cana-de-açúcar pertence à ordem *Graminales*, família *Poaceae*, gênero *Saccharum* e, comercialmente, utilizam-se híbridos deste gênero. Morfologicamente, as raízes são fasciculadas, contendo 85% do sistema radicular nos primeiros 50 cm de profundidade. Os rizomas são constituídos por nós, internós e gemas, e o colmo é caracterizado por nós e entrenós facilmente identificados (URIBE, 2010).

As folhas são compostas pela bainha e pela lâmina foliar e são conectadas ao colmo na base dos nós, de modo alternado, em duas linhas opostas no colmo (JAMES, 2003). De forma geral, a planta é constituída por sistema radicular, colmos, onde a sacarose é predominantemente estocada, e folhas dispostas ao redor dos colmos (MANTELATTO, 2005).

Fisiologicamente é uma planta C4, apresentando alta taxa de fotossíntese, eficiência na utilização e sequestro de CO₂, elevada adaptação às condições de altas temperaturas, luminosidade e relativa escassez de água, possuindo alta capacidade de absorver água pelas folhas, porém a principal via é pelo sistema radicular (URIBE, 2010).

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene que perfilha de maneira abundante na fase inicial do desenvolvimento. O crescimento em altura prevalece até a ocorrência de limitação no suprimento de água, ocorrência de baixas temperaturas, ou florescimento, sendo este processo indesejável em culturas comerciais (RODRIGUES, 1995). O processo de maturação da cultura da cana-de-açúcar exige temperaturas baixas e déficit hídrico, para que haja repouso fisiológico e maior acúmulo de sacarose nos colmos (ANDRADE, 2006).

A área brasileira plantada com cana-de-açúcar na safra 2017/18 foi estimada em 10,2 milhões de hectares, distribuída em 23 estados. O estado de São Paulo é o maior produtor com 5,3 milhões de hectares, seguido por Goiás com 1,1 milhões de hectares, Minas Gerais com 1 milhão de hectares, Mato Grosso do Sul com 0,8 milhão de hectares, Paraná com 0,7 milhão de hectares), Alagoas com 0,3 milhão de

hectares) e Pernambuco com 0,2 milhão de hectares. Nos demais estados produtores, as áreas são menores, com participações abaixo de 3 % (CONAB, 2018).

O aumento na produção da cultura e dos produtos provenientes de seu processamento é decorrente do incremento da área cultivada, da introdução de novas variedades, do manejo adequado do solo, aplicação racional de adubos e corretivos, e utilização de reguladores vegetais (DINARDO-MIRANDA, 2008).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil é consolidada pela grande utilização de seus produtos, pois o país possui uma das maiores frotas de carros bicombustíveis, levando a uma maior utilização de combustíveis renováveis como o etanol (SILVA, 2012). O Brasil foi pioneiro no desenvolvimento, em nível comercial, de uma alternativa energética para os combustíveis fósseis, pois o ciclo da cana etanol é considerado limpo (ESTON, 1990).

Acompanhando a tendência mundial de valorização de fontes renováveis, tais como a eólica e a biomassa, o Brasil passou a contemplar, a partir de 2000, o uso de fontes renováveis de energia. Foi definida a forma de comercialização da energia elétrica brasileira por meio de leilões, com garantias para a amortização do capital investido no sistema de cogeração, abrindo espaço e oportunidade para a biomassa, como resíduos da cana-de-açúcar e resíduos do processamento de cereais e de serragem de madeira (KOBBLITZ, 2004).

A biomassa é o resultado obtido da atividade fisiológica das plantas, que podem se comportar como verdadeiras usinas, possibilitando assim, a transformação da energia solar, por meio do processo fotossintético (VASCONCELOS et al., 2007). Quando a biomassa é processada de forma eficiente, química ou biologicamente, extrai-se a energia armazenada nas ligações químicas e a subsequente energia produzida combinada com o oxigênio. O carbono é então oxidado para produzir dióxido de carbono (CO_2) e água. Esse processo é cíclico e o CO_2 é então disponibilizado novamente para produzir nova biomassa (MCKENDRY, 2002).

A biomassa, desde que explorada com base em boas práticas agrícolas e ambientais, não é considerada responsável pelo aumento de CO_2 na atmosfera, pois todo o CO_2 que é liberado nos processos de transformação corresponde ao que foi absorvido pela planta durante a fotossíntese (MOURA, 2005).

A utilização de biomassa na geração de energia é de relevância para o país, especialmente quando direcionado a usos como a geração de eletricidade, produção de vapor e combustíveis para transporte. O mais importante nesta utilização,

independente da tecnologia utilizada, está relacionado ao custo da matéria-prima (JANNUZZI, 2003).

A viabilidade econômica da utilização de biomassa é subsidiada por pesquisas de coleta, carregamento, transporte, e principalmente do custo para utilizar este material, transformando-o em um produto de maior valor comercial (BRAUNBECK et al., 2005).

A biomassa oriunda do corte mecanizado da cana-de-açúcar permite maior cogeração de energia elétrica nas unidades industriais. Isso traz benefícios para o desenvolvimento sustentável do setor sucroalcooleiro brasileiro e de sua matriz energética, com novas fontes de energia renováveis e limpas (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

A biomassa de cana-de-açúcar apresenta papel relevante no que se diz respeito à segurança energética da matriz brasileira e à produção de etanol celulósico. A amplitude dos níveis de tecnologia para cogeração, o domínio do manejo adequado e otimizado da biomassa, a escassez de investimentos e o cenário de recessão econômica são os principais gargalos no curto prazo para que o potencial de geração e máxima utilização dessa matéria-prima seja efetivo (TROMBETA, 2015).

O termo tecnicamente mais adequado para a biomassa residual da cana-de-açúcar é palhiço, ao invés de palha, pois não se constitui apenas de folhas de cana-de-açúcar, mas também de ponteiros, colmos, raízes, e impurezas minerais (RIPOLI; RIPOLI, 2004). É encontrado nos canaviais na ordem de 9 a 32 t ha⁻¹ (RIPOLI, 2001), sendo esta variabilidade decorrente da variedade plantada, idade da planta e condições edafoclimáticas (SARTORI, 2001). Cerca de 10 tMS ha⁻¹ geralmente está disponível para recolhimento (OKUNO, 2017).

Estudos foram desenvolvidos para definir o melhor sistema de recolhimento deste material para ser utilizado na cogeração de energia, destacando-se os sistemas de recolhimento do palhiço a granel utilizando colhedoras de forragem, recolhimento com enfardamento feito por enfardadoras cilíndricas ou prismáticas, sistema de enfardamento por prensas algodojeiras, e colheita integral com as colhedoras de cana-de-açúcar operando com os sistemas de corte dos ponteiros e limpeza desligados (RIPOLI, 2001).

O palhiço tem baixa massa específica e, para diminuir os custos com transporte, pode ser adensado. As tecnologias disponíveis comercialmente para esse adensamento são as enfardadoras de forragem cilíndricas e prismáticas (MAGALHÃES; BRAUNBECK, 2001). O aproveitamento do palhiço é dificultado pelo

alto custo de recolhimento, porém esse custo é reduzido a medida em que a densidade da carga é aumentada (MICHELAZZO, 2005).

As enfardadoras são equipamentos utilizados para recolher e compactar capim, palha, feno ou restos culturais gerados pela prévia utilização de colhedoras mecanizadas. Os dois formatos de fardos podem ser amarrados por cordas de sisal, ráfia, telas sintéticas ou ainda, arames ou barbantes. Os fardos podem variar desde poucos quilogramas, propícios para o carregamento manual, até fardos com mais de 700 kg de massa (GUERRA et al., 2013).

O aleiramento melhora a capacidade de enfardamento, reduz os danos ao mecanismo recolhedor, que pode trabalhar afastado do solo, reduzindo a quantidade de solo no recolhimento, além de evitar a propagação de fogo acidental. Comparando os formatos de fardos, o sistema das enfardadoras de fardos prismáticos é o mais recomendado, pois apresenta maior capacidade operacional e melhor ocupação do espaço da carroceria do caminhão no transporte (COOPERSUCAR, 2001). Estes fardos são colocados em caminhões por meio de garras carregadoras e transportados para usina, onde são descarregados com carregadora existente no pátio da indústria (INOCENTE, 2011).

Para a realização de estudos sobre sistemas de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar, é necessária a caracterização física do palhiço. Deve-se quantificar o palhiço recolhido, bem como determinar a quantidade impurezas minerais agregadas ao material recolhido, e o custo total do sistema de recolhimento (FRANCO, 2003).

A norma D497.7 da *American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE* (2011) informa que a eficiência média de campo para enfardadoras de fardos grandes é de 65 %, variando em uma faixa de 55 a 75 %, e a velocidade de campo dessas máquinas varia de 4,0 a 8,0 km h⁻¹, sendo a velocidade média de 6,0 km h⁻¹.

O enfardamento de biomassa de qualidade é um desafio devido às chuvas frequentes durante o período de secagem no campo. Pesquisas têm proposto métodos aperfeiçoados de secagem artificial da biomassa enfardada para reduzir o risco climático (INVENTAGRI, 2005; DESCOTEAUX; SAVOIE, 2006). Para controlar e melhorar o processo de secagem artificial, uma medida precisa e rápida da umidade é essencial. Normalmente, para o mercado de feno comercial, a umidade média deve ser inferior a 12 %, e nenhuma parte do fardo deve conter mais de 15 % para evitar o desenvolvimento de mofo (COUTURE et al., 2002).

Variações climáticas resultam em mudanças da umidade do palhiço no enfardamento. Por esta razão, pesquisadores e empresas comerciais têm proposto a secagem artificial com ar aquecido para controlar a umidade final do feno enfardado (PARKER et al., 1992; ARINZE et al., 1994; INVENTAGRI, 2005). A secagem começa na parte mais baixa ou na primeira camada de feno em contato com o ar aquecido. A frente de secagem move-se então ao longo do tempo para as camadas mais afastadas da área de contato inicial (DESCÔTEAUX et al., 2003). Para o palhiço, a secagem artificial poderia ser inviável pelo custo de secagem.

O feno normalmente é embalado no campo em teores muito mais elevados do que 10 a 12 %. Por esta razão, muitas vezes são embalados com baixas densidades, tipicamente na ordem de 100 a 140 kgMS m⁻³, para facilitar a entrada do ar ambiente para secagem (HOUSE; STONE, 1988).

Para o palhiço, pouco se sabe sobre o comportamento da umidade nos fardos. Para o feno, variando os níveis de umidade entre 10 e 25 %, ao longo de 8 semanas, não observou-se desenvolvimento de mofo abaixo de 14 % de umidade, porém, ao nível de 25 % de umidade, a colonização de mofo variou de 70 a 80 % (COUTURE et al., 2002).

Na geoestatística, estuda-se a correlação entre os dados espaciais e sua localização e diferenciação temporal, enquanto que na estatística clássica adota-se a aleatoriedade das variações dos fenômenos (GONÇALVES, 2015). 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).

A utilização do geoprocessamento para estudos de impacto e planejamento ambiental tem-se tornado cada vez mais usual. 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).

Os fenômenos naturais se apresentam de maneira frequente e com certa estruturação nas variações entre vizinhos, expressando que as variações não são aleatórias, e dessa forma, apresentam algum grau de dependência espacial (GUIMARÃES, 2004). Havendo dependência espacial da característica avaliada, a

utilização da geoestatística permite estimativas sem tendências e menores custos (DINIZ, 2007).

Devido às características de correlação espacial das variáveis, tem sido vasta a aplicação da geoestatística, principalmente para efetuar estimativas ou simulações de variáveis em locais não amostrados (LANDIM, 2002). Um dos métodos eficazes é a krigagem, que se fundamenta na interpolação de dados das unidades amostrais para variáveis que possuem dependência espacial. Através da krigagem, por exemplo, é possível obter mapas de classes de produtividade (KANEKAE JUNIOR, 2004).

Quando os dados são abundantes, a maioria dos métodos de interpolação produz valores semelhantes (BURROUGH, 1998). O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (CAMARGO, 1998).

O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência (CAMARGO, 1998).

Dentre outras vantagens de se usar a geoestatística, pode-se citar que, para uma mesma intensidade amostral, é possível obter estimadores mais precisos dos parâmetros da população do que na amostragem convencional, além da eliminação de fontes de variação que podem alterar os resultados. Outra vantagem é a possibilidade da redução do custo de amostragem através da redução do número de amostras para um mesmo erro associado (DINIZ, 2007).

CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DA UMIDADE EM PILHAS DE FARDOS DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO CAMPO COM A UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS

Marcelo Scantamburlo Denadai¹, Saulo Philipe Sebastião Guerra¹

¹Faculdade de Ciências Agronômicas / Universidade Estadual Paulista
Av. Universitária, 3780 Botucatu – SP

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 (bs), 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. No objetivo de proporcionar técnicas mais eficientes no armazenamento de palhiço, foi avaliada, a partir de técnicas geoestatísticas, a distribuição da umidade no interior de pilhas de palhiço de cana-de-açúcar armazenadas em campo, sem cobertura, em duas densidades de enfardamento, três quantidades de água acumuladas de precipitações, e a picagem ou não do palhiço antecedendo o 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. Pilhas de fardos de alta densidade foram mais eficientes na manutenção da biomassa mais seca.

Palavras-chave: Armazenamento. Densidade. Biomassa. Dependência espacial.

EVALUATION OF MOISTURE IN SUGARCANE STRAW BALES PILES WITH THE USE OF GEOSTATISTICAL TECHNIQUES

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. Density. Biomass. Spatial dependence.

1.1 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 microbológica, aumento da umidade e diminuição 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).

Devido à complexidade da interação palha e água, e ao nível insuficiente de informação no armazenamento de palhicho 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 palhicho 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 palhicho de cana-de-açúcar armazenados em campo, sem cobertura, em diferentes densidades, quantidades de água acumuladas de precipitações, e a picagem ou não do palhicho antes do enfardamento.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

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 palhicho 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



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



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

Na fazenda havia infraestrutura adequada de máquinas, área disponível e mão de obra para o desenvolvimento do experimento, sendo as pilhas de fardos organizadas nas proximidades da 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 “tritadorador frontal”.

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



Foto: Marcelo Scantamburlo Denadai - 2015

As pilhas de fardos consistiram em três tratamentos quanto à densidade dos fardos e à 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” (tritadorador 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 de cada pilha houve a necessidade de desmontar a pilha de fardos, afastando os fardos entre si, possibilitando 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
	Palhiço picado (P)	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	

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



As densidades, razão entre massa e 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 de fardos, para 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



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 Agrônomicas (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



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).

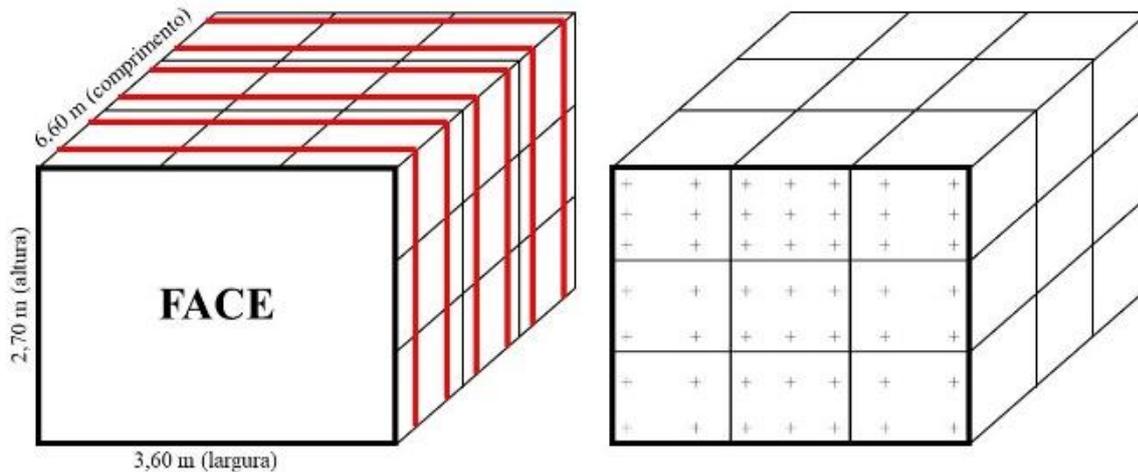
Para cada tratamento foi gerado um mapa da distribuição da umidade no interior da pilha, composto pelos pontos médios de umidade das seis faces de cada pilha. Primeiramente, verificou-se a existência de dependência espacial, expresso pelo Índice de Dependência Espacial (IDE), que foi estimado pela fórmula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

$$IDE (\%) = \frac{C}{C+Co} \times 100 \quad (1)$$

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)



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.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

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.

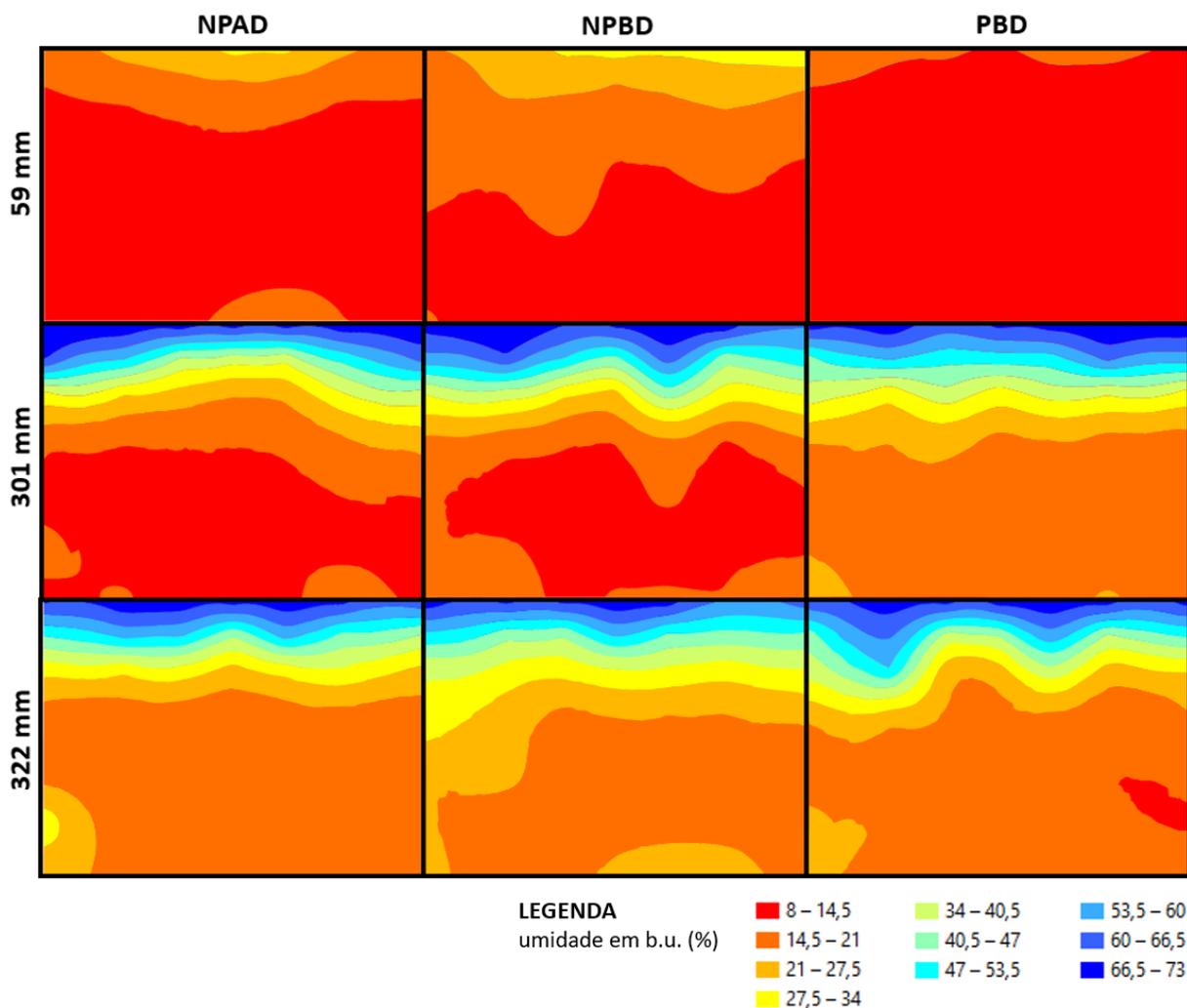
O fato da pilha PBD ser composta de fibras de menor comprimento, devido à picagem antecedendo o enfardamento, pode ocasionar em melhor acomodação do palhiço nos fardos, permitindo que a água penetre com maior dificuldade do que na pilha composta de fibras de maior comprimento (NPAD e NPBD). Fibras mais 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.

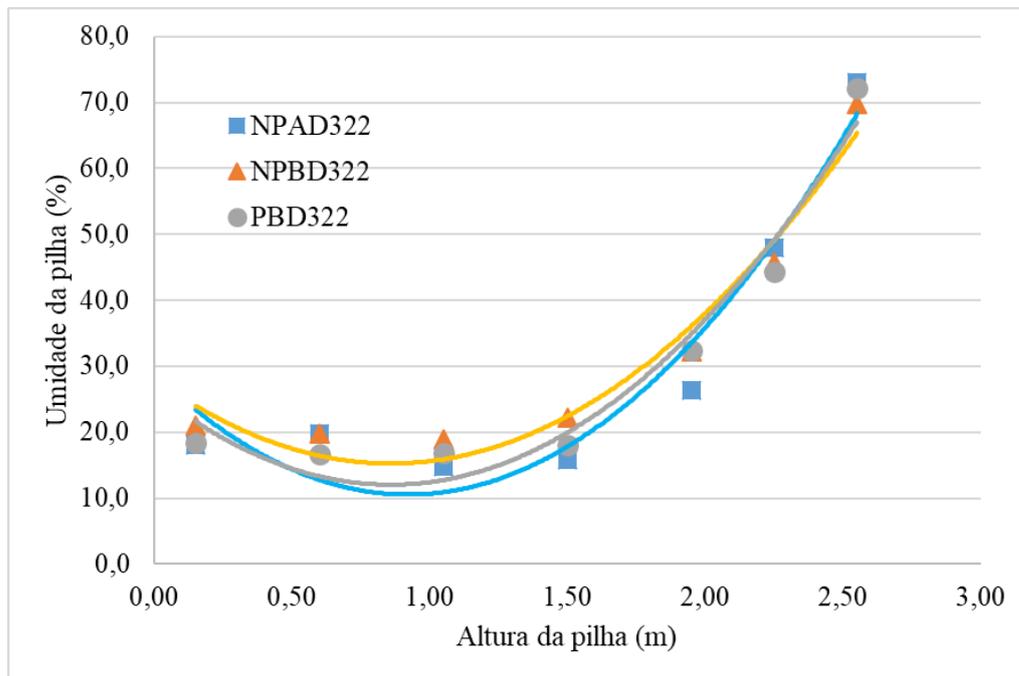
Figura 8 – Mapas geostatísticos das nove pilhas avaliadas em campo



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 palhicho 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



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.

CONCLUSÕES

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 Agrônômicas (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, J. **The moisture performance of straw bale construction in a temperate maritime climate**. 2011. 276 f. PhD thesis, 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: **Artigos sobre conceitos em geoprocessamento**, 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, J.A. **Quantifying and evaluating risk posed to straw bale constructions from moisture**. 2014. 335 f. Ph.D. thesis, Nottingham Trent University, School of Architecture, Design and the Build Environment, 2014.

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

SALVIANO, A.A.C. **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 wetland 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, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CAPÍTULO 2 – ECONOMICIDADE DE PROCESSOS DE RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FARDOS: DO CAMPO À INDÚSTRIA

Marcelo Scantamburlo Denadai¹, Saulo Philipe Sebastião Guerra¹

¹Faculdade de Ciências Agrônômicas / Universidade Estadual Paulista
Av. Universitária, 3780 Botucatu – SP

RESUMO: O aproveitamento do palhiço, biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar, é interessante devido à quantidade disponível, diversificação da matriz energética e à geração de energia elétrica excedente nas usinas sucroalcooleiras, mas, para que seja viável, é necessário analisar a rota tecnológica de menor custo. Este trabalho teve como objetivo determinar a viabilidade econômica entre duas rotas de enfardamento, diferindo-se pelo momento em que é realizada a trituração do palhiço: no campo, a partir de enfardadora com “triturador frontal”, ou na indústria, por meio de picador estacionário. A partir de ensaios dos equipamentos com base na norma D497.7 da ASABE (2011) e informações obtidas com o fornecedor de palhiço, indústria e fabricante de máquinas, foram estimados os custos das operações mecanizadas de campo e industriais com algumas adaptações da norma EP496.3 da ASABE (2006). Com os resultados obtidos, conclui-se que o custo de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar via rota “triturador frontal” foi superior à rota de enfardamento convencional. Atualmente, a indústria subsidia o custo adicional do fornecedor de palhiço com a rota “triturador frontal” para não haver redução da qualidade do açúcar na usina pelo triturador estacionário. A trituração do palhiço na indústria é economicamente mais viável que a trituração no campo a partir da enfardadora com “triturador frontal”.

Palavras-chave: Enfardamento. “Pre-chopper”. Triturador frontal. Custos. Rentabilidade. Biomassa agrícola.

ECONOMIC VIABILITY BETWEEN ROUTES OF RECOVERY SUGARCANE STRAW IN BALES FROM THE FIELD TO INDUSTRY

ABSTRACT: The use of straw, residual biomass from the sugarcane harvest, is interesting due to the quantity available, diversification of the energy matrix, and generation of surplus electric power in the sugar-alcohol plants, but for this to be viable, it is necessary to analyze the technological route of lower cost. The objective of this study was to analyze the economic viability between two baling routes, differing by the time the straw is chopped, in the field from the “pre-chopper” baler, or in the industry, by means of chopper stationary. From the equipment tests based on ASABE standard D497.7 (2011) and information obtained from the supplier of machinery, industry and

machine manufacturer, the costs of mechanized field and industrial operations were estimated with some adaptations to standard EP496.3 from ASABE (2006). With the results obtained it is concluded that the cost of collecting sugarcane straw via the pre-chopper route was superior to the conventional baling route; Currently, the industry subsidizes the additional cost of the supplier of straw with the "pre-chopper" route. Crushing of the straw in the industry is economically more feasible than grinding in the field from the "pre-chopper".

Keywords: Baling. Pre-chopper. Costs. Profitability. Agricultural biomass.

2.1 INTRODUÇÃO

Há uma quantidade crescente de material lignocelulósico sendo deixado no solo de áreas de cana-de-açúcar e que pode ser parcialmente recuperado e utilizado para fins energéticos nas usinas sucroalcooleiras, melhorando assim o balanço energético. Entretanto, é necessário maior conhecimento sobre a quantificação dos impactos na agricultura, a quantidade disponível após a colheita, as taxas de decomposição e os custos de recolhimento (LEAL et al., 2013). O potencial para produção de energia elétrica é de 1,9 kW ha⁻¹ para o bagaço da cana-de-açúcar, com 50 % de umidade, e 2,25 kW ha⁻¹ para o palhiço, 15 % de umidade (BIZZO, 2007).

O palhiço representa cerca de um terço da energia primária total da cana-de-açúcar e tem características muito semelhantes ao bagaço, mas energeticamente superior, o que o torna um combustível interessante para suplementar a geração de energia, pelas usinas, e também para a produção de biocombustíveis de segunda geração (LEAL et al., 2013). O poder calorífico inferior (PCI) do palhiço equivale a 1,7 vezes o PCI do bagaço de cana-de-açúcar (UNICA, 2009). Uma das vantagens do aproveitamento dessa biomassa residual é de não competir com a produção de alimentos e o uso da terra (KHATIWADA et al., 2016).

A queima do palhiço para geração de energia elétrica é importante não só para o incremento da receita no setor sucroalcooleiro, mas também para a diversificação da matriz energética do Brasil (RODRIGUEZ, 2009). Porém tornar sistemas de aproveitamento da biomassa viáveis é complicado, visto que demandam altos investimentos e custos operacionais, devido à grande necessidade de mão de obra especializada e aquisição de equipamentos, aumentando o custo de recolhimento da matéria-prima (CHAVANNE; FRANGI, 2011).

Existem muitas variáveis que afetam a quantidade de palhiço disponível após a colheita da cana-de-açúcar, como as características do solo, clima, topografia local, práticas agrícolas e variedades de cana-de-açúcar. As usinas podem adotar mais de uma rota de aproveitamento do palhiço, visando a redução custos por meio de melhorias nas tecnologias de recolhimento e a incorporação de tecnologias desenvolvidas para outros setores (LEAL et al., 2013).

O aproveitamento do palhiço em larga escala depende em linhas gerais da rota tecnológica utilizada para converter a energia bruta em energia disponível, da técnica do recolhimento e processamento, e da viabilidade econômica considerando todos os custos, investimentos necessários e receitas provenientes da conversão do palhiço em energia (SOUZA, 2012).

O crescimento do setor deve ser realizado a partir da redefinição e automação de processos internos para aumentar a eficiência, sendo as pesquisas importantes na otimização desses processos. Desse modo, a análise econômica de sistemas de enfardamento de palhiço é relevante no contexto do setor sucroalcooleiro (LENAERTS et al., 2012). A partir do planejamento e dimensionamento da cadeia de produção, a análise da viabilidade permite identificar as possibilidades econômicas decorrentes do investimento e, assim, a tomada de decisão mais eficiente (OLIVEIRA, 2012).

Atualmente, as duas principais rotas tecnológicas utilizadas para o recolhimento e aproveitamento do palhiço baseiam-se no enfardamento da biomassa no campo. As rotas diferem-se pelo momento em que a trituração do palhiço ocorre, sendo realizada no campo ou na indústria e, dessa forma, o fornecedor recebe um valor diferenciado pela forma que entrega o palhiço enfardado na indústria. Devido à complexidade do sistema, envolvendo várias operações e altos investimentos, este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade econômica entre as duas rotas de enfardamento, a partir do levantamento dos custos das operações mecanizadas, de campo e industriais, visando a redução dos custos de aproveitamento do palhiço.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A partir das duas principais rotas utilizadas para o recolhimento e aproveitamento do palhiço de cana-de-açúcar no Brasil, foram estimados os custos das operações mecanizadas com algumas adaptações da norma EP496.6 da ASABE (2006). As rotas avaliadas diferiram-se pelo momento em que foi realizada a trituração

do palhiço, sendo realizado no campo, a partir de enfardadora com “tritador frontal”, ou na indústria, por meio de picador estacionário.

As informações para as estimativas de custos foram coletadas a partir de ensaios do desempenho operacional dos equipamentos utilizados em cada rota de aproveitamento, e do levantamento de informações com o fornecedor de palhiço e a indústria processadora (Tabela 1).

Tabela 1 – Operações realizadas nas rotas de palhiço de cana-de-açúcar a partir do enfardamento convencional e com “tritador frontal”

	ROTAS DE APROVEITAMENTO	
	Convencional (não picado)	“Tritador frontal” (picado)
OPERAÇÕES DE CAMPO		
1 Aleiramento do palhiço	sim	sim
2.1 Enfardamento convencional	sim	não realizado
2.2 Enfardamento com "tritador frontal"	não realizado	sim
3 Recolhimento e empilhamento dos fardos	sim	sim
TRANSPORTE RODOVIÁRIO		
4 Carregamento do caminhão	sim	sim
5 Transporte com caminhões	sim	sim
OPERAÇÕES INDUSTRIAIS		
6 Alimentação da linha industrial	sim	sim
7 Transporte dos fardos por esteiras	sim	sim
8 Desenfardamento	sim	sim
9 Remoção de impurezas minerais	sim	sim
10 Tritador estacionário*	sim	não necessário

*Os trituradores disponíveis para essa operação geralmente foram desenvolvidos para toras de madeira, e tem dificuldade para triturar o palhiço. Alguns fabricantes são a Lippel, Vermeer, Demuth, Vantec e Bruno.

As operações realizadas desde o aleiramento até a utilização do palhiço pela indústria foram numeradas e ordenadas na sequência em que ocorreram, sendo padronizadas para todas as tabelas deste trabalho.

Os ensaios de campo consistiram na avaliação do desempenho operacional de quatro conjuntos mecanizados, sendo compostos por quatro tratores, um aleirador, duas enfardadoras e uma carreta acumuladora de fardos (Tabela 2). Foram realizados os estudos de tempos e movimentos, sendo os conjuntos ensaiados com base na norma D497.7 da ASABE (2011). Para a medição de combustível, foram utilizados fluxômetros Flowmate Oval M-III, de 10 mL por pulso, conforme metodologia proposta

por Fiorese et al. (2012). A partir dessas informações, foram estimados a capacidade de campo e o consumo de combustível dos conjuntos mecanizados. O valor do consumo de barbante utilizado na amarração dos fardos foi coletado e calculado pela razão entre a massa de barbante utilizada e a massa seca do fardo em toneladas (tMS).

Tabela 2 – Conjuntos mecanizados ensaiados para a avaliação do desempenho operacional em campo

OPERAÇÕES DE CAMPO	TRATOR	IMPLEMENTO
1 Aleiramento do palhão	New Holland TL75	Enleirador Massey Ferguson 5130
2.1 Enfardamento convencional	New Holland T7-245	Enfardadora Challenger 2270
2.2 Enfardamento "tritador frontal"	New Holland T7-245	Enfardadora Krone Big Pack 1290 XC
3 Recolhimento e empilhamento dos fardos	New Holland T7-245	Carreta acumuladora fardos New Holland

Tabela 3 – Valores coletados nos ensaios dos conjuntos mecanizados e obtidos com o fornecedor de palhão de cana-de-açúcar, nas operações de campo

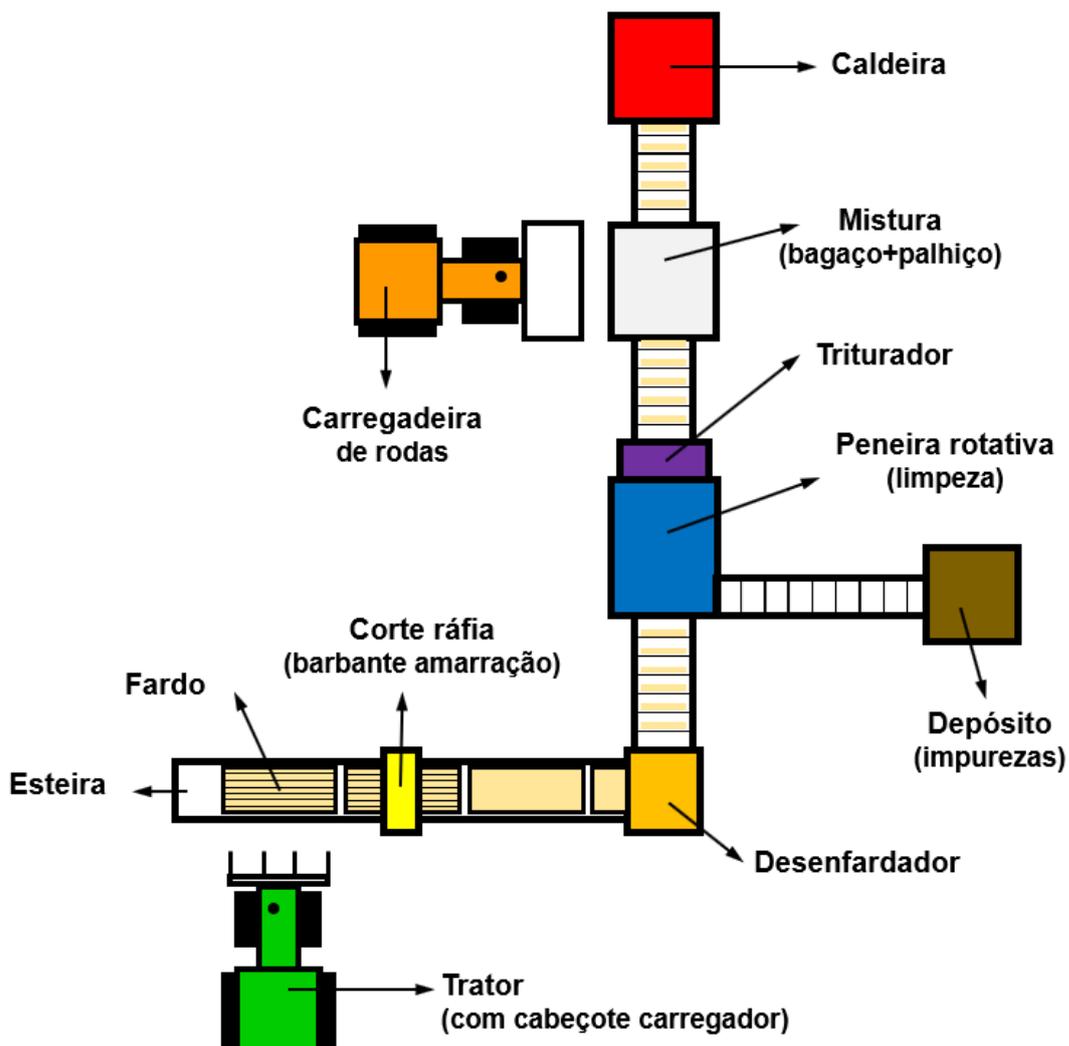
VALORES	OPERAÇÕES EM CAMPO			
	1 Aleiramento do palhão	2.1 Enfardam. convencional	2.2 Enfardam. "tritador frontal"	3 Recolhimento fardos e empilhamento
Valor aquisição trator (R\$)	110.000	265.000	265.000	265.000
Valor residual trator (R\$)	25.000	90.000	90.000	90.000
Valor aquisição implemento (R\$)	130.000	450.000	850.000	310.000
Valor residual implemento (R\$)	20.000	45.000	30.000	30.000
Vida útil trator (h) ASABE	16000	16000	16000	16000
Vida útil implemento (h) ASABE	2500	3000	3000	3000
Taxa de juros (% a.a.) FINAME	9,5 %	9,5 %	9,5 %	9,5 %
Seguro trator (R\$ ano ⁻¹)	825	1.258	1.258	1.258
Seguro implemento (R\$ ano ⁻¹)	975	3.704	6.155	2.325
Palhão enfardado (tMS ha ⁻¹)	5,5	5,5	3,2	4,7
Consumo combustível (L h ⁻¹)	7,5	21,3	35,4	12,7
Preço comb. Diesel (R\$ L ⁻¹)	3,10	3,10	3,10	3,10
Capacidade de campo (ha h ⁻¹)	9,5	5,6	4,6	7,5
Barbante amarração (kg tMS ⁻¹)	-	0,56	1,00	-
Óleos lubrific. impl. (R\$ ano ⁻¹)	60	115	3.800	105
Reparo manut. impl. (R\$ ano ⁻¹)	6.500	22.200	145.200	3.000
Custo operador (R\$ ano ⁻¹)	45.000	55.000	55.000	45.000
Operadores (operador dia ⁻¹)	1	2	2	1
Palhão (tMS ano ⁻¹)	22.240	13.830	8.410	22.240
Preço barbante (R\$ kg ⁻¹)	-	13,80	13,80	-

Fonte: Autor e Agrícola Três Lagoas (2015).

As informações referentes aos valores de aquisição e residual dos equipamentos, taxas de juros, custos com seguro, preço de combustível, preço do barbante de amarração, custos de óleos lubrificantes e filtros, custos de reparos e manutenção, custos de operadores de máquinas e quantidade de palhiço enfardada na safra foram coletadas junto ao fornecedor de palhiço na safra do ano 2015 (Tabela 3). Os custos de depreciação foram estimados com base nos valores de vida útil de máquinas agrícolas, propostos na norma D497.7 da ASABE (2011).

O sistema triturador de palhiço nesta indústria é de baixa rotação, comparado com outros sistemas picadores, o que proporciona menor poeira na indústria (Figura 1), além da utilização de motores de menor potência e conseqüentemente menor consumo de energia elétrica.

Figura 1 – Layout das operações industriais para processamento dos fardos de palhiço de cana-de-açúcar



Para as estimativas dos custos das operações industriais, as informações (Tabela 4) foram obtidas com o fabricante dos equipamentos de limpeza e processamento do palhiço e com usina sucroalcooleira que utiliza palhiço no processo industrial. As operações envolvidas no transporte rodoviário dos fardos (operações 4 e 5) não foram abordadas neste trabalho por não haver diferenças entre as rotas de aproveitamento. Nos ensaios de campo foram medidas as massas dos fardos provenientes do enfardamento convencional e enfardamento com “tritador frontal”, não sendo observada diferença estatística significativa entre os tratamentos.

Tabela 4 – Valores informados pelo fabricante dos equipamentos de limpeza e processamento do palhiço, e pela usina sucroalcooleira na safra do ano 2015

VALORES	OPERAÇÕES INDUSTRIAIS					
	6 Trator (2) alimentação da linha	6** Cabeçote do trator (2) p/carregam.	7 Esteiras transporte fardos	8 Desenfard. fardos	9 Peneira rotativa limpeza	10 Triturador palhiço
Valor de aquisição (R\$)	340.000	70.000	1.500.000	1.750.000	1.750.000	1.800.000
Valor residual (R\$)	70.000	21.000	450.000	525.000	525.000	540.000
Vida útil (anos)	5	5	10	10	10	10
Operadores (11)*	6	-	5	5	5	-
Custo oper. (R\$.op ano ⁻¹)	43.200	-	10.080	10.080	10.080	-
Palhiço proc. (tMS ano ⁻¹)	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000
Rendimento op. (tMS h ⁻¹)	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4
Eficiência (%)	90 %	-	90 %	90 %	90 %	90 %
Seguro (% a.a.)	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %
Reparo manut. (% a.a.)	10 %	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Juros (% a.a.)	9,5 %	9,5 %	9,5 %	9,5 %	9,5 %	9,5 %
Fonte de energia	Diesel	-	eletric.	eletric.	eletric.	eletric.
Consumo	10 L h ⁻¹	-	60 kWh	27 kWh	20 kWh	190 kWh
Preço diesel (R\$ L ⁻¹)	3,10	-	-	-	-	-
Tarifa energia (R\$ kWh ⁻¹)	-	-	0,50	0,50	0,50	0,50

*Os 11 operados referem-se à seis tratoristas e 5 funcionários para a manutenção da linha, contabilizando todos os turnos de trabalho.

**Frontal que é acoplado ao trator para manipulação dos fardos na indústria.

Fonte: Autor e fabricante dos equipamentos (2015).

As estimativas de custos foram realizadas utilizando metodologia adaptada da norma EP496.6 da ASABE (2006) de custos fixos e variáveis. Para custos variáveis foram considerados os custos com combustível e energia elétrica (Equações 1 e 2),

óleos lubrificantes (Equação 3), reparos e manutenção (Equação 4), operador (Equação 5) e barbante de amarração dos fardos (Equação 6). Para os custos fixos foram considerados os custos com depreciação (Equações 7 e 8), juros (Equação 9) e seguro (Equações 10 e 11).

A partir das informações coletadas pelos fluxômetros e o estudo de tempos e movimentos, foram calculados os consumos de combustível e estimados os custos de combustível para as operações de campo (Equação 1):

$$CCc = \left(\frac{Ve - Vr}{T} \right) * Pc * \left(\frac{1}{CCE} \right) * \left(\frac{1}{PRFha} \right) \quad (1)$$

Onde CCc é o custo de combustível nas operações de campo (R\$ tMS⁻¹), Ve é volume de entrada de combustível (L), Vr é o volume de retorno de combustível (L), T é o intervalo de tempo para o volume de combustível medido (h), Pc é o preço do combustível (R\$ L⁻¹), CCE é a capacidade de campo efetiva (ha h⁻¹), $PRFha$ é a massa seca de palhiço recolhido em fardos (tMS ha⁻¹).

Para as estimativas dos custos de energia elétrica nas operações industriais, utilizou-se a Equação 2:

$$CCi = \left[\left(\frac{PPIAn}{CPI} \right) * \left(\frac{1}{Efic} \right) * Pot * Tar \right] * \left(\frac{1}{PPIAn} \right) \quad (2)$$

Onde CCi é o custo de energia elétrica nas operações industriais (R\$ tMS⁻¹), $PPIAn$ é a massa seca de palhiço processado anualmente pela indústria (tMS ano⁻¹), CPI é a capacidade de processamento industrial (tMS h⁻¹), $Efic$ é a eficiência (%), Pot é a potência necessária (kW), Tar é a tarifa da energia elétrica (R\$ kWh⁻¹).

Os custos de óleos lubrificantes e filtros foram estimados em 15 % (ASABE, 2006) sobre os custos de combustível (Equação 3), quando não informados pela propriedade:

$$CO = CCc * 0,15 \quad (3)$$

Onde CO é o custo de óleos lubrificantes e filtros ($R\$ \text{ tMS}^{-1}$), CCc é o custo de combustível ($R\$ \text{ tMS}^{-1}$).

Os custos de reparos e manutenção foram estimados, quando informados pela propriedade, pela razão entre o custo anual com reparos e manutenção ($R\$ \text{ ano}^{-1}$) e a quantidade anual de palhiço recolhido por cada equipamento ($\text{tMS} \text{ ano}^{-1}$). Quando não informados pelo fornecedor, foram estimados pela Equação 4:

$$CRM = \left(\frac{Va * \%VaAc}{Vu} \right) * \left(\frac{1}{CCE} \right) * \left(\frac{1}{PRFha} \right) \quad (4)$$

Onde CRM é o custo de reparos e manutenção ($R\$ \text{ tMS}^{-1}$), Va é valor de aquisição do equipamento ($R\$$), $\%VaAc$ é a relação entre o custo acumulado de reparos e manutenção até o término da vida útil do equipamento, e o valor de aquisição do equipamento, conforme a norma D497.7 da ASABE (2011), CCE é a capacidade de campo efetiva ($\text{ha} \text{ h}^{-1}$), $PRFha$ é a massa seca de palhiço recolhido em fardos ($\text{tMS} \text{ ha}^{-1}$).

Os custos de operadores foram estimados (Equação 5) pela razão entre o custo anual de operadores, somados os encargos trabalhistas, e a quantidade anual de palhiço recolhido por cada equipamento:

$$COp = \left(\frac{COpAn}{PRFAn} \right) \quad (5)$$

Onde COp é o custo de operadores ($R\$ \text{ tMS}^{-1}$), $COpAn$ é o custo anual do operador, somados os encargos trabalhistas ($R\$ \text{ ano}^{-1}$), $PRFAn$ é a massa seca anual de palhiço recolhido em fardos ($\text{tMS} \text{ ano}^{-1}$).

Os custos de barbante de amarração foram estimados pela Equação 6:

$$CBAm = BAtMS * Pb \quad (6)$$

Onde $CBAm$ é o custo de barbante de amarração dos fardos (R\$ tMS⁻¹), $BAtMS$ é a quantidade de barbante utilizado por tonelada de massa seca de palhiço enfardado (kg tMS⁻¹), Pb é o preço de aquisição do barbante (R\$ kg⁻¹).

Os custos de depreciação dos equipamentos foram estimados pela Equação 7, nas operações de campo, e pela Equação 8, nas operações industriais:

$$CDc = \left(\frac{Va - Vres}{Vu} \right) * \left(\frac{1}{CCE} \right) * \left(\frac{1}{PRFha} \right) \quad (7)$$

Onde CDc é o custo de depreciação nas operações de campo (R\$ tMS⁻¹), Va é o valor de aquisição do equipamento (R\$), $Vres$ é o valor residual do equipamento após término da vida útil (R\$), Vu é a vida útil do equipamento (h), CCE é a capacidade de campo efetiva (ha h⁻¹), $PRFha$ é a massa seca de palhiço recolhido em fardos (tMS ha⁻¹).

$$CDi = \left(\frac{Va - Vres}{Vu * PPIAn} \right) \quad (8)$$

Onde CDi é o custo de depreciação nas operações industriais (R\$ tMS⁻¹), Va é o valor de aquisição do equipamento (R\$), $Vres$ é o valor residual do equipamento após término da vida útil (R\$), u é a vida útil do equipamento (anos), $PPIAn$ é a massa seca de palhiço processado anualmente pela indústria (tMS ano⁻¹).

Os custos dos juros foram estimados pela Equação 9:

$$CJ = \left(\frac{Va + Vres}{2} \right) * r * \left(\frac{1}{PRFAn \text{ ou } PPIAn} \right) \quad (9)$$

Onde CJ é o custo dos juros (R\$ tMS⁻¹), Va é o valor de aquisição do equipamento (R\$), $Vres$ é o valor residual do equipamento após término da vida útil (R\$), r é a taxa de juros anual (% a.a.), $PRFAn$ é a massa seca anual de palhiço recolhido em fardos (tMS ano⁻¹), $PPIAn$ é a massa seca de palhiço processado anualmente pela indústria (tMS ano⁻¹).

Os custos de seguro foram estimados pela Equação 10 para as operações de campo, e pela Equação 11 para as operações industriais:

$$CSc = \left(\frac{CSAn}{PRFAn} \right) \quad (10)$$

Onde CSc é o custo de seguro para as operações de campo (R\$ tMS⁻¹), $CSAn$ é o custo anual do seguro (R\$ ano⁻¹), $PRFAn$ é a massa seca anual de palhiço recolhido em fardos (tMS ano⁻¹).

$$CSi = \left(\frac{Va * r}{PPIAn} \right) \quad (11)$$

Onde CSi é o custo do seguro para as operações industriais (R\$ tMS⁻¹), Va é o valor de aquisição do equipamento (R\$), r é a taxa de juros anual (% a.a.), $PPIAn$ é a massa seca de palhiço processado anualmente pela indústria (tMS ano⁻¹).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os custos de enfardamento foram os maiores dentre as operações de campo (Tabela 5) representando 68,5 % dos custos para a rota convencional, e 86,2 % para a rota “triturador frontal”. Observou-se que os custos variáveis, para ambas as rotas, obtiveram maior participação no custo total do enfardamento, sendo que os custos com operadores e barbante de amarração dos fardos representaram aproximadamente mais de 75 % desses custos na rota convencional e 50% na rota “triturador frontal”. No enfardamento de palhiço, Lemos et al. (2014) observaram custos de amarração dos fardos superiores a 50 % do custo operacional total.

A depreciação foi o item de maior relevância nos custos fixos do enfardamento para as duas rotas, explicado pelo alto valor de aquisição das enfardadoras. O custo de depreciação foi superior para o enfardamento com “triturador frontal”, explicado pela enfardadora com maior valor de aquisição e menor capacidade de enfardamento (4,6 ha h⁻¹) que a enfardadora convencional (5,6 ha h⁻¹). Canto et al. (2011) comentam que o custo-benefício do enfardamento e a recuperação da biomassa são claramente afetados pela eficiência das máquinas.

Observou-se que o custo total do enfardamento com “triturador frontal” foi 188 % superior (R\$ 53,03 tMS⁻¹) ao enfardamento convencional. Somado aos custos com aleiramento e recolhimento dos fardos, o custo das operações de campo na rota “triturador frontal” foi 129 % superior à rota convencional.

O maior custo com barbante de amarração no enfardamento “triturador frontal” foi devido à quantidade maior utilizada nessa rota. A enfardadora com triturador frontal exerceu maior pressão de compactação no fardo e conseqüentemente necessitou de barbante com maior diâmetro que a convencional.

Em experimento semelhante, avaliando rotas para recolhimento de *Panicum virgatum* L. e *Arundo donax* L., o enfardamento com trituração em uma única operação eliminou a necessidade de três operações, porém os custos foram semelhantes ao sistema convencional (MARTELLI et al., 2015).

Tabela 5 – Estimativas de custos das operações em campo para recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar

ESTIMATIVAS	OPERAÇÕES DE CAMPO			
	1 Aleiramento do palhiço	2.1 Enfardam. convencional	2.2 Enfardam. “triturador frontal”	3 Recolhimento fardos / empilhamento temporário
CUSTOS VARIÁVEIS (CV)	(R\$ tMS ⁻¹)			
Combustível	0,44	2,14	7,46	1,12
Óleos lubrificantes trator	0,07	0,32	1,12	0,17
Óleos lubrificantes implemento	0,00	0,01	0,45	0,00
Reparo e manutenção trator	0,11	0,43	0,90	0,38
Reparo e manutenção implemento	0,29	1,61	17,27	0,13
Operador	2,02	7,95	13,08	2,02
Barbante amarração (ráfia)	-	7,73	13,80	-
Custo Variável Total (CVT)	2,94	20,19	54,07	3,82
CUSTOS FIXOS (CF)	(R\$ tMS ⁻¹)			
Depreciação trator	0,10	0,36	0,74	0,31
Depreciação implemento	0,84	4,38	18,57	2,65
Juros trator	0,29	1,22	2,01	0,76
Juros implemento	0,32	1,70	4,97	0,73
Seguro trator	0,04	0,09	0,15	0,06
Seguro implemento	0,04	0,27	0,73	0,10
Custo Fixo Total (CFT)	1,63	8,02	27,17	4,60
CUSTO TOTAL (CT)	4,57	28,21	81,24	8,43

Em outro trabalho, no recolhimento de biomassa florestal via enfardamento, o sistema “Biobaler” realizou as operações de corte, trituração e enfardamento com uma só máquina, funcionando eficientemente. Os autores também comentam a necessidade de armazenamento eficiente para esses fardos (GUERRA et al., 2018).

Dependendo da rota de recolhimento e do método de armazenamento, os custos finais da biomassa podem variar substancialmente. Em trabalho realizado com palhiço pelo Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, em 2005, foram observados custos entre US\$ 17,90 e US\$ 39,20 tMS⁻¹ em função da rota utilizada (BRAUNBECK; NETO, 2010). Em outro trabalho realizado pelo CTC e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD, foram estimados custos totais de recolhimento variando entre US\$13,70 tMS⁻¹ e US\$31,12 tMS⁻¹ (RODRIGUES FILHO, 2005).

O custo com o triturador de palhiço na indústria foi o mais representativo nas operações industriais (Tabela 6). Isso deve-se aos custos variáveis, principalmente à energia elétrica que representou 59 % (R\$ 6,44 tMS⁻¹) do custo total dessa operação.

Tabela 6 – Estimativas de custos das operações industriais para limpeza e processamento de palhiço de cana-de-açúcar

ESTIMATIVAS	OPERAÇÕES INDUSTRIAIS					
	6 Trator (2) alimentação da linha	6 Cabeçote do trator (2) p/carregam.	7 Esteiras transporte fardos	8 Desenfard. fardos	9 Peneira rotativa limpeza	10 Triturador palhiço
CUSTOS VARIÁVEIS (CV)	(R\$ tMS ⁻¹)					
Combust./energia elétr.	2,10	-	2,03	0,91	0,68	6,44
Óleos lubrificantes	0,32	-	-	-	-	-
Reparos e manutenção	0,49	0,03	0,64	0,75	0,75	0,77
Operador	3,70	-	0,72	0,72	0,72	-
Custo Variável Total (CVT)	6,60	0,03	3,40	2,38	2,15	7,21
CUSTOS FIXOS (CF)	(R\$ tMS ⁻¹)					
Depreciação	0,77	0,14	1,50	1,75	1,75	1,80
Juros	0,28	0,06	1,32	1,54	1,54	1,59
Seguro	0,05	0,01	0,21	0,25	0,25	0,26
Custo Fixo Total (CFT)	1,10	0,21	3,04	3,54	3,54	3,65
CUSTO TOTAL (CT)	7,70	0,24	6,43	5,93	5,69	10,85

A operação de trituração, apesar de ter sido a mais onerosa na indústria, teria custo inferior quando comparado com picador estacionário de alta rotação, que

demandaria maior potência e, conseqüentemente, consumiria mais energia elétrica, obtendo custo superior ao deste trabalho.

Quando se analisa o custo das rotas de enfardamento, comparando as operações de campo com as industriais, o custo do triturador na indústria foi menor do que o custo do “triturador frontal” no campo (Tabela 7). Para realizar a trituração do palhiço no campo, pela enfardadora com “triturador frontal”, o custo foi R\$ 53,03 tMS⁻¹, superior ao enfardamento convencional, para o fornecedor. O custo da trituração na indústria foi de R\$ 10,85 tMS⁻¹, o que resultaria na economia de R\$ 42,18 tMS⁻¹ na cadeia de produção.

Tabela 7 – Estimativas de custos das duas rotas de enfardamento de palhiço de cana-de-açúcar, convencional e com “triturador frontal”

	ROTAS DE APROVEITAMENTO DO PALHIÇO					
	Convencional (não picado)			“Triturador frontal” (picado)		
	Custos Fixos (CF)	Custos Variáveis (CV)	Custos Totais (CT)	Custos Fixos (CF)	Custos Variáveis (CV)	Custos Totais (CT)
OPERAÇÕES DE CAMPO	(R\$ tMS⁻¹)			(R\$ tMS⁻¹)		
1 Aleiramento do palhiço	1,63	2,94	4,57	1,63	2,94	4,57
2.1 Enfardamento convencional	8,02	20,19	28,21	-	-	-
2.2 Enfardamento “triturador frontal”	-	-	-	27,17	54,07	81,24
3 Recolhim. empilham. fardos	4,60	3,82	8,43	4,60	3,82	8,43
Custo Total Campo	14,25	26,95	41,20	33,41	60,83	94,23
OPERAÇÕES INDUSTRIAIS	(R\$ tMS⁻¹)			(R\$ tMS⁻¹)		
6 Alimentação da linha industrial	1,31	6,63	7,94	1,31	6,63	7,94
7 Transporte fardos por esteiras	3,04	3,40	6,43	3,04	3,40	6,43
8 Desenfardamento	3,54	2,38	5,93	3,54	2,38	5,93
9 Remoção impurezas minerais	3,54	2,15	5,69	3,54	2,15	5,69
10 Triturador	3,65	7,21	10,85	-	-	-
Custo Total Indústria	15,08	21,77	36,85	11,43	14,56	26,00

Outras variáveis importantes na avaliação das rotas foram as perdas no processo de limpeza do palhiço. Na rota convencional, o palhiço passa pela peneira rotativa antes do triturador e, somente ao final desta operação, o palhiço entra no triturador para reduzir o comprimento da biomassa. Quando se trabalha com a rota “triturador frontal”, o palhiço passa pela peneira rotativa com a biomassa já em partículas menores, acarretando perdas no processo. Nesse trabalho, a partir de

experimento realizado na indústria, essas perdas foram 60 % maiores na rota “triturador frontal” que na rota convencional. Para a indústria deste trabalho são processadas 70.000 toneladas de palhiço anualmente. Com a rota “triturador frontal”, seria equivalente a perder 6,9 toneladas de massa seca de palhiço, diariamente.

O preço médio do palhiço, pago ao fornecedor na região de Lençóis Paulista/SP, no mesmo período da coleta dos dados, foi de R\$ 180,00 tMS⁻¹ para fardos oriundos da rota “triturador frontal” e R\$ 120,00 tMS⁻¹ para a rota convencional. Com base nesses preços, a perda de 6,9 tMS dia⁻¹ resultaria no desperdício de R\$ 1.242 dia⁻¹. Transformando esses dados em custo por tonelada, as perdas resultariam em um custo variável adicional de R\$ 6,50 tMS⁻¹ na rota “triturador frontal”, para ser equiparada à rota convencional, que tem menores perdas (Tabela 8).

Tabela 8 – Estimativas de custos das duas rotas de enfardamento de palhiço de cana-de-açúcar, convencional e com “triturador frontal”, consideradas as perdas da operação de remoção de impurezas minerais por peneira rotativa

	ROTAS DE APROVEITAMENTO DO PALHIÇO					
	Convencional (não picado)			"Triturador frontal" (picado)		
	Custos Fixos (CF)	Custos Variáveis (CV)	Custos Totais (CT)	Custos Fixos (CF)	Custos Variáveis (CV)	Custos Totais (CT)
OPERAÇÕES DE CAMPO	(R\$ tMS ⁻¹)			(R\$ tMS ⁻¹)		
1 Aleiramento do palhiço	1,63	2,94	4,57	1,63	2,94	4,57
2.1 Enfardamento convencional	8,02	20,19	28,21	-	-	-
2.2 Enfardamento "triturador frontal"	-	-	-	27,17	54,07	81,24
3 Recolhim. empilham. fardos	4,60	3,82	8,43	4,60	3,82	8,43
Custo Total Campo	14,25	26,95	41,20	33,41	60,83	94,23
OPERAÇÕES INDUSTRIAIS	(R\$ tMS ⁻¹)			(R\$ tMS ⁻¹)		
6 Alimentação da linha industrial	1,31	6,63	7,94	1,31	6,63	7,94
7 Transporte fardos por esteiras	3,04	3,40	6,43	3,04	3,40	6,43
8 Desenfardamento	3,54	2,38	5,93	3,54	2,38	5,93
9 Remoção impurezas minerais	3,54	2,15	5,69	3,54	2,15	5,69
10 Triturador	3,65	7,21	10,85	-	-	-
11 Perdas na peneira rotativa	-	-	-	-	6,50	6,50
Custo Total Indústria	15,08	21,77	36,85	11,43	21,06	32,50
TOTAL	29,33	48,72	78,05	44,84	81,89	126,73

Com a inserção do custo das perdas de palhiço na peneira rotativa, o custo total das operações industriais na rota “triturador frontal” aumentou, reduzindo para R\$ 4,35 tMS⁻¹ a diferença de custo entre as duas rotas. Somado aos custos das operações de campo, a rota convencional resultou em economia de R\$ 48,68 tMS⁻¹ na cadeia de produção.

Para o fornecedor, trabalhar com a rota “triturador frontal” custou R\$ 53,03 tMS⁻¹ a mais, comparado à rota convencional. A indústria paga um adicional médio de R\$ 60,00 tMS⁻¹ para o fornecedor trabalhar com a rota “triturador frontal”, resultando em saldo positivo de R\$ 6,97 tMS⁻¹ para o fornecedor. A indústria paga R\$ 60,00 tMS⁻¹, porém economiza R\$ 4,35 tMS⁻¹ por dispensar a utilização de triturador, o que resulta em um aumento de custo de R\$ 55,65 tMS⁻¹, quando comparada com a rota convencional.

Observa-se que os custos adicionais para o fornecedor e para a indústria na rota “triturador frontal” são semelhantes, sendo R\$ 53,03 tMS⁻¹ e R\$ 55,65 tMS⁻¹ respectivamente. Pode-se concluir que tanto a indústria como o fornecedor arcam com os mesmos custos adicionais, porém a indústria subsidia todo o custo adicional do fornecedor pagando R\$ 60,00 tMS⁻¹ de palhiço.

Na China, uma quantidade substancial de subsídio é concedida para tornar o recolhimento de resíduos agrícolas economicamente viável, especialmente em regiões com baixos rendimentos e altos custos de produção. O custo de recolhimento e o preço pago pela biomassa devem ser estudados e têm importantes implicações na política pública (CHEN, 2016).

Se a indústria optasse pela rota convencional, portanto, obteria redução de R\$ 55,65 tMS⁻¹ no custo de aproveitamento do palhiço, já que atualmente arca com esse custo. Esse subsídio pago aos fornecedores está relacionado à poeira gerada na trituração do palhiço na indústria, o que acarreta em redução na qualidade do açúcar produzido em virtude de compartilharem uma mesma usina. Um possível fator que pode estar relacionado à escolha da rota “triturador frontal” pela indústria seria a instabilidade e segurança do setor energético brasileiro, pelos valores de comercialização da energia elétrica praticados nos leilões.

O incentivo à geração de energia de biomassa de cana-de-açúcar, seja por meio de ampliação do limite de exportação à rede, melhores condições de financiamento à renovação tecnológica ou por preços competitivos possibilitaria uma

participação mais efetiva do setor na geração de energia termelétrica renovável na matriz nacional (TROMBETA, 2015).

Possivelmente, a indústria opta por esse custo adicional por ser um custo variável na cadeia de produção. Se um projeto industrial para aproveitamento do palhiço, após instalado, fosse inviabilizado no decorrer do período planejado, aumentaria significativamente os custos fixos para cada tonelada processada.

Seguindo nessa linha de raciocínio, as indústrias que utilizam o palhiço para a produção de energia elétrica geralmente operam com as mesmas caldeiras projetadas para a queima de bagaço de cana-de-açúcar, resíduo proveniente da moagem da cana-de-açúcar. Essa biomassa tem, em média, 2/3 do poder calorífico do palhiço, e dessa forma, a caldeira não pode ser alimentada somente com palhiço, devendo ser realizada uma mistura com o bagaço. A modernização das caldeiras, para aumentar a eficiência do sistema, refletiria em investimentos entre R\$ 40.000.000 e R\$ 120.000.000 para uma unidade industrial, mas, para isso, seria necessário maior segurança e menor instabilidade do setor energético.

Fatores tecnológicos e de mercado, como preços de energia, eficiência e custos da usina, tipo de eletricidade substituída e instrumentos de política, como apoio à biocombustíveis, são os fatores que mais influenciam a rota tecnológica utilizada (KHATIWADA et al., 2016).

Vários sistemas de recolhimento e armazenamento podem ser economicamente viáveis, visto que sistemas agrícolas bem-sucedidos requerem flexibilidade (VADAS; DIGMAN, 2013). A umidade do palhiço, por exemplo, interfere diretamente na pressão de trabalho da caldeira na indústria.

CONCLUSÕES

O custo de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar via rota “tritador frontal” é 62 % superior à rota de enfardamento convencional. A indústria subsidia o custo adicional do fornecedor de palhiço com a rota “tritador frontal” para reduzir os níveis de poeira e manter a qualidade do açúcar produzido. A trituração do palhiço na indústria é economicamente mais viável que a trituração no campo a partir da enfardadora com “tritador frontal”.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (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.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS.
ASABE EP496.3: Agricultural Machinery Management Data, St. Joseph, MI., 2006.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS.
ASABE D497.7: Agricultural Machinery Management Data, St. Joseph, MI., 2011.
- BIZZO, W.A. **Tecnologias de biomassa para conversão de energia.** In: DIVERSIFICAÇÃO energética: uma estratégia de desenvolvimento para o Rio Grande do Norte. Natal: UFRN, 2007.
- BRAUNBECK, O.A.; NETO, E.A. Logística do transporte de matéria-prima e resíduos da cana-de-açúcar. CORTEZ, L.A.B. (Ed.), **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 992 p.
- CANTO, J.L.; KLEPAC, J.; RUMMER, B.; SAVOIE, P.; SEIXAS, F. Evaluation of two round baling systems for harvesting understory biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 2163-2170, 2011.
- CHAVANNE, X.; FRANGI, J.P. Comparison of the energy efficiency to produce agroethanol between various industries and processes: Synthesis. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2737-2754, 2011.
- CHEN, X. Economic potential of biomass supply from crop residues in China. **Applied Energy**, v. 166, p. 141-149, 2016.
- FIGLIARELLI, D.A.; DALLMEYER, A.U.; ROMANO, L.N.; SCHLOSSER, J.F.; MACHADO, P.R.M. Desempenho de um motor agrícola em bancada dinamométrica com biodiesel de óleo de frango e misturas binárias com com óleo diesel. **Ciência Rural**, v. 42, n. 4, p. 660-666, 2012.
- GUERRA, S.P.S.; OGURI, G.; DENADAI, M.S.; ESPERANCINI, M.S.T.; SPINELLI, R. Preliminary trials of the BioBaler working in Brazilian eucalypt plantations. **Southern Forest**, v. 80, p. 131-135, 2018.

KHATIWADA, D.; LEDUC, S.; SILVEIRA, S.; MCCALLUM, I. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable Energy**, v. 85, p. 371-386, 2016.

LEAL, M.R.L.V.; GALDOS, M.V.; SCARPARE, F.V.; SEABRA, J.E.A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C.O.F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 11-19, 2013.

LEMOS, S.V.; DENADAI, M.S.; GUERRA, S.P.S.; ESPERANCINI, M.S.T.; BUENO, O.C.; TAKITANE, I.C. Economic efficiency of two baling systems for sugarcane straw. **Industrial Crops and Products**, v. 55, p. 97-101, 2014.

LENAERTS, B.; MISSOTTENB, B.; BAERDEMAEKER, J.; SAEYS, W. LiDaR sensing to monitor straw output quality of a combine harvester. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 85, p. 40-44, 2012.

MARTELLI, R.; BENTINI, M.; MONTI, A. Harvest storage and handling of round and square bales of giant reed and switchgrass: An economic and technical evaluation. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 551-558, 2015.

OLIVEIRA, M.P. **Dimensionamento operacional e econômico de um sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar: estudo de caso**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

RODRIGUES FILHO, J.P. Trash recovery cost. In: HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba, SP: PNUD e CTC, 2005, v. 1, p. 74-85.

RODRIGUEZ, M.F.C. **Gerenciamento de coleta dos resíduos da cana-de-açúcar para geração e venda de eletricidade**. 2009. 18 f. Dissertação (Mestrado em planejamento de sistemas energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SOUZA, R. T. G. **Análise da viabilidade técnica-econômica do uso de palhiço, para fins de cogeração de energia, pela rota de colheita integral**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

TROMBETA, N.C. **Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: uma aplicação de modelos de localização ótima para fins energéticos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2015.

UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor sucroenergético: mapa da produção: produção de etanol do Brasil**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 10 out. 2009.

VADAS, P.A.; DIGMAN, M.F. Production costs of potential corn stover harvest and storage systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 54, p. 133-139, 2013.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do trabalho evidenciaram que é possível aumentar a melhorar a armazenagem de fardos de palhiço de cana-de-açúcar, tanto a curto como a médio prazo, a partir da escolha adequada entre densidade do fardo e comprimento do palhiço compactado em fardos. O experimento proporcionou informações que antes não eram conhecidas pela comunidade acadêmica e empresários do setor, mas deve-se continuar a pesquisa com maior número de tratamentos, fardos e tamanho das pilhas, resultando em maior número de dados para o desenvolvimento de um modelo matemático de predição do comportamento da umidade do palhiço na pilha de fardos.

O trabalho solucionou um problema imediato do fornecedor de palhiço, que armazena os fardos por um curto período de tempo até o transporte para a indústria, identificando a forma mais adequada de trabalho, porém a longo prazo é necessária uma maior quantidade de dados visando aumentar o nível de informação para a tomada de decisão. A bibliografia sobre o tema proposto neste trabalho é insuficiente, sendo esta uma pesquisa inovadora e que proporcionou maior compreensão acerca do assunto.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE D497.7**: Agricultural Machinery Management Data, St. Joseph, MI., 2011.
- ANDRADE, L.A. B. Cultura da cana-de-açúcar. In: CARDOSO, M. das G. (Ed.). **Produção de aguardente de cana-de-açúcar**. 2. ed. rev. e ampl. Lavras: UFLA, 2006. p. 25-67.
- ARINZE, E.A.; SOKHANSANJ, S.; SCHOENAU, G.J.; RAUTTMANNSDORFF, F.G. Design, evaluation and optimization of a heated-air batch hay dryer operated with automatic bale wagon. **ASAE Paper 94-6033**. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI., 1994.
- BRAUNBECK, O.; MACEDO, I.; CORTEZ, L.A.B. **Modernizing Cane Production to Enhance the Biomass Base in Brazil**. In: Realizing the Potential (Silveira S, ed.). Elsevier, p. 75-94, 2005.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. Principles of geographical information systems. **Oxford**, Oxford University Press, 1998.
- CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos. Instituto nacional de Pesquisas Espaciais, 1998. 36 p.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Cana-de-açúcar, Safra. 2018/2019. Primeiro levantamento, Maio de 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/Marcelo%20S.%20Denadai/Downloads/BoletimZCanaZ1ZLevantamentoZ18-19.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2018.
- COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA AÇÚCAR ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA. COOPERSUCAR - PROJETO BRA/96/G31. **Conservação do Solo**. Cenbio Notícias, Brasília, v.4, n.12, 2001. Disponível em: <http://www.cenbio.org.br/index1.html>. Acesso em: 05 nov. 2001.
- CORDEIRO, A. Etanol para alimentar carros ou comida para alimentar gente? In: Brasil. **Impactos da indústria canavieira no Brasil**. Plataforma BNDES: IBASE Instituto Brasileiro de Análises Sociais e Econômicas, 2008.
- COUTURE, L.; HUA, B.P.; SAVOIE, P. Seuils d'émergence des moisissures dans le foin em fonction de l'humidité. **Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages**, Victoriaville, p. 30-35, 2002. Conseil québécois des plantes fourragères, Sainte- Foy, Québec. Disponível em: <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Compte-rendu- 2002.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2012.
- DESCÔTEAUX, S.; SAVOIE, P. Bi-directional dryer for mid-size rectangular hay bales. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, p. 481-489, 2006.

DESCÔTEAUX, S.; SAVOIE, P. Artificial drying of big square bale hay. Electronic-only Proceedings of the International Conference on Crop Harvesting and Processing, 9-11 February 2003 (Louisville, Kentucky USA) Publication Date 9 February 2003. **ASAE Publication Number 701P1103e**, ed. Graeme Quick.

DINARDO-MIRANDA, L.L. Pragas. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). Cana-de-açúcar. Campinas: **Instituto Agrônômico**, p. 349-404. 2008.

DINIZ, F. S.; **Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao inventário florestal**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

ESTON, N. E. Etanol o combustível despoluente. Revista. AEA - **Associação Brasileira de Energia Alternativa**, n. 3/4, v. 5, mai./jul. 1990.

FRANCO, F.N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhço de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) a granel**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GONÇALVES, A. P. S.; FERREIRA, J. R.; RODRIGUES, A. M. **Metodologias de Sistemas de Informação Geográfica em sistemas de produção florestal: Uma aplicação geoestatística**. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Gestão do território, área de especialização em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica) – Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.

GUERRA, S.P.S.; DENADAI, M.S.; TAKITANE, I.C. Biomassa: enfardadoras cilíndricas ou prismáticas? **Revista Agriworld**, n. 12, p. 100-102. 2013.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. UFU/ FAMAT. Núcleo de estudos Estatísticos e biométricos. 2004. 48 p. Disponível em: <www.famat.ufu.br/prof/ednaldo/geoest/apgeo1.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2016.

HOUSE, H.K.; STONE, R.P. 1988. **Barn hay drying**. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Fact sheet, p. 88-110. Disponível em: <<http://www.omafr.gov.on.ca/eng/ish/engineer/facts/88-110.htm>>. Acesso em 11. Jul. 2006.

INNOCENTE, A.F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar – estudo de caso**. 2011. 111f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2011.

INVENTAGRI. 2005. **Round & Square Bale Hay Dryer**. Disponível em: <<http://www.inventagri.com/>>. Acesso em 14 fev. 2011.

JAMES, G. Intoduction to sugarcane. In: JAMES, G. Sugarcane. Oxford: Wiley Blackwell, 2003. p. 1-19.

JANNUZZI, G.M. Uma avaliação das atividades recentes de P&D em energia renovável no Brasil e reflexões para o futuro. **Energy Discussion Paper**, n. 2.64-01/03, p. 1-12, 2003.

KANEGAE JUNIOR, H. **Avaliação de sistemas de inventários sucessivos e dois interpoladores espaciais como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus spp.*** 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

KOBLITZ, L.O. Contra fatos não há argumentos. **Jornal de Piracicaba**. Caderno Opinião, 22 jul. 2004.

LANDIM, P. M. B. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2002. (Geotemática, Texto Didático 6).

LEITE, G.H.P. et al. Reguladores vegetais e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em meio de safra. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p.1843-1850, 2008.

MAGALHAES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. **Colheita de cana-de-açúcar verde: energia renovável para uma agricultura sustentável**. 2001. Disponível em: <<http://www1.agrobrasil.com.br/agroartigos/artigo9.html>>. Acesso em: 15 fev 2008.

MANTELATTO, P.E. **Estudo do processo de cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento**. 2005. 272 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 83, p. 37-46, 2002.

MEDEIROS, A.M.L. **Artigos sobre conceitos em geoprocessamento**. E-book: Artigos sobre conceitos em geoprocessamento, 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.

MICHELAZZO, M.B. **Análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento do palhço da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MOURA, C. Uma fonte de energia renovável. **Floresta e Ambiente**, v. 69, n. 34. 2005.

OKUNO, F.M. Recolhimento e qualidade da palha. **Projeto Sucre – Energia renovável da cana-de-açúcar**, Campinas, 2017.

PARKER, B.F.; WHITE, G.M.; LINDLEY, M.R.; GATES, R.S.; COLLINS, M.; LOWRY, S.; BRIDGES, T.C. Forced-air drying of baled alfalfa hay. Transactions of the **ASAE**, n. 35, v. 2, p. 607-615, 1992.

RIPOLI, T.C.C; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar colheita, energia e ambiente**. Barros e Marques Ed. ELET. Piracicaba, Cap. 2. 2004. 302 f.

RIPOLI, T.C.C. Now it is the turn of palhiço. **Idea News**. November, n. 3; Ribeirão Preto - SP, 2001.

RODRIGUES, D.J. **Fisiologia da Cana-de-Açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociências - Universidade Estadual Paulista, 1995. 99 p. Apostila.

SARTORI, M.M.P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. 2001. 134 f. Tese (Doutorado em área de concentração Ciência Exatas e da Terra) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

SILVA, D.P. **Thiametoxam em cana-de-açúcar manejada com maturadores**. 2012. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2012.

TROMBETA, N.C. **Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: uma aplicação de modelos de localização ótima para fins energéticos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2015.

URIBE, R.A.M. **Produtividade e estimativa de acúmulo da biomassa em soqueira de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial com diferentes doses de N-Fertilizantes**. 2010. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual de São Paulo, Faculdade de Ciências Agrárias, Botucatu, 2010.

VASCONCELOS, G.C.; VERÍSSIMO, L.A.C.; SILVEIRA, A.A.; BIANCHINI, S. Energia lignocelulosica da biomassa: uma perspectiva sustentável. Resumos do II Congresso Brasileiro de Agroecologia. **Revista Brasileira Agroecologia**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 1017-1020, 2007.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: OFICINA DE TEXTOS, 2015. 215 p.