

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE PALHIÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR UTILIZADO PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

MARCIUS XAVIER RODRIGUES DA COSTA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia (Energia na
Agricultura)

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE PALHIÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR UTILIZADO PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

MARCIUS XAVIER RODRIGUES DA COSTA

Orientador: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia (Energia na
Agricultura)

BOTUCATU-SP
Fevereiro - 2011

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

C837p Costa, Marcius Xavier Rodrigues da, 1971-
Propriedades físico-químicas de palhiço de cana-de-
açúcar utilizado para cogeração de energia elétrica /
Marcius Xavier Rodrigues da Costa. - Botucatu : [s.n.],
2011
ix, 58 f. : gráfs. color., tabs., fotos color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu,
2011
Orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra
Inclui bibliografia

1. Biomassa. 2. Cogeração de energia elétrica. 3.
Palha. 4. Palhiço de cana-de-açúcar. 5. Resíduo de cana-
de-açúcar. 6. Usina. I. Guerra, Saulo Philipe Sebastião.
II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita
Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências
Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÔNOMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
UTILIZADO PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA"**

ALUNO: MARCIUS XAVIER RODRIGUES DA COSTA

ORIENTADOR: PROF. DR. SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

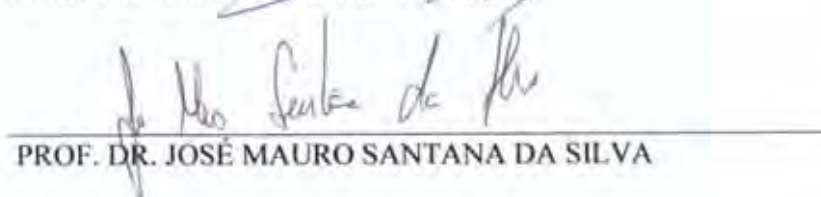
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA



PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS



PROF. DR. JOSÉ MAURO SANTANA DA SILVA

Data da Realização: 08 de fevereiro de 2011

Dedico este trabalho à minha família, aos meus pais Sebastião (in memoriam) e Maria pela dedicação e esforço por minha formação, a minha esposa Inez e filhos João Victor e Lívia, grandes tesouros de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e energia para seguir em desenvolvimento.

À Unesp, em especial à FCA, Departamento de Gestão e Tecnologia Agroindustrial, pela oportunidade de estudar em tão privilegiado ambiente, reconhecido internacionalmente por suas realizações e potenciais pela qualidade de seus Docentes.

Ao meu Orientador Prof. Saulo, que me incentivou e indicou caminhos, com sua designação de líder acadêmico.

Ao Prof. Kleber e Prof. José Mauro pelas observações e contribuições relevantes na elaboração deste trabalho. Pelo cumprimento do ritual acadêmico.

Ao Engenheiro Raul Marcel Daré, seu apoio e incentivo tornaram o encontro da disponibilidade e do esforço em mais um resultado em Equipe.

Ao Engenheiro Darci Emerson Moro Conche por contribuir para o melhor conhecimento da função agrícola no setor sucroenergético.

Ao Engenheiro Guilherme Oguri por contribuições de revisão e formatação do trabalho.

Aos colegas e amigos de academia e de trabalho; de uma maneira ou de outra sempre encontramos quem nos ajuda, afinal, ninguém faz nada sozinho.

Aos colaboradores da Unesp, em especial da Gestão e Tecnologia Agroindustrial, da Pós-Graduação e da Biblioteca, sua dedicação e zelo contribuem para a boa qualidade desta escola.

“Ad augusta per angusta”

SUMÁRIO

	PÁGINA
LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE EQUAÇÕES	VIII
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	4
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 A PLANTA CANA-DE-AÇÚCAR	7
4.2 CARACTERÍSTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA	10
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO PALHIÇO	17
4.4 O POTENCIAL DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	20
4.5 IMPACTO AMBIENTAL E DE PRODUTIVIDADE DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO CAMPO	23
5 MATERIAL E MÉTODOS	28
5.1 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE	29
5.2 DETERMINAÇÃO DA IMPUREZA MINERAL	30
5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE COMPARAÇÃO ENTRE MÉDIAS (TUKEY)	32
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
7 CONCLUSÕES	54
8 REFERÊNCIAS	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matérias-primas para produção de etanol a partir de seus açúcares	17
Tabela 2 – Composição imediata de bagaço comparado com carvão	18
Tabela 3 – Resultados de análise de composição elementar de bagaço de cana	18
Tabela 4 – Composição imediata de partes da cana, valores em percentual de peso (base seca)	19
Tabela 5 – Composição elementar de partes da cana, valores em percentual de peso (base seca)	19
Tabela 6 – Produção de matéria-prima e seus resíduos no Brasil em 2004	22
Tabela 7 – Correlações entre umidade e impureza mineral por Fornecedor	52
Tabela 8 – Comparação de médias através de teste de Tukey	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de cortes transversais comparativos entre anatomias de folhas de plantas C_3 e C_4	8
Figura 2 – Cultura de cana-de-açúcar sendo colhida mecanicamente	11
Figura 3 – Recebimento da matéria-prima na usina durante a coleta da amostragem para análises físico-químicas laboratoriais de caracterização da qualidade	11
Figura 4 – Cortes de cana de açúcar.	12
Figura 5 – Representação da parte aérea da planta cana-de-açúcar.	12
Figura 6 - Exemplo de composição da cana, representação de médias de amostras em cultura de uma variedade	14
Figura 7 – Equação com reação de redução da sacarose em glicose e frutose.	16
Figura 8 – Moagem de cana-de-açúcar no Brasil por safra.....	21
Figura 9 – Moagem de cana-de-açúcar Safra 2008/09	21
Figura 10 – Desenvolvimento de ervas daninhas em safras consecutivas segundo testes de diferentes quantidades de palhicho deixadas no campo	25
Figura 11 – Redução dos prazos de percentual de cana-de-açúcar colhida sem queima para áreas mecanizáveis segundo o Protocolo Ambiental	26
Figura 12 – Redução dos prazos de percentual de cana-de-açúcar colhida sem queima para áreas não-mecanizáveis segundo o Protocolo Ambiental	27

Figura 13 – Estufa típica de laboratório com regulagem de temperatura, utilizada para secagem do palhiço e determinação da umidade	29
Figura 14 – Mufla típica de laboratório com regulagem de temperatura, utilizada para a calcinação do palhiço e determinação da impureza mineral	31
Figura 15 – Umidades do palhiço obtidas no período de recebimento na Indústria.	34
Figura 16 – Distribuição das umidades do palhiço recebido em 2009	34
Figura 17 – Distribuição das umidades do palhiço recebido em 2010	35
Figura 18 – Impurezas minerais do palhiço obtidas no período de recebimento na Indústria	36
Figura 19 – Gráfico de distribuição das impurezas minerais do palhiço recebido em 2009	36
Figura 20 – Gráfico de distribuição das impurezas minerais do palhiço recebido em 2010	37
Figura 21 – Histórico de índice pluviométrico anual (mm) de 1995 a 2010 para a região referente aos fornecedores de palhiço à indústria	38
Figura 22 – Histórico de índice pluviométrico mensal para os anos de 2009 e 2010, período de recebimento de palhiço em estudo	38
Figura 23 – Correlação linear entre umidade e impureza mineral com $R^2 = 0,032$ indicando baixa relevância estatística	39
Figura 24 – Umidade média, impureza mineral média e entregas relativas por Fornecedor	40
Figura 25 – Correlação entre umidade média e impureza mineral média por Fornecedor	41

Figura 26 – Correlação ajustada entre umidade média e impureza mineral média por Fornecedor	42
Figura 27 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor I	43
Figura 28 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor II	44
Figura 29 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor III	45
Figura 30 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor IV	46
Figura 31 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor V	47
Figura 32 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor VI	48
Figura 33 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor VII ..	49
Figura 34 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor VIII .	50
Figura 35 – Entregas, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor IX ...	51

1 RESUMO

A cogeração de energia elétrica é um potencial de receita para as unidades industriais com o aproveitamento da biomassa de cana-de-açúcar, que são o excedente de bagaço da operação industrial e o palhiço proveniente da operação agrícola. Em relação ao palhiço de cana-de-açúcar, considerando os aspectos ambientais e operacionais agrícolas, o seu emprego na cogeração tem se tornado atrativo. Aliado ao compromisso de eliminação de 100% de queimadas nas áreas mecanizáveis, prevista pelo Protocolo Agroambiental para 2017 no Estado de São Paulo, também é favorável à retirada do palhiço do campo a susceptibilidade à infestação de pragas possibilitada pela permanência deste resíduo da colheita mecanizável sobre o solo, além de impacto em produtividade e custo das novas brotas da cana-de-açúcar após a colheita em relação ao manejo de plantas invasoras e ervas daninhas.

Com foco no rendimento e qualidade do palhiço recebido na indústria, o objetivo deste trabalho foi avaliar propriedades físico-químicas de umidade e impurezas minerais do palhiço de cana-de-açúcar utilizado em duas unidades industriais do centro-oeste paulista para cogeração de energia, da ordem de 100.000 toneladas de palhiço processadas

entre 2009 e 2010. Buscou-se correlação estatística entre as propriedades físico-químicas de umidade e impurezas minerais para representar este fornecimento de palha. Foram avaliadas a influência da precipitação pluviométrica em relação à umidade do palhico e a influência da classificação textural dos solos em relação à impureza mineral do palhico.

Sob os aspectos técnico e econômico, é relevante para a indústria reduzir os impactos de impureza mineral e umidade do palhico.

Quanto menor a impureza mineral, menor abrasividade no processamento do palhico, desde o preparo passando pela queima até a eliminação das cinzas nas caldeiras, resultando em melhor conservação de equipamentos e menor quantidade de efluentes sólidos na indústria.

Quanto menor a umidade, maior a produtividade no corte do palhico, também maior é o poder calorífico inferior, sendo maior o rendimento energético desta biomassa. A correlação entre impureza mineral e umidade foi estudada considerando vários fornecedores de palhico entregue na indústria.

ANALISE OF PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES OF SUGAR CANE TRASH USED TO ELECTRICAL ENERGY PRODUCTION

Botucatu, 2010. 100p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista

Author: MARCIUS XAVIER RODRIGUES DA COSTA

Adviser: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

2 SUMMARY

The electrical energy cogeneration with sugar cane bagasse excess is a opportunity for earings. Considering environmental and agriculture aspects, the use of sugar cane trash becomes a attractive business. At the same way according betwing sugar cane produtors in São Paulo States have a target for 100% harvester burn elimination until 2017, the possibilities of sics with trash take away under soil and low productive of new plant to next season.

With focus in quality of the trash received at industry, the subjective of this study it was analise properties of sugar cane trash used to eletrical energy cogeneration in a Mill industrial plant, about 100.000 tons of cane sugar trash processed during the study. The properties studied was moisture, mineral contents and calorific power. Addedly it was analise the influence of pluviometric indice in the sugar cane trash.

About tecnical and economic aspects, it is important to industry decrease impacts of mineral contents and moisture. How many low is the mineral content, less abrasivity conditions in the process, since trash prepar thruthly burnnig until ash discharge in the boiler, resulting in betther equipament conservation and less solids dust. How many low is the moisture, means high prouctive in the cut operation in trash prepar, and higther is the trash calorific power.

The statistical correlation showed low relavance between mineral content and trash moisture than indicate that there are agronomic factors of soil and/or harvester process that determine mineral content independent of trash moisture in the trash delivered at industry.

Keywords: energy, cogeneration, cane, trash

3 INTRODUÇÃO

O bagaço e o palhiço de cana-de-açúcar são fontes de energia, sendo estas biomassas queimadas em caldeiras para geração de vapor. O setor sucroenergético com a utilização de tecnologias para geração de vapor superaquecido de média pressão (45 a 60 bar) e de alta pressão (60 a 100 bar), busca um melhor aproveitamento da energia disponível em suas biomassas.

As caldeiras produzem o vapor superaquecido fornecido para as turbinas, sendo neste equipamento parte da energia térmica do vapor superaquecido convertida em trabalho, movimentando acionamentos de geradores de energia elétrica. Outra parte da energia térmica do vapor superaquecido de entrada é conservada no vapor saturado de saída das turbinas (vapor de escape). A energia elétrica gerada e o vapor de escape são utilizados nos processos internos de extração, açúcar, etanol, levedura e utilidades. O excedente de energia elétrica gerada é exportado, vendido ao mercado, utilizando as redes de transmissão das concessionárias do setor de energia elétrica.

Seguindo a tendência de melhor aproveitamento da energia, as turbinas aplicadas em acionamentos de equipamentos dos processos, principalmente em moendas, que

são tecnologicamente desatualizadas e de menor eficiência, estão sendo gradativamente substituídas por motores elétricos.

Sob o aspecto de consumo de vapor (energia térmica), a produção de açúcar é o principal processo consumidor em uma usina, em função da evaporação necessária para concentrar e cristalizar a sacarose. A produção de etanol concentra seu maior consumo de energia térmica na destilação e desidratação. A troca de calor do vapor saturado nos equipamentos promove a condensação do vapor, e o condensado ainda quente retorna para as caldeiras, fechando o circuito, reduzindo a necessidade de captação e tratamento de água fria.

Nem todas as companhias possuem os processos de açúcar e etanol, algumas apenas de etanol. Outras possuem além de etanol e açúcar, também de secagem de levedura, assim como também nem todas exportam energia. Portanto para cada caso as ponderações sobre o balanço energético devem ser consideradas.

A alta taxa de síntese de biomassa da cana-de-açúcar confere a esta matéria-prima relevância em volume e flexibilidade para os processos produtivos, conferindo respostas às demandas da sociedade pelos produtos de sua cadeia produtiva, sejam alimentos ou energia. Comparativamente a outras culturas como o milho e a mandioca, a cana-de-açúcar apresenta rendimento superior de cerca de 218% (em relação à mandioca) e 500% (em relação ao milho) para produção de etanol a partir de açúcares fermentecíveis disponíveis. Este balanço considera a produtividade por unidade de área plantada e teor de açúcares fermentecíveis disponíveis sem o emprego do material celulósico.

Historicamente busca-se a obtenção de fontes de energia renováveis, reduzindo a dependência de fontes fósseis, principalmente o petróleo. As motivações para esta busca se relacionam, entre outros, com aspectos políticos, econômicos, logísticos e de impacto ambiental. Os países em desenvolvimento, os quais têm alto crescimento econômico e populacional, contribuem com projeção de 74% do crescimento da energia primária utilizada no cenário global para 2030 IEA (2007).

Na busca de alternativas de fontes de energia renováveis, nas usinas apontam-se dois potenciais em destaque: produção de energia elétrica a partir da queima de resíduos e obtenção de etanol de segunda geração, através da quebra de cadeias de celulose em açúcares fermentecíveis, ambas utilizando-se do bagaço e do palhiço da cana-de-açúcar. A geração de energia elétrica, ou cogeração, disponibilizando o excedente de energia para

companhias de distribuição desta energia, é tecnologia dominada e fonte de receita de muitas usinas. Segundo projeções da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), na safra 2011/12 há potencial para geração de cerca de 9600 MW em média, sendo a geração atual em hidroelétricas da ordem de 51000 MW, ou seja a contribuição do potencial representaria acréscimo de cerca de 19% da geração de hidrelétricas. Este potencial pode chegar a 14300 MW na safra 2020/21, considerando avanços tecnológicos dos geradores e aproveitamento de 75% de todo o bagaço e 50% de todo o palhiço. A produção de etanol a partir da biomassa de bagaço e palhiço através da quebra da celulose em açúcares fermentescíveis, via chamada de etanol de segunda geração, ainda passa por pesquisas, sendo tecnicamente viável na atualidade porém com necessidade de se desenvolver tecnologia capaz de reduzir os custos de produção. Para o etanol o emprego como matéria-prima para a álcool-química é alternativa renovável para a obtenção de polímeros e outros produtos normalmente obtidos da cadeia petroquímica.

Portanto a utilização do resíduo palhiço de cana-de-açúcar como biomassa para cogeração assume relevância para a matriz energética brasileira, ou mesmo de contexto internacional. Paralelamente outras fontes de biomassa fazem frente ao bagaço e o palhiço de cana-de-açúcar, neste contexto os resíduos de culturas do milho, da soja e da madeira têm destaques significativos em seus volumes e potenciais.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A PLANTA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar do ponto de vista da fisiologia, é considerada uma planta altamente eficiente na conversão de energia solar em energia química durante seu metabolismo fotossintético. A sua elevada produtividade de biomassa está relacionada à alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície plantada. Também, são determinantes para a produtividade o ciclo de crescimento, as características dos cultivares e as variações climáticas, que influenciam diretamente a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar. Posição mais vertical da folha no colmo resulta em maior eficiência fotossintética, ainda mais em plantações de alta densidade populacional, devido à penetração mais eficiente da luz na camada mais alta de sobreposição de folhas, no chamado dossel. E a fotossíntese varia com a idade das folhas, atingindo valores de fixação de C_4 apenas as folhas recém-expandidas, enquanto as folhas mais velhas e as muito jovens realizam fotossíntese em níveis semelhantes aos das plantas C_3 , conforme Stryer (1992).

A diferenciação entre plantas C_3 e C_4 citada acima foi observada a partir de investigações da causa relacionada à maior produtividade de matéria seca em folhas de gramíneas, como milho e cana-de-açúcar. Identificou-se nas folhas destas gramíneas, que o primeiro produto da fixação de gás carbônico (CO_2) era um composto molecular de 4 carbonos

(oxaloacetato), enquanto freqüentemente nas demais plantas o produto inicial era de 3 carbonos (3-fosfoglicerato). Estas plantas também apresentam especificidades anatômicas, fisiológicas e bioquímicas características que constituem o mecanismo C_4 . Um corte transversal de uma folha de planta C_4 , mostra uma diferença estrutural fundamental do seu tecido de assimilação: o parênquima paliádico e lacunoso arranja-se ao redor da bainha vascular em duas camadas de células dispostas concentricamente (MOHR, 1995).

Baseado em Raven (1996), a Figura 1 mostra desenho esquemático de cortes transversais comparativos entre folhas de plantas C_3 e C_4 . A organização em forma de coroa é denominada de anatomia Kranz. Os cloroplastos das células do mesófilo têm grana bem desenvolvidos, enquanto que os cloroplastos das células da bainha vascular tem grana pouco desenvolvido ou não possui nenhum. Adicionalmente, quando a fotossíntese está ocorrendo, nos cloroplastos da bainha vascular geralmente formam grãos de amido maiores e mais numerosos do que nos cloroplastos das células do mesófilo.

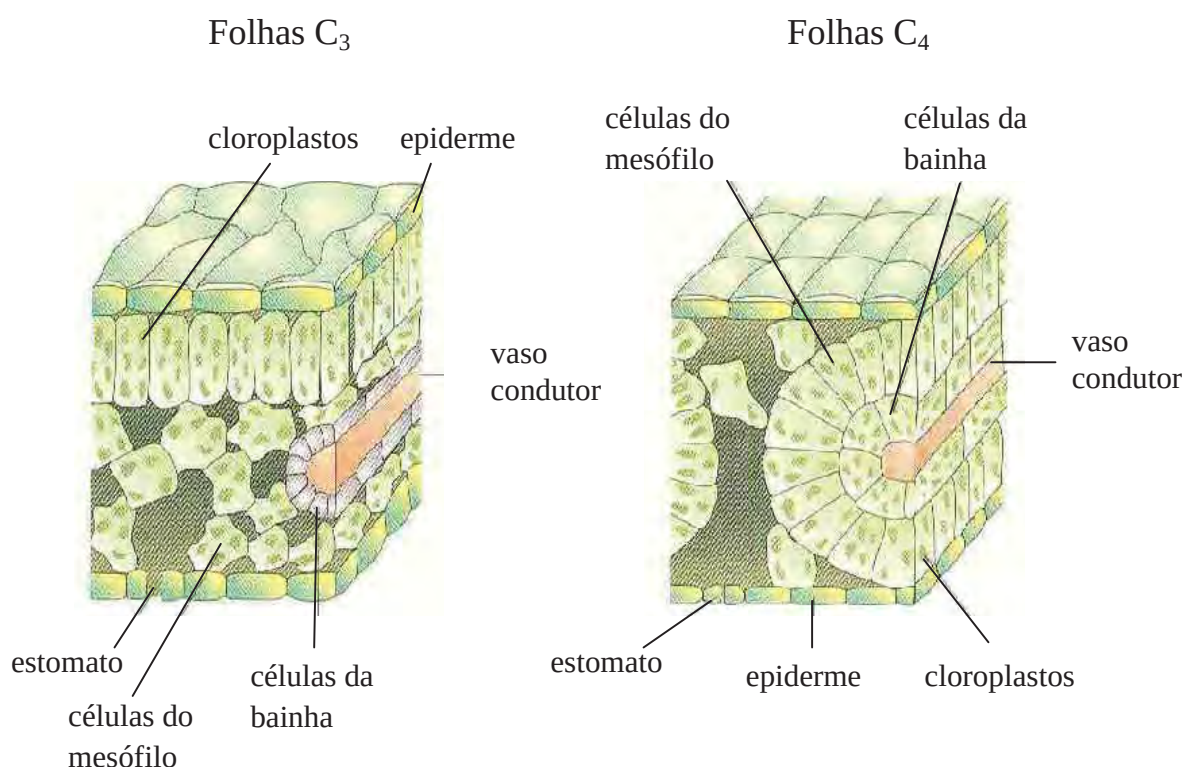


Figura 1 – Desenho esquemático de cortes transversais comparativos entre anatomias de folhas de plantas C_3 e C_4 .

A fotossíntese das plantas C_3 está sempre acompanhada pela fotorrespiração, um processo que consome O_2 e libera CO_2 em presença de luz, este processo causa desperdício. Diferente da respiração mitocondrial, a fotorrespiração não é acompanhada pela fosforilação oxidativa e portanto não produz nenhuma molécula de armazenagem de energia ATP (adenosina trifosfato). Sob condições atmosféricas normais, até 50% do carbono fixado na fotossíntese pelas plantas C_3 pode ser reoxidado a CO_2 durante a fotorrespiração. Este processo é quase ausente nas plantas C_4 (LEHNINGER, 1995).

O principal substrato oxidado na fotorrespiração de plantas C_3 é o glicolato. Ainda de acordo com Raven (1996), o glicolato é oxidado nos peroxissomos das células fotossintetizantes e é formado pela quebra oxidativa da Ribulose 1,5-bifosfato (RuBP) pela Ribulose 1,5-bifosfato carboxilase (rubisco), a mesma enzima que fixa o CO_2 na via C_3 . Isto é possível, pois a rubisco pode promover a reação da RuBP tanto com CO_2 quanto com O_2 : o nome completo da enzima é RuBP carboxilase/oxidase, por causa da sua dupla atividade. Quando a concentração de CO_2 é alta e de O_2 é baixa, a rubisco liga o CO_2 à Ribulose 1,5-bifosfato para produzir 3-fosfoglicerato (PGA). Mas quando a concentração de CO_2 é baixa e a de O_2 é relativamente alta, a enzima age como oxigenase, combinando RuBP e O_2 para produzir fosfoglicolato e PGA, ao invés de duas moléculas de PGA que são normalmente produzidas na carboxilação. O fosfoglicolato é então convertido em glicolato, que é o substrato oxidado durante a fotorrespiração.

A maior parte das plantas tropicais, assim como as plantas cultivadas na zona temperada originárias dos trópicos, caso do milho, da cana-de-açúcar e do sorgo, desenvolveram um mecanismo para evitar o problema da fotorrespiração. Como as plantas C_4 possuem alta afinidade por CO_2 , diminuem a concentração relativa de O_2 e limitam a fotorrespiração, já que o CO_2 é essencialmente transportado das células do mesófilo para as células da bainha vascular. Nas células do mesófilo acontece a via das moléculas de quatro carbonos, em que o CO_2 é ligado a uma molécula de fosfoenolpiruvato (molécula C_4) formando o oxaloacetato e em seguida malato ou aspartato, dependendo da espécie. O malato ou aspartato é transportado às células da bainha vascular onde libera o CO_2 fixado para que entre na via convencional das moléculas de três carbonos. O piruvato resultante da liberação do CO_2 volta às células do mesófilo para uma nova fixação de CO_2 pela via das moléculas de

quatro carbonos. Desta forma, uma alta razão CO_2 : O_2 é mantida no sítio de ação da rubisco, favorecendo a carboxilação da RuBP nas células da bainha vascular (STRYER, 1992).

Destaca Junqueira (2000) que tanto o ciclo de Calvin (C_3) quanto à fotorrespiração ocorrem nas células da bainha vascular, assim qualquer CO_2 liberado pela fotorrespiração pode ser refixado pela via C_4 que ocorre nas camadas mais externas (células do mesófilo). Assim, há um impedimento de que o CO_2 liberado pela fotorrespiração escape da folha. Como consequência, a taxa de fotossíntese líquida das plantas C_4 é maior que nas plantas C_3 .

Importante observação, citada por Lehninger (1995), quanto ao ganho de eficiência do metabolismo C_4 , é a sua relação com a temperatura, alcançado por volta de 28°C a 30°C . A partir desta faixa a afinidade da rubisco por CO_2 diminui, favorecendo seu consumo pela via C_4 . Embora para cada molécula de CO_2 fixada pela via C_4 consuma cinco moléculas de ATP, enquanto pela via C_3 consuma apenas três moléculas de ATP, com a eliminação da perda por fotorrespiração, o custo energético nas plantas C_4 mais do que compensa.

4.2 CARACTERÍSTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA

As Figuras 2 e 3 mostram fotos que ilustram uma de cultura de cana-de-açúcar durante colheita mecanizada e o recebimento da matéria-prima em uma usina; enquanto a Figura 4, fotos de partes de cana-de-açúcar em cortes. Na Figura 5, é apresentado desenho esquemático da parte aérea de uma planta de cana-de-açúcar, destacando as principais partes da matéria-prima: colmo, folhas e ponteiro.



Figura 2 – Cultura de cana-de-açúcar sendo colhida mecanicamente.



Figura 3 – Recebimento da matéria-prima na usina durante a coleta da amostragem para análises físico-químicas laboratoriais de caracterização da qualidade.



Figura 4 – Cortes de cana-de-açúcar de açúcar

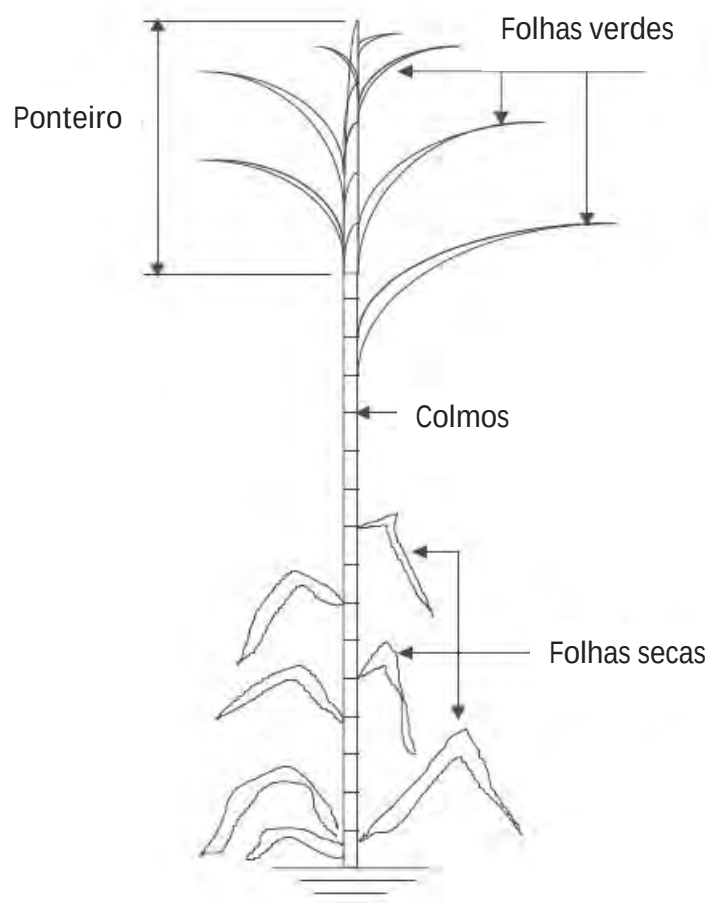


Figura 5 – Representação da parte aérea da planta cana-de-açúcar. Fonte: CTC

Algumas terminologias são necessárias para melhor entendimento entre partes interessadas na cadeia produtiva. Conforme Ripoli (2007), o termo correto para designar o resíduo da colheita da cana-de-açúcar é palhiço, que compreende as folhas verdes e secas (palha), ponteiros (palmitos) e pedaços de colmos.

“A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima industrial pode ser definida como uma série de características intrínsecas da própria planta, alterada pelo manejo agrícola e industrial, que definem seu potencial para produção de açúcar e álcool. Sob o aspecto tecnológico, os colmos são constituídos de caldo e os sólidos insolúveis em água”, a partir deste conceito resultam as Equações I e II, conforme Fernandes (2003).

$$CA = SS + CL \quad (I)$$

$$CL = SST + A \quad (II)$$

Onde:

CA = massa de cana-de-açúcar

SS = massa de sólidos solúveis

CL = massa de caldo da cana-de-açúcar

SST = massa de sólidos solúveis totais

A = massa de água

Terminologias aplicadas no setor sucroenergético, segundo Fernandes (2003). Cana-de-açúcar: na indústria se refere aos colmos da cana-de-açúcar. Assim, as análises de cana-de-açúcar dizem respeito às análises dos colmos. A composição dos colmos varia em função de vários fatores: idade cronológica e fisiológica da cultura, época da amostragem, variedade, estágio de maturação, adubação e fertirrigação, tipo de solo, etc. A composição também varia no sentido longitudinal e transversal do colmo. Matéria-prima: carregamentos de cana-de-açúcar entregues na indústria para processamento, composto por cana-de-açúcar (colmos) e impurezas vegetais e minerais. As impurezas vegetais são oriundas da própria planta, como os ponteiros e folhas verdes e secas, raízes, assim como também de

plantas daninhas. As impurezas minerais são em geral oriundas de terra e pedras, agregadas durante as etapas de corte e carregamento no campo. Ponteiros ou pontas: topo dos colmos de cana-de-açúcar, considerando a partir do quarto entrenó, segundo a classificação de Kujiper, sendo o entrenó número um (K+1) aquele que está recoberto pela folha do TVD (*top visible dewlap* ou última lígula visível). Como os ponteiros têm densidade próxima da densidade dos colmos, a separação gravimétrica é difícil.

Destacam-se na Figura 6, gráficos com a composição média da cana-de-açúcar, onde os principais constituintes são açúcares e biomassa de bagaço. Importante frisar que os dados típicos são ilustrativos com baixos níveis de palhiço, que é considerado impureza vegetal nos carregamentos de cana-de-açúcar.

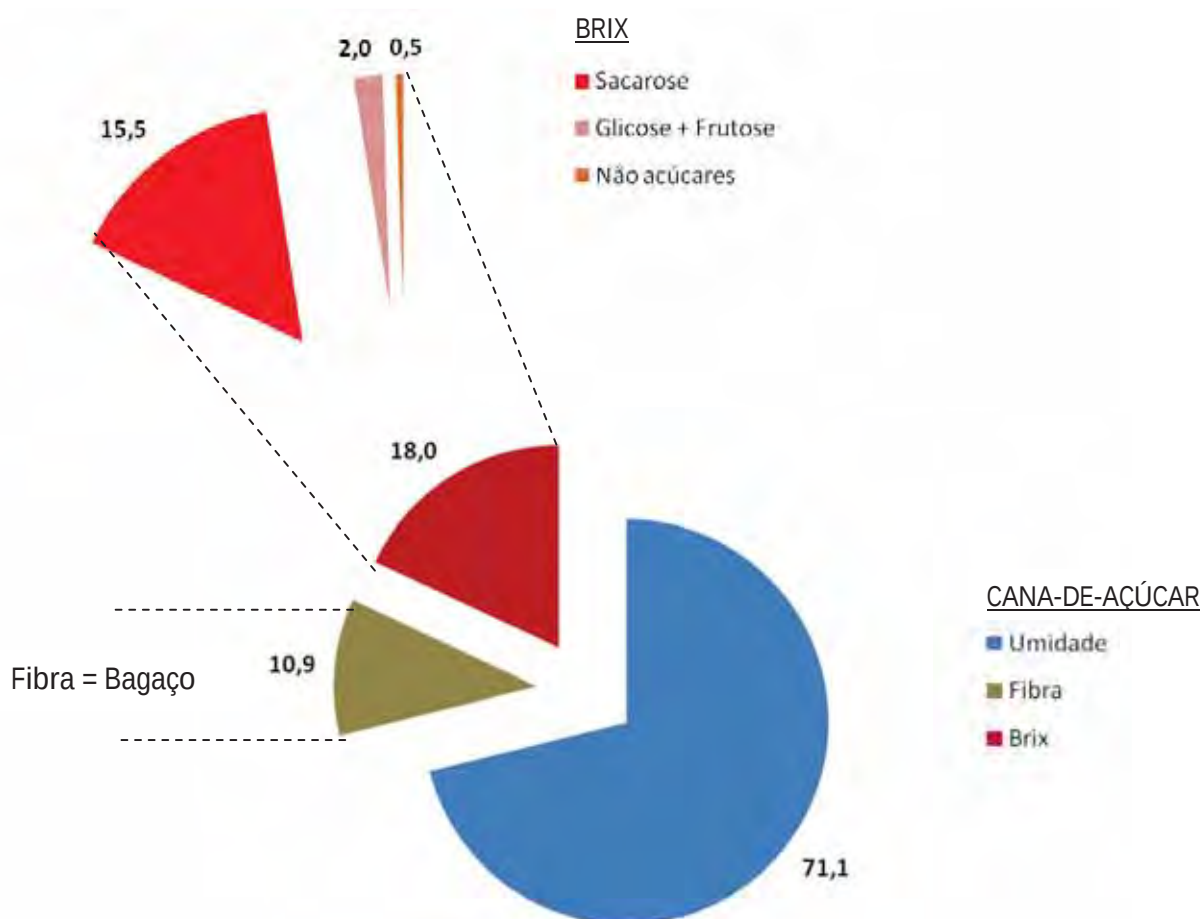


Figura 6 – Exemplo de composição de cana-de-açúcar. Fonte: adaptado de Fernandes (2003)

A Figura 6 é a representação de médias de amostras de cana-de-açúcar em cultura de uma variedade. Em destaques, a composição dos sólidos solúveis aparentes (Brix) e parcela de fibra que é a biomassa em base seca que compõe o bagaço. A fração de sólidos insolúveis portanto é composta pela fibra da cana-de-açúcar, que é o material proveniente dos tecidos de células presentes nos colmos da cana-de-açúcar. E o caldo é composto por água (umidade da cana-de-açúcar) e pelos sólidos solúveis totais, que são açúcares e não açúcares dissolvidos. Para determinação de sólidos solúveis totais é utilizada a medida aparente de brix do caldo de cana-de-açúcar. Dentre os açúcares dissolvidos estão a sacarose, a glicose e a frutose. Os não açúcares dissolvidos são compostos orgânicos e inorgânicos presentes no caldo. A medição de sólidos solúveis aparente é a mais utilizada na indústria do açúcar e etanol. E expressa o percentual em peso de sólidos solúveis contidos em uma solução pura de sacarose. Por consenso, é admitido que o brix seja um percentual aparente de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada impura, por exemplo, o caldo de cana-de-açúcar e outros caldos, xaropes e soluções presentes nos processos de uma usina (FERNANDES, 2003).

O termo brix também pode ser expresso em percentual de massa seca dissolvida na solução, conforme a Comissão Internacional para Métodos Uniformes de Análise de Açúcar, ICUMSA (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis). A medição do brix de uma solução pode ser realizada através de densímetros calibrados com solução aquosa pura de sacarose a 20°C (brix aerométrico); ou através de refratômetros, que são aparelhos que correlacionam a concentração de sólidos solúveis com o índice de refração da solução, ou seja, a capacidade de desviar a direção de um feixe de luz que atravessa a solução (brix refratométrico). Os resultados são expressos em °brix ou °Brix, de acordo com o procedimento da ICUMSA, GS 5/7-1 de 1994.

Baseado em Eggleston (2006), os açúcares principais da cana-de-açúcar são sacarose, glicose e frutose. A sacarose é um dissacarídeo, que se desdobra com relativa facilidade nos monossacarídeos glicose e frutose, reação de inversão da sacarose. O desdobramento é favorecido por condições de pH ácido, aumento de temperatura e presença de enzimas. A Figura 7 apresenta a reação de inversão da sacarose, que representa perda no processo de produção de açúcar, sendo os açúcares invertidos glicose e frutose fermentescíveis, próprios para produção de etanol.

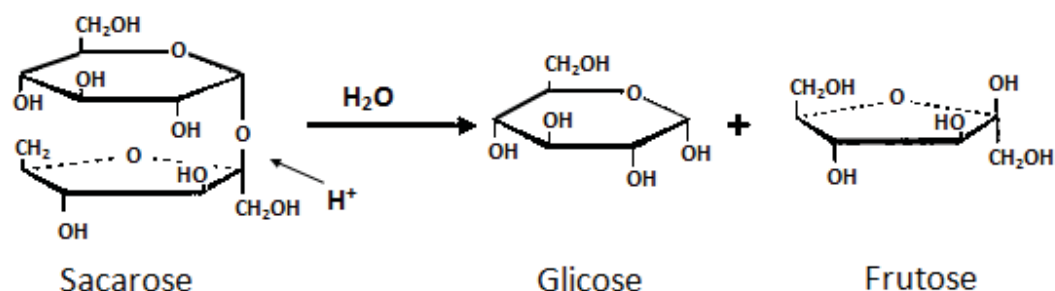


Figura 7 – Equação com reação de redução da sacarose em glicose e frutose. Fonte: Eggleston (2006)

Para efeito de pagamento da matéria-prima cana-de-açúcar, são estabelecidos critérios em comum acordo entre fornecedores e unidades industriais, através de representações, como é o caso do Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo – CONSECANA. O Conselho estabelece critérios de amostragem, especifica equipamentos envolvidos nas análises e define procedimentos e cálculos para efeito de caracterização da qualidade e pagamento da cana-de-açúcar no teor de açúcares, ou mais especificamente nos Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) para produção de açúcar e etanol: sacarose, glicose e frutose (CONSECANA, 2006).

Em relação a outras matérias-primas como possíveis fontes de obtenção de etanol, considerando o cenário brasileiro, na Tabela 1 são apresentados alguns números que evidenciam a destacada posição da cana-de-açúcar em termos de produção agrícola e rendimento para o processo de produção de etanol a partir de seus açúcares.

Tabela 1 – Matérias-primas para produção de etanol a partir de seus açúcares

Matéria-prima	Produção brasileira (milhões de ton/ano)	Produtividade (ton/ha/ano)	Rendimento em etanol (l/ha/ano)
Cana-de-açúcar	410	72	6000
Milho	34,9	3	1200
Mandioca	27	13,8	2700
Batata doce	0,5	11,2	1770

Fonte: adaptado de Leal (2008)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO PALHIÇO

As características físico-químicas do bagaço da cana-de-açúcar podem variar significativamente conforme a variedade de cana-de-açúcar, estágio de desenvolvimento, manejo de corte e condições climáticas de precipitação durante o manejo de corte da cana-de-açúcar e o manejo de recolhimento de palhiço. Com relação ao manejo, vale ressaltar os impactos do tipo de colheita nas características do bagaço, que dependem de fatores como: cana-de-açúcar queimada ou não queimada, corte manual ou mecanizado, carregamento manual ou mecanizado. Segundo Ripoli (2007), o tipo de colheita e as condições climáticas de precipitação durante as operações no campo afetam diretamente os teores de impurezas minerais e vegetais.

A densidade do bagaço armazenado é bastante variável devido ao manejo e condições de estocagem, aberto ou coberto. É comum a aplicação de aproximação de 0,30 kg/m³. A composição imediata é aplicada aos combustíveis, apresentando os teores umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo. Os voláteis medem: a água presente no material como umidade, a água desprendida do material seco a partir de sua decomposição química durante aquecimento sem a presença de ar (oxigênio), a mistura complexa de gases combustíveis (hidrogênio, metano e outros), alcatrões e hidrocarbonetos diversos contendo oxigênio. Cinzas são resíduos minerais remanescentes da queima completa do material, são compostos minerais contendo sílica e sais. O carbono fixo é determinado por diferença, considerando a massa seca do material, retiram-se as massas obtidas de voláteis e cinzas. A

composição elementar trás informações quantitativas sobre a constituição química do material, em termos dos elementos hidrogênio, carbono, oxigênio, enxofre e nitrogênio. Também a determinação de minerais é obtida através de valores de cinzas (CTC, 2010).

A Tabela 2 trás valores obtidos para composição imediata em análises típicas, e a Tabela 3 mostra resultados de várias análises de composição elementar para exemplificação.

Tabela 2 – Composição imediata de bagaço comparado com carvão

Análise	Carvão¹	Bagaço¹	Bagaço²
Umidade	8	50	50,0
Voláteis	24	35	37,0
Cinzas	12	4	1,5
Carbono fixo	56	11	11,5
Total	100	100	100

Fonte: adaptado de HASSUANI (2010)

Tabela 3 – Resultados de análise de composição elementar de bagaço de cana-de-açúcar

ANÁLISE	C	H	O	N	S	CINZAS
I	46,5	6,5	46,0			1,0
II	44,0	6,0	48,0			2,0
III	47,0	6,5	44,0			2,5
IV	46,4	6,4	44,2			3,0
V	49,5	6,2	44,3			
VI	44,3	5,7	42,0			4,0
VII	45,2	5,4	41,8	0,2	0,0	
VIII	48,4	6,0	41,6	0,2	0,0	
MÉDIA GERAL	46,4	6,1	44,0	0,2	0,0	2,5
DESVIO PADRÃO	1,9	0,4	2,2			1,1

Legendas: C – carbono; H – hidrogênio; O – oxigênio; N – nitrogênio; S - Enxofre

Fonte: adaptado de CTC, 2008

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados valores de análise de imediata e composição elementar respectivamente, comparando partes da cana-de-açúcar: folhas secas, folhas verdes, palmito e bagaço.

Tabela 4 – Composição imediata de partes da cana-de-açúcar, valores em percentual de peso (base seca)

Análise	Folhas secas	Folhas verdes	Palmito	Bagaço
Umidade	13,5	67,7	82,3	50,2
Voláteis	84,5	80,6	79,3	79,9
Cinzas	3,9	3,7	4,3	2,2
Carbono fixo	11,6	15,7	16,4	18,0

Fonte: adaptado de Hassuani (2005)

Tabela 5 – Composição elementar de partes da cana-de-açúcar, valores em percentual de peso (base seca)

Análise	Folhas secas	Folhas verdes	Palmito	Bagaço
Carbono	46,2	45,7	43,9	44,6
Hidrogênio	6,2	6,2	6,1	5,8
Nitrogênio	0,5	1,0	0,8	0,6
Oxigênio	43,0	42,8	44,0	44,5
Enxofre	0,1	0,1	0,1	0,1
Cloro	0,1	0,4	0,7	0,02

Fonte: adaptado de Hassuani (2005)

O poder calorífico dos materiais traz relevante informação para o presente trabalho. Através desta propriedade e de balanços de massa configuram-se os balanços energéticos do ponto de vista de geração de energia obtida a partir da combustão de

materiais. Conforme Perry (2007), o poder calorífico representa a quantidade de energia liberada pela quebra química dos compostos presentes no material durante a combustão, expressa em unidade de energia por unidade de massa do material (por exemplo kcal/kg, kJ/kg ou BTU/lb). Existe uma diferenciação conceitual importante entre Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI), basicamente distinguem-se pela energia disponibilizada a partir da queima do material seco e do material úmido. Importante ter em mente que a água desprendida do material (seja por apresentar umidade ou pelo resultado da reação de combustão) conceitualmente absorverá parte da energia liberada para se aquecer e passar do estado líquido para o gasoso.

4.4 O POTENCIAL DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Pelos cálculos da UNICA, União da Indústria de Cana-de-açúcar, associação de 119 companhias produtoras de 50% do etanol e 60% do açúcar produzido no Brasil, há potencial para geração de cerca de 13 mil MW médios de energia elétrica nos canaviais do Centro-Sul. Esta energia é o equivalente a 14% das necessidades nacionais projetadas para 2020, sendo que atualmente 22% das usinas exportam energia elétrica excedente cogerada.

A Figura 8 mostra gráfico da evolução da moagem de cana-de-açúcar no Brasil, oferecendo percepção de taxa de crescimento média de 17% ao ano, com incremento médio de 72 milhões de toneladas ao ano, com base nas suas últimas três safras. A Figura 2 mostra gráfico da distribuição da moagem nos estados brasileiros baseada na Safra 2008/09, de 569 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Sendo a maior concentração nos estados de São Paulo (61%), Paraná (8%), Minas Gerais (7%) e Goiás (5%), que juntos perfizeram 81% de toda a moagem do país. No setor sucroenergético são comuns referências às regiões Centro Sul e Norte Nordeste de produção no Brasil, fazem parte da região Centro Sul os estados: São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul; e região Norte-Nordeste: Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Sergipe, Bahia, Maranhão, Pará, Piauí, Amazonas, Ceará, Rondônia, Tocantins e Acre (ÚNICA, 2010).

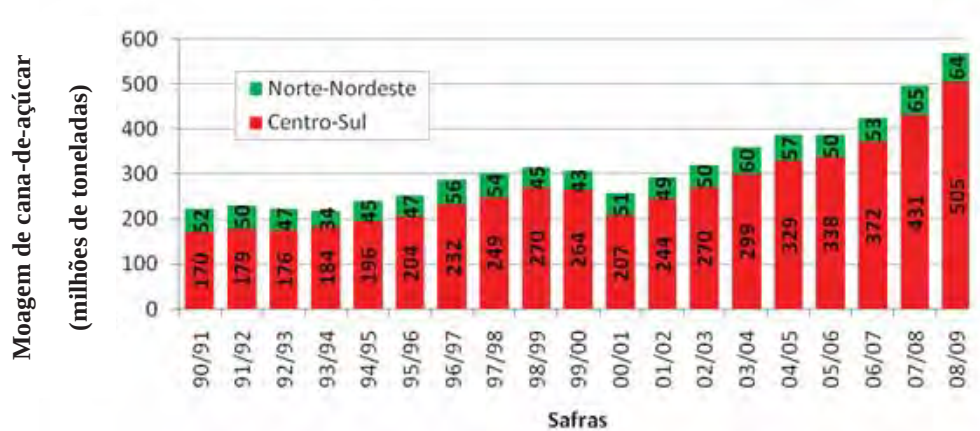


Figura 8 – Moagem de cana-de-açúcar no Brasil por safra. Fonte: adaptado de UNICA (2010).

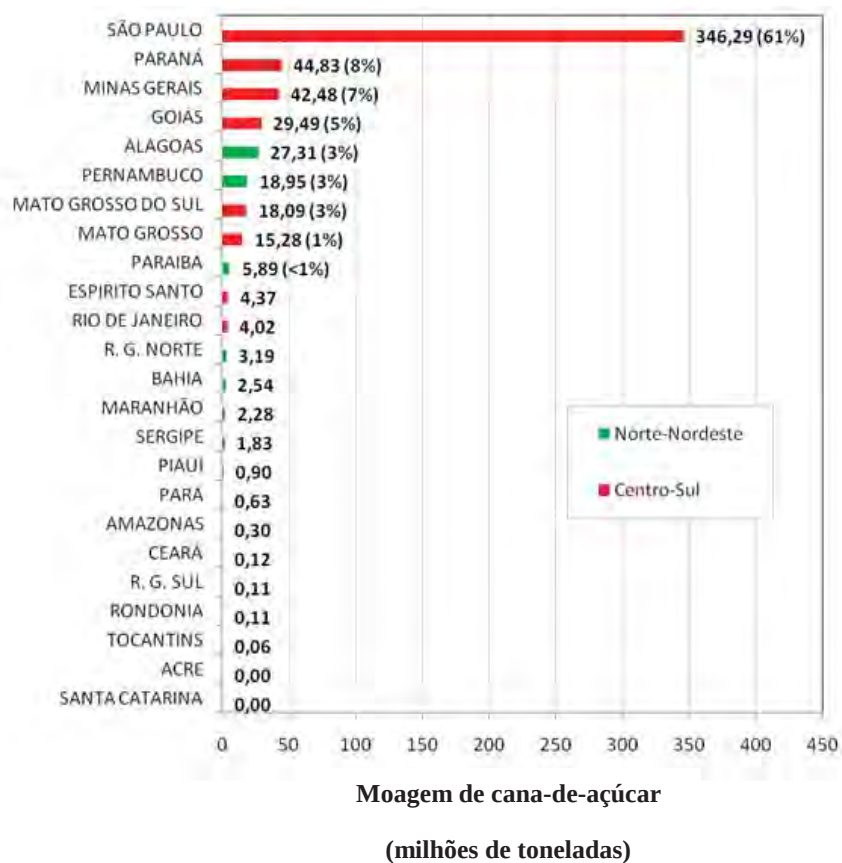


Figura 9 – Moagem de cana-de-açúcar Safra 2008/09. Fonte: adaptado de UNICA (2010).

Considerando ainda o potencial energético de produção de biocombustível etanol ou mesmo energia elétrica, através de cogeração por exemplo. A Tabela 6 mostra potenciais estimados de resíduos gerados por várias culturas. Cortez (2008).

Tabela 6 – Produção de matéria-prima e seus resíduos no Brasil em 2004

Matéria-prima	Produção agrícola (milhões ton)*	Produção de resíduos (ton/ha)**	Matéria seca (%)**	Produção total de resíduos (milhões ton)***
Cana-de-açúcar (bagaço)	396,0	7,0 – 13,0	23,4	59,4
Arroz (casca)	10,3	4,0 – 6,0	89,0	2,9
Café (casca em coco)	2,5	-	-	1,6
Mandioca (rama)	22,0	6,0 – 10,0	90,4	6,5
Milho (palhiço e sabugo)	48,3	5,0 – 8,0	90,5	64,0
Soja (restos de cultura)	51,9	3,0 – 4,0	88,5	80,7
Mamona	0,1	-	-	-
Algodão	2,2	-	-	-

Fontes: adaptado de Cortez (2008); Calculado em base seca

Os valores apresentados na Tabela 6 para a cana-de-açúcar são referentes apenas ao bagaço, e servem como fonte comparativa. Dados mais recentes fornecidos pela Unica, para a safra 2008/09 brasileira, trazem estimativas do potencial de palhiço da cultura da cana-de-açúcar, com processamento de cerca de 570 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, conseqüentemente por volta de 160 milhões de toneladas de bagaço. Sendo estimada o palhiço cerca de um terço da cana-de-açúcar em base seca, quantidade próxima de 160 milhões de toneladas de palhiço também foi gerada. Se se considerar provável que 6% deste palhiço foram levados juntos com os colmos de cana-de-açúcar para a indústria, o restante foi queimado ou permaneceu no campo (SOUZA, 2010).

Ao potencial energético do palhiço e outras fontes lignocelulósicas soma-se o desenvolvimento da cadeia álcool-química de substituição da matéria-prima fóssil

base da petroquímica. Conforme Bastos (2007), vários países vêm no etanol de segunda geração a alternativa renovável e ambientalmente sustentável também como matéria-prima para polímeros e outros produtos derivados do petróleo.

Os principais produtores de petróleo estão localizados geograficamente no oriente médio em regiões de conflitos e a demanda por energia aumenta com o desenvolvimento das sociedades, com suas necessidades e hábitos. Os custos de produção de petróleo no mundo, segundo estimativa da International Energy Agency (IEA), estão entre US\$50 e US\$120 por barril. Com a utilização de fontes de energia fósseis, aumenta-se a emissão de gás carbônico (CO₂) para a atmosfera. Estima-se que entre 0,18 e 0,25 tonelada de CO₂ é emitida à atmosfera por barril de petróleo produzido. Pesquisas têm relacionado o aumento deste gás na atmosfera com o aumento da temperatura média no ambiente através do efeito estufa, com impacto no derretimento das calotas polares. Alguns fatores que podem afetar a saúde e ocupação dos seres vivos do planeta podem ser relatados, como o aumento do nível do mar e influência no clima (IEA, 2008).

4.5 IMPACTO AMBIENTAL E DE PRODUTIVIDADE DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO CAMPO

Estudos têm buscado o equilíbrio entre o benefício da retirada do palhiço do campo, que após o corte da cana-de-açúcar o resíduo sobre o solo torna-se ambiente favorável a proliferação da praga da “cigarrinha da raiz” (*Mahanarva fimbriolata*), e o malefício da retirada, uma vez que o palhiço também é uma forma de proteção do solo, evitando a erosão e desenvolvimento de plantas invasoras, dentre estas as ervas daninhas, além de contribuir para reter a umidade no solo. A contribuição de retenção de umidade é mais relevante em regiões e/ou épocas secas, que após a colheita da cana-de-açúcar é fator favorável ao desenvolvimento da nova brota.

Resultado de testes realizados por Hassuani (2005) com diferentes níveis de permanência de palhiço no campo é mostrado na Figura 10, sendo 100% de palha

deixada no campo (T1); 66% (T2); 33% (T3) e 0% (T4). O fator avaliado foi o desenvolvimento de plantas invasoras ao longo de 6 safras consecutivas, da safra 1997/98 à safra 2002/03. A conclusão foi que a permanência acima de 66% de palhiço tem efeito herbicida importante, chegando a 90% de eficiência nas 5 primeiras safras. Quanto à produtividade de sacarose da cana-de-açúcar nas safras, não houve efeito significativo dos tratamentos de palhiço.

O impacto ambiental da queima é foco de manifestações de populações próximas às regiões de cultivo da cana-de-açúcar junto aos órgãos públicos. Paes (2005) em relatos sobre a prática de queimadas de palhiço em quase todos os 97 países produtores de cana-de-açúcar, cujo objetivo é melhorar a segurança e a produtividade para o corte manual da cultura pela eliminação do palhiço e folhas secas. Sem correlação científica entre os fatores das queimadas, principalmente emissão de partículas, e incidência de doenças respiratórias crônicas, estudos demonstraram que os riscos destas doenças entre as populações de regiões produtoras de cana-de-açúcar e de regiões com ausência da cultura consideradas estâncias turísticas foram estatisticamente equivalentes. Com o mesmo objetivo, o Instituto Nacional Americano para a Saúde e Segurança Ocupacional em estudo no Hawai não obteve comprovação de danos a saúde provocados pela fuligem da queima de cana-de-açúcar. É importante destacar apesar destes estudos, o inconveniente dos particulados (“carvãozinho”), o impacto destas queimas ao meio ambiente em condições de baixa umidade relativa do ar e pela emissão de gás carbônico e monóxido de carbono (efeito estufa), além dos riscos às redes elétricas e vias de tráfego de veículos próximas às áreas de queimada.

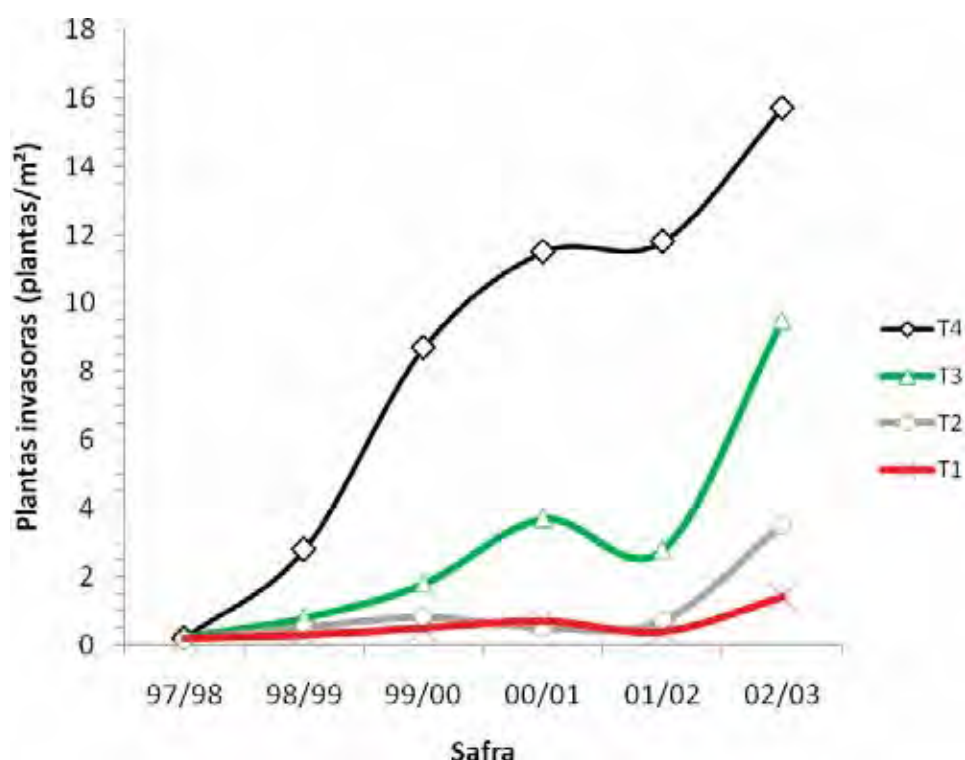


Figura 10 – Desenvolvimento de plantas invasoras em safras consecutivas. Fonte: adaptado de Hassuani (2005).

No Estado de São Paulo vigoram a Lei Estadual 11.241/02 e o Decreto Estadual 47.700/03, e através de resoluções a Secretaria de Estado de Meio Ambiente (2010) estabelece impedimentos da queima da cana-de-açúcar através de regras baseadas em valores monitorados de umidade relativa do ar por regiões, “... para o resguardo e recuperação de qualidade de vida e saúde da população...”. Como regras gerais de impedimento, define períodos do ano e do dia, e umidade relativa do ar com referências em 20% a 30%. Por exemplo, a Resolução SMA-35 de 11/05/2010 estabelecia entre seus 7 Artigos: “Artigo 5º - Após 30 de novembro sempre que o teor de umidade relativa do ar for maior ou igual a 20% (vinte por cento) e menor que 30% (trinta por cento) por um período de dois dias consecutivos, a queima da palha da cana-de-açúcar será suspensa entre as 06:00 e 20:00 horas.”

O Protocolo Agroambiental, uma iniciativa entre Governo do Estado de São Paulo e a Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro Sul do Brasil assinada em 4 de junho de 2007, estabeleceu uma série de princípios e diretrizes técnicas de aspecto ambiental, em destaque a antecipação voluntária dos prazos de legais para o fim da queimada da cana-de-açúcar, empregada em colheita manual. A redução dos prazos para 100% de cana-de-açúcar colhida sem queima foram de 2021 para 2014 em áreas mecanizáveis (menos 7 anos) e de 2031 para 2017 em áreas não mecanizáveis (menos 14 anos). As Figuras 11 e 12 ilustram graficamente as antecipações dos prazos do Protocolo Ambiental.

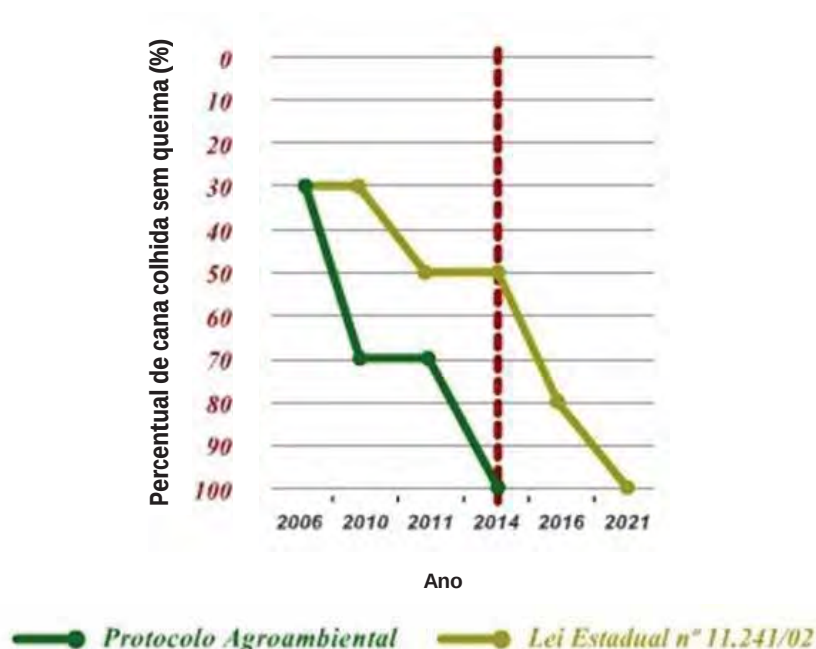


Figura 11 – Redução dos prazos de percentual de cana-de-açúcar colhida sem queima para áreas mecanizáveis segundo o Protocolo Ambiental. Fonte: UNICA

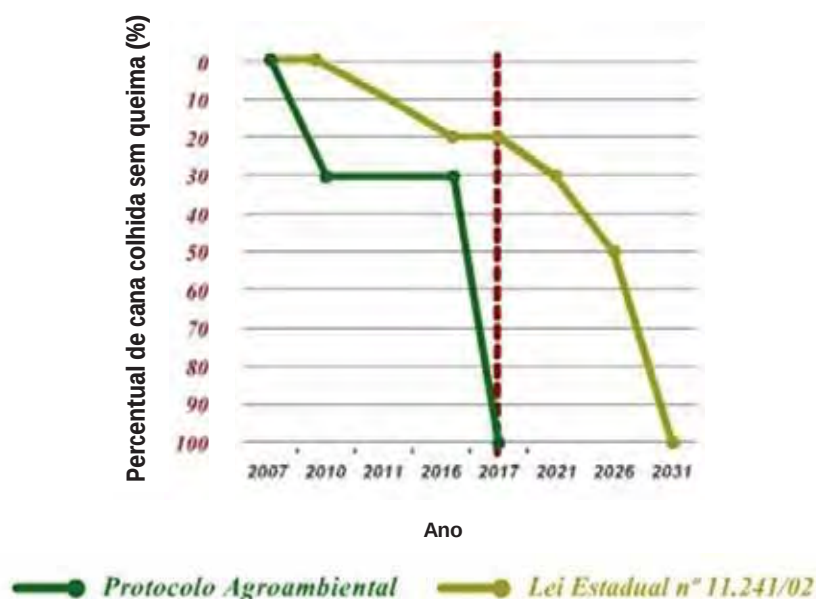


Figura 12 – Redução dos prazos de percentual de cana-de-açúcar colhida sem queima para áreas não-mecanizáveis segundo o Protocolo Ambiental. Fonte: UNICA

Em relação a custos de entrega de palhiço na unidade industrial, Perea (2009) estudou dois métodos de manejo e transporte do palhiço. O primeiro método, com recolhimento do palhiço a partir do solo na forma de fardos, posterior à colheita mecanizada da cana-de-açúcar e após período de secagem natural do palhiço. O segundo método com recolhimento do palhiço em conjunto com os colmos da cana-de-açúcar, sendo transportado para unidade industrial que faz a separação do palhiço através de sistema de limpeza a seco instalado entre o descarregamento de cana-de-açúcar e a alimentação da moenda. Em ambos métodos, o palhiço é destinado à queima como biomassa. O custo unitário apurado para o sistema de fardos foi de R\$ 69,44/ton, enquanto para o sistema utilizando limpeza a seco foi de R\$ 30,75/ton. A umidade do palhiço recolhido pelo segundo método é maior, devendo ser considerado seu impacto no poder calorífico da biomassa.

5 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi baseado em coleta de dados de amostras de palhiço de cana-de-açúcar entregues em duas unidades industriais. O palhiço foi recebido na indústria na forma de fardos. As análises de umidade e impurezas minerais foram realizadas a partir da coleta de amostras obtidas através de sondas mecânicas obliquas, localizadas após as balanças de entrada das unidades industriais, mesmos equipamentos e procedimentos utilizados na metodologia de amostragem para a cana-de-açúcar da Consecana (2006). Os resultados foram lançados em banco de dados destacando os fornecedores. O nível de amostragem médio foi de 22% das cargas recebidas.

5.1 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

A umidade do palhiço foi determinada por secagem em estufa até peso constante. O procedimento incluiu: limpeza do cesto a ser utilizado, seguida da tara do cesto em balança analítica, transferência de 50 a 70 gramas de amostra de palhiço para o cesto e pesar o cesto com a amostra e registrar valor. Após, o cesto foi introduzido na estufa com temperatura de 100°C, que foi retirado e pesado até se obter peso constante, quando foi transferido para uma bandeja de resfriamento. O peso do cesto com o palhiço seco foi registrado e o palhiço seco em seguida foi descartado. A Figura 13 ilustra a estufa com regulagem de temperatura utilizada no laboratório.

Alguns cuidados foram considerados: manuseio das amostras na estufa com utilização de EPI's apropriados e conservação das saídas de ar da estufa limpos e desentupidos.



Figura 13 – Estufa, vista do equipamento (esquerda) e vista interna com cesto utilizado para conter amostra (direita).

A Equação III foi utilizada para obter a umidade.

$$\% \text{ Umidade} = 100 - (\text{PTPS} - \text{T}) * 100 / (\text{PTPU} - \text{T}) \quad (\text{III})$$

Onde:

PTPS = Peso total do palhiço seco + tara do cesto

PTPU = Peso total do palhiço úmido + tara do cesto

T = Tara do cesto

5.2 DETERMINAÇÃO DA IMPUREZA MINERAL

A impureza mineral do palhiço foi determinada pela queima completa dos constituintes orgânicos do palhiço em mufla até calcinação. O procedimento inclui: fazer limpeza completa do cadinho a ser utilizado; transferir de 10 a 15 gramas da amostra de palhiço para o cadinho; pesar o cadinho com a amostra e registrar o valor; introduzir o cadinho na mufla com temperatura inicial de 100 °C, sendo aumentada até 800 °C, permanendo por 2 horas; desligar a chave geral da mufla e aguardar a redução da temperatura para 200 °C e com o auxílio do garfo retirar os cadinhos; transferir os cadinhos para a bandeja de resfriamento até atingir a temperatura ambiente; pesar o cadinho e registrar.

Alguns cuidados foram observados: desligar o exaustor da sala antes de retirar os cadinhos da mufla, manuseio dos cadinhos na mufla utilizando EPI's apropriados e conservação dos respiros das muflas limpos e desentupidos.

A Figura 14 ilustra uma mufla típica de laboratório com regulação de temperatura, utilizada para a calcinação do palhiço e determinação da impureza mineral.



Figura 14 – Mufla com regulação de temperatura, vista do equipamento (esquerda) e vista interna com cadinho utilizado para conter amostra (direita).

A Equação IV foi utilizada para obter a impureza mineral.

$$\% \text{ Cinzas} = ((\text{PTC} - \text{T}) * 100 / (\text{PTU} - \text{T})) - 1,38 \quad (\text{IV})$$

Onde:

PTC = Peso total da cinza + tara do cadinho

PTU = Peso úmido + tara do cadinho

1,38 = Branco

T = Tara do cadinho

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE COMPARAÇÃO ENTRE MÉDIAS (TUKEY)

Obteve-se tratamento estatístico através do teste de Tukey de comparação de médias. A metodologia considera o desbalanceamento devido a diferença de número de amostras dos Fornecedores e os efeitos de fatores não controlados. Para este objetivo foi utilizado software SAS do System Analysis Statistic Institute Inc.

O teste de Tukey foi desenvolvido para comparação de experimentos, onde um conjunto de médias verdadeiras iguais, ao nível de 5%, significa que 5% dos experimentos darão uma ou mais diferenças significativas falsas, enquanto 95% darão diferenças não-significativas, em média (MISCHAN, 1996)

O teste de Tukey é apropriado para comparações entre pares de médias, e pode ser aplicado aproximado a tratamentos com números de repetições diferentes, ou desbalanceados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados obtidos foram construídos gráficos para análise do comportamento da umidade e impurezas minerais do palhiço durante o período de estudo.

Na Figura 15 são apresentadas as umidades obtidas. Observa-se maior dispersão dos dados referentes ao segundo período de recebimento de palhiço. Períodos de recebimento de palhiço: de 30/04/09 a 10/12/09 e de 15/04/10 a 19/12/10. Período de entressafra de 22/12/09 a 14/04/10. Algumas datas foram destacadas no eixo horizontal como referências.

As Figuras 16 e 17 mostram as distribuições estatísticas dos dados separadas por período, que reforça a diferença entre os períodos destacando médias ($\bar{x}$) e coeficientes da variação (CV), sendo para 2009 média de $\bar{x} = 17,9\%$ com $CV = 62\%$; e para 2010 média de $\bar{x} = 12,1\%$ e $CV = 52\%$.

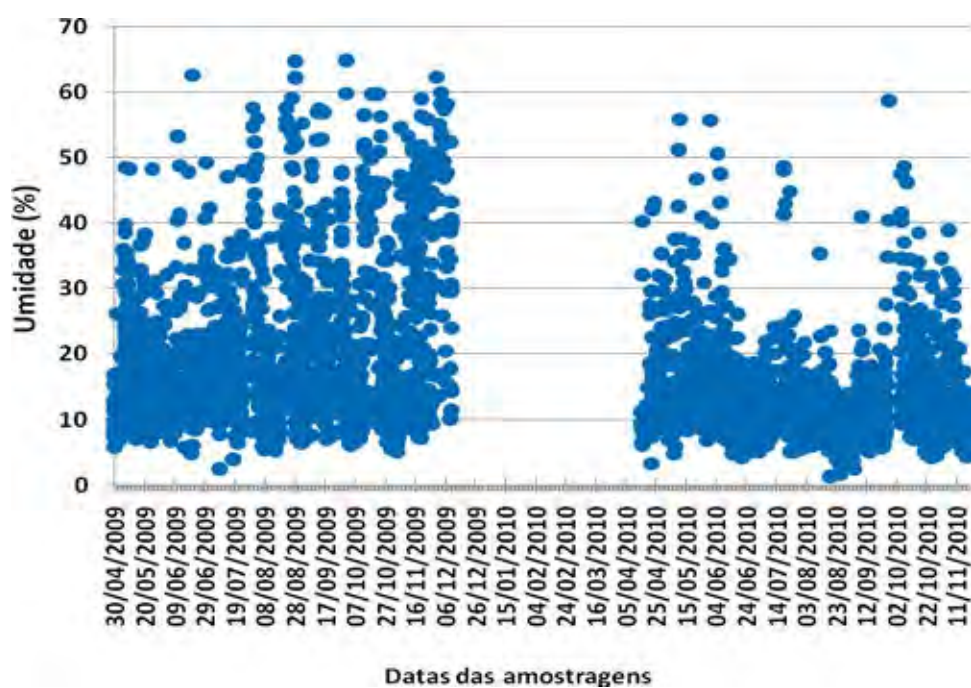


Figura 15 – Umidades do palhiço obtidas no período de recebimento na Indústria.

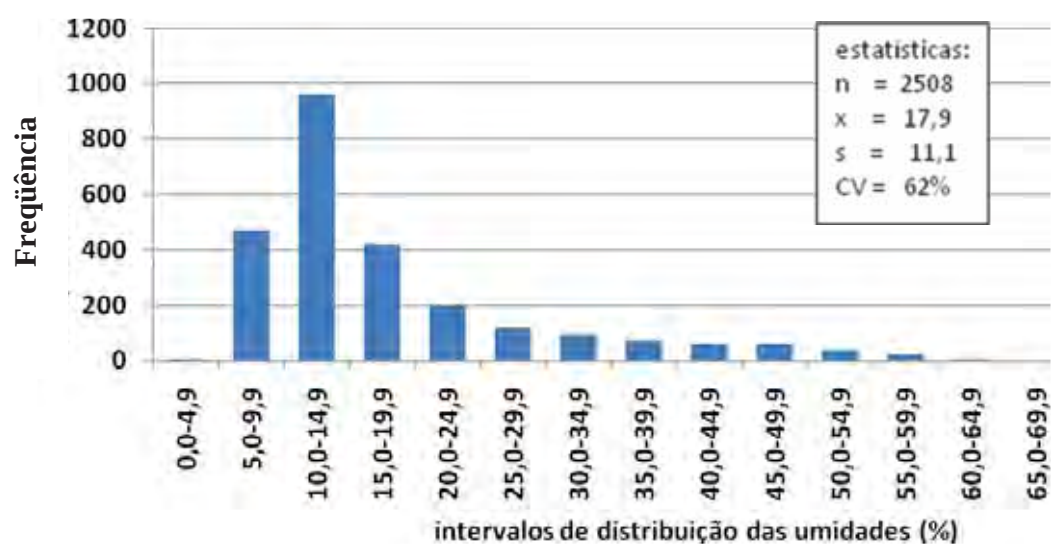


Figura 16 – Distribuição das umidades do palhiço recebido em 2009. (estatísticas: n = número de dados, x = média, s = desvio padrão, CV = coeficiente de variação)

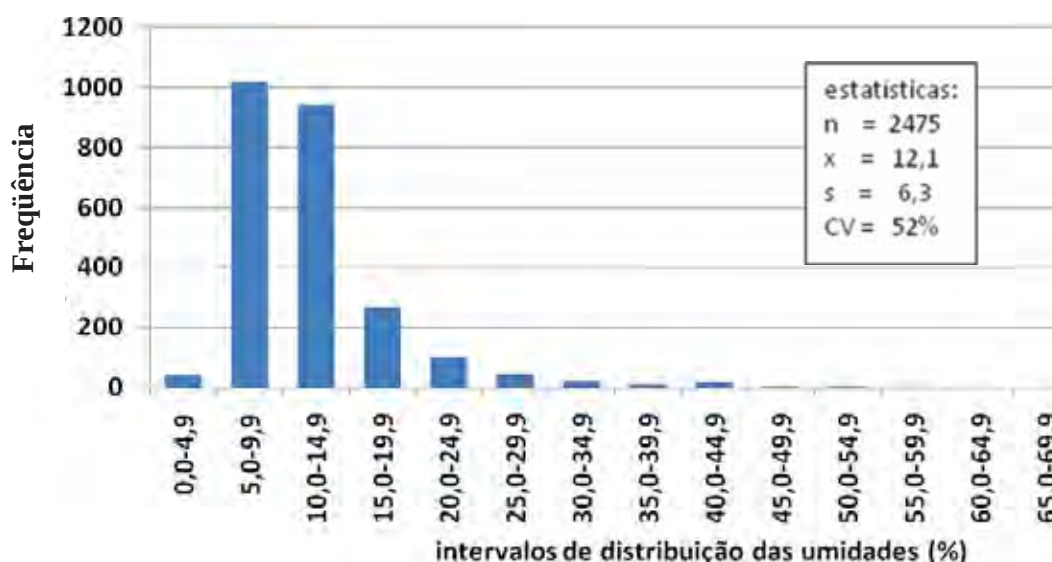


Figura 17 – Distribuição das umidades do palhço recebido em 2010. (estatísticas: n = número de dados, x = média, s = desvio padrão, CV = coeficiente de variação)

Na Figura 18 são apresentadas as impurezas minerais obtidas. Observa-se também uma dispersão maior no segundo período, no entanto visualmente menos trivial. Períodos de recebimento de palhço: de 30/04/09 a 10/12/09 e de 15/04/10 a 19/12/10. Período de entressafra de 22/12/09 a 14/04/10. Algumas datas foram destacadas como referências.

As Figuras 19 e 20 trazem as distribuições estatísticas dos dados separadas por período, destacando diferenças de médias e coeficientes de variação, para 2009 média de $x = 4,20\%$ com $CV = 61\%$; e para 2010 média de $x = 3,44\%$ com $CV = 70\%$.

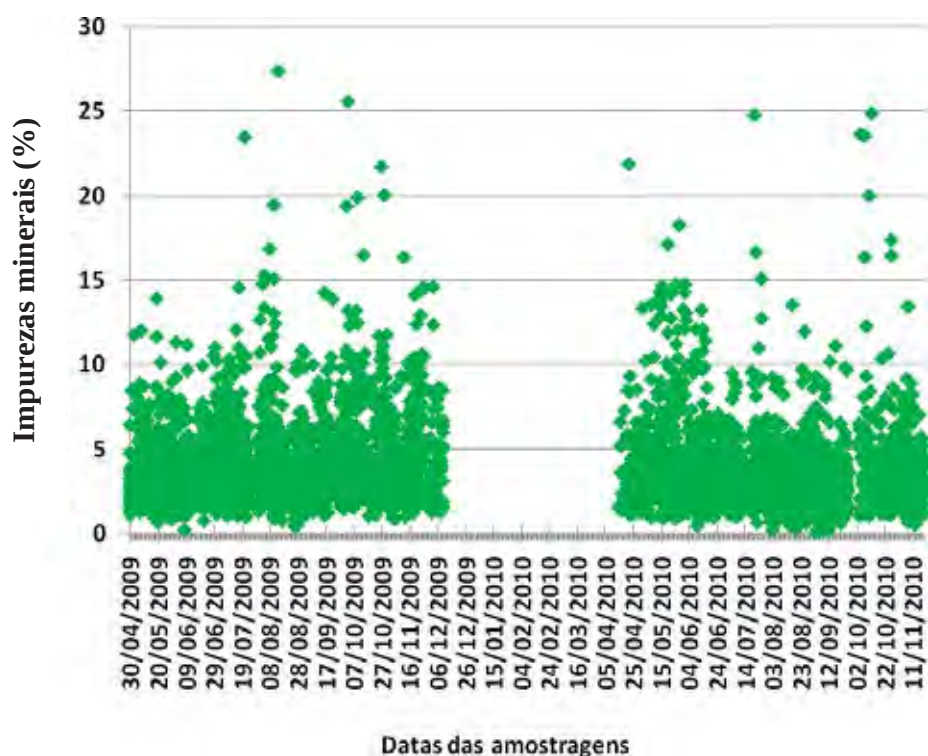


Figura 18 – Impurezas minerais do palhiço obtidas no período de recebimento na Indústria.



Figura 19 – Gráfico de distribuição das impurezas minerais do palhiço recebido em 2009.
 (estatísticas: n = número de dados, $\bar{x}$ = média, s = desvio padrão, CV = coeficiente de variação)

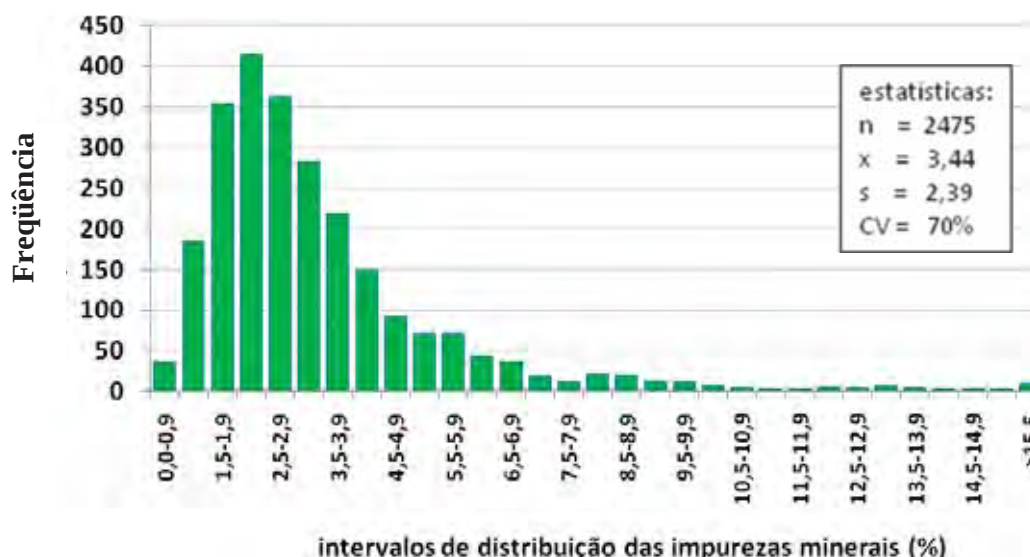


Figura 20 – Gráfico de distribuição das impurezas minerais do palhiço recebido em 2010. (estatísticas: n = número de dados, x = média, s = desvio padrão, CV = coeficiente de variação)

Nas Figuras 21 e 22 são apresentados históricos de índices pluviométricos referentes à região de cultivo dos fornecedores de palhiço para a indústria. Nestes históricos são relevantes os destaques dos anos de 2009 e 2010, sendo extremos dos últimos 16 anos. No ano de 2009 tem-se um pico de 1997 mm de precipitação, enquanto em 2010 tem-se um vale de 1085 mm de precipitação. Estas informações indicam correlação entre a precipitação e os resultados de umidade para os anos de 2009 (ano mais úmido e umidade do palhiço maior e mais dispersa) e 2010 (ano mais seco e umidade do palhiço menor e menos dispersa).

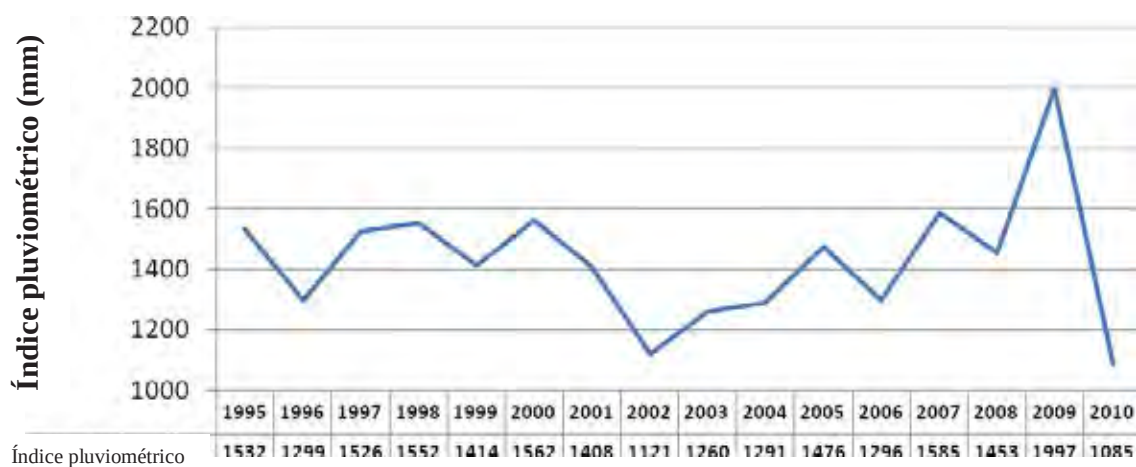


Figura 21 – Histórico de índice pluviométrico anual (mm) de 1995 a 2010 para a região referente aos fornecedores de palhço à indústria. Fonte: operação agrícola das usinas



Figura 22 – Histórico de índice pluviométrico mensal para os anos de 2009 e 2010, período de recebimento de palhço em estudo. Fonte: operação agrícola das usinas

Na Figura 23 os dados de umidade e impurezas minerais foram plotados buscando visualizar correlação entre ambas. Estatisticamente, a correlação é de baixa

relevância, indicada pelo baixo coeficiente de correlação $R^2 = 0,032$. Esta informação indica não haver correlação direta entre as duas variáveis, tendo que se considerar outros fatores.

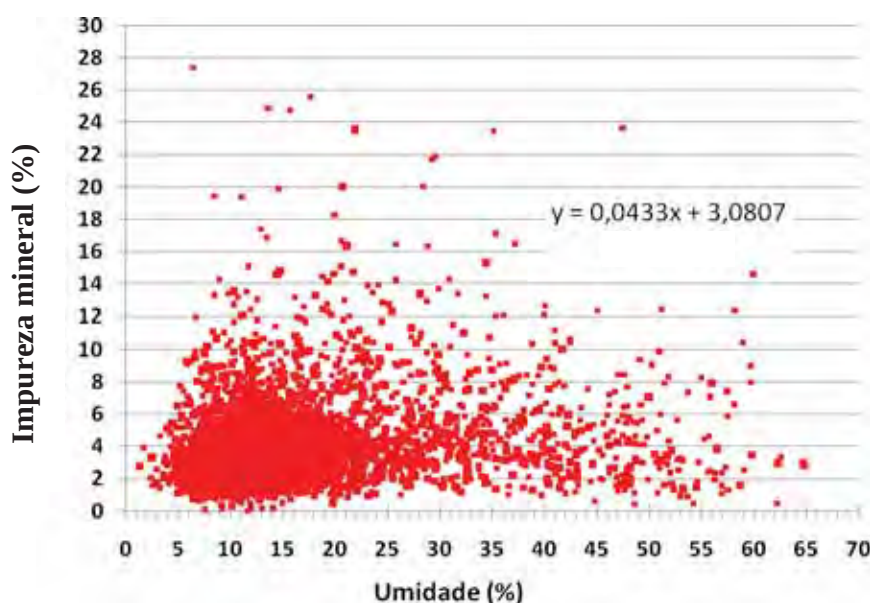


Figura 23 – Correlação linear entre Umidade e Impureza Mineral com $R^2 = 0,032$ indicando baixa relevância estatística.

Na Figura 24 são consideradas em gráfico as médias de umidade e impurezas minerais por fornecedor, cuja relevância em quantidade de palha entregue à indústria também é destacada. Da esquerda para a direita classificam-se os fornecedores por média de impureza mineral, do menor valor para o maior valor. Para Entregas relativas foram consideradas as quantidades de palhiço entregues pelos Fornecedores em relação ao total de palhiço recebido pela Indústria (rótulos de dados mais próximos ao eixo x).

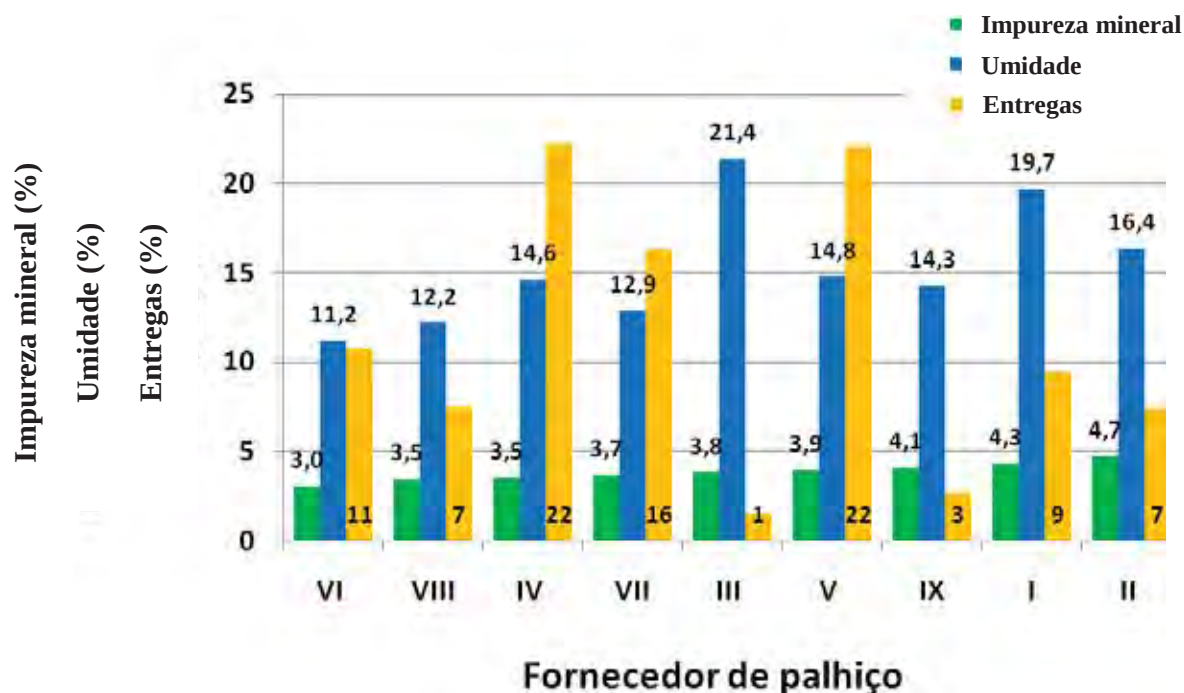


Figura 24 – Umidade média, Impureza Mineral média e Entregas (quantidade de palhico fornecido) relativas por Fornecedor.

Na Figura 24 são destaques os fornecedores: Fornecedor III, com a menor entrega (1%) e a umidade elevada (21,4%); Fornecedor I, embora com entrega significativa (9%) com umidade elevada (19,7%); Fornecedor IV, com desempenho melhor em relação à média, pois obteve impureza mineral baixa (3,5%) comparativamente aos demais com o mesmo nível de umidade (14,6%).

Na Figura 25 é obtida correlação entre médias de umidade e impureza mineral (cada ponto representa um fornecedor e suas médias). Observa-se $R^2 = 0,7775$ com aproximação de curva polinomial de quarto grau. Os pontos em destaque (pretos) são fornecedores que se destacaram: Fornecedor III, com a menor entrega (1%) e a umidade elevada (21,4%) entre os fornecedores; Fornecedor I, embora com entrega significativa (9%) com umidade elevada (19,7%); Fornecedor IV, com desempenho melhor em relação à média, pois obteve impureza mineral baixa (3,5%) comparativamente aos demais com o mesmo nível de umidade (14,6%).

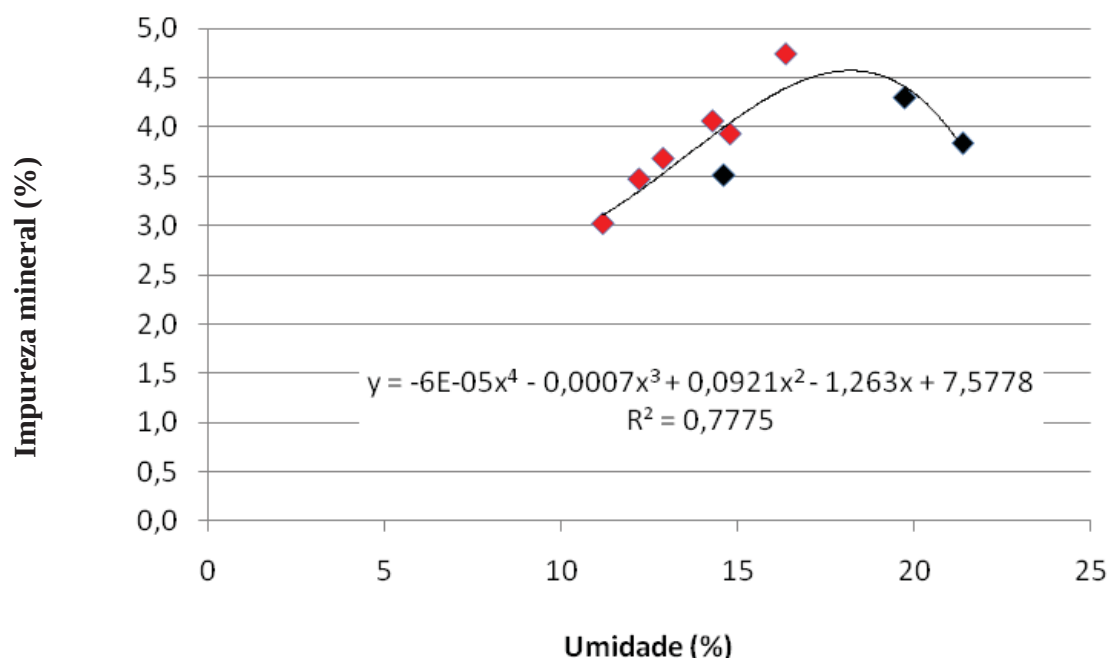


Figura 25 – Correlação entre Umidade média e Impureza Mineral média por Fornecedor.

Para comparação, a partir da eliminação dos Fornecedores III, I e IV, conforme destaques citados, buscou-se correlação entre as médias de impureza mineral e umidade do palhiço entregue na indústria, Figura 26. A correlação obtida inicialmente na Figura 25 foi uma curva polinomial de quarto grau e $R^2 = 0,7775$, enquanto a nova correlação da Figura 26 é linear com $R^2 = 0,9497$, com maior representatividade estatística. Portanto, desta análise foram excluídos os Fornecedores: Fornecedor III, com a menor entrega (1%) e a umidade elevada (21,4%) entre os fornecedores; Fornecedor I, embora com entrega significativa (9%) com umidade elevada (19,7%); Fornecedor IV, com desempenho excepcional à média, obteve impureza mineral baixa (3,5%) comparativamente aos demais com o mesmo nível de umidade (14,6%).

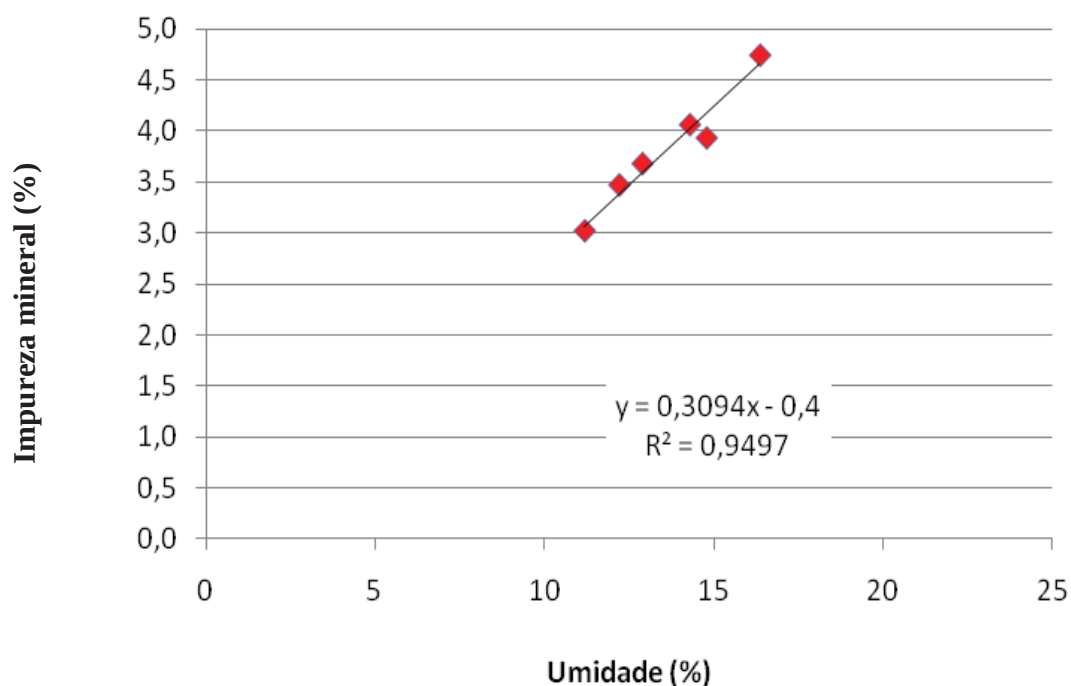


Figura 26 – Correlação ajustada entre Umidade média e Impureza Mineral média por Fornecedor (cada ponto representa um fornecedor e suas médias).

Devido às altas dispersões dos dados de umidade e impurezas minerais, com coeficientes de variação (CV) entre 52% e 70%, e as diferenças de médias entre fornecedores, foram realizadas análises de médias mensais dos fornecedores apresentadas pelas Figuras 27 a 35. As escalas dos gráficos foram mantidas fixas para melhor visualização das diferenças entre fornecedores.

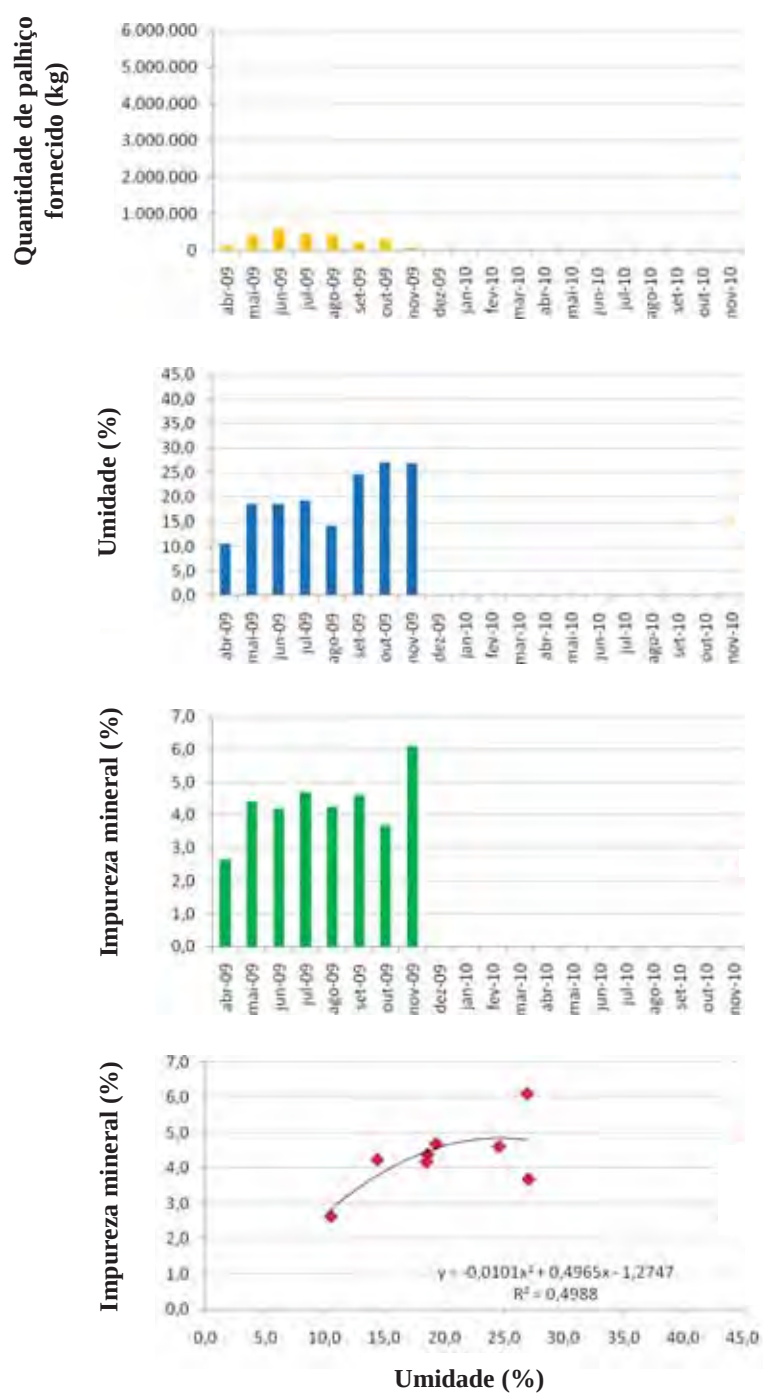


Figura 27 – Quantidade de palhicho fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor I

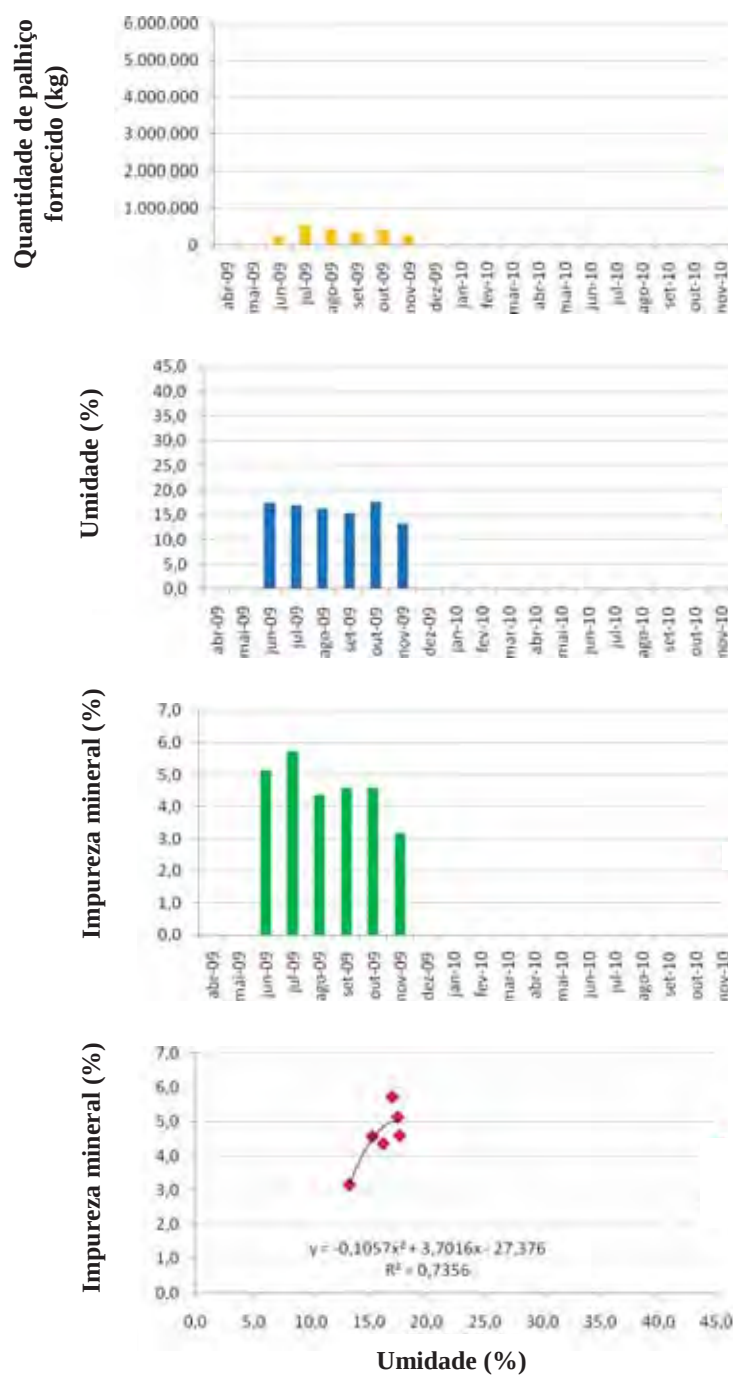


Figura 28 – Quantidade de palhico fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor II

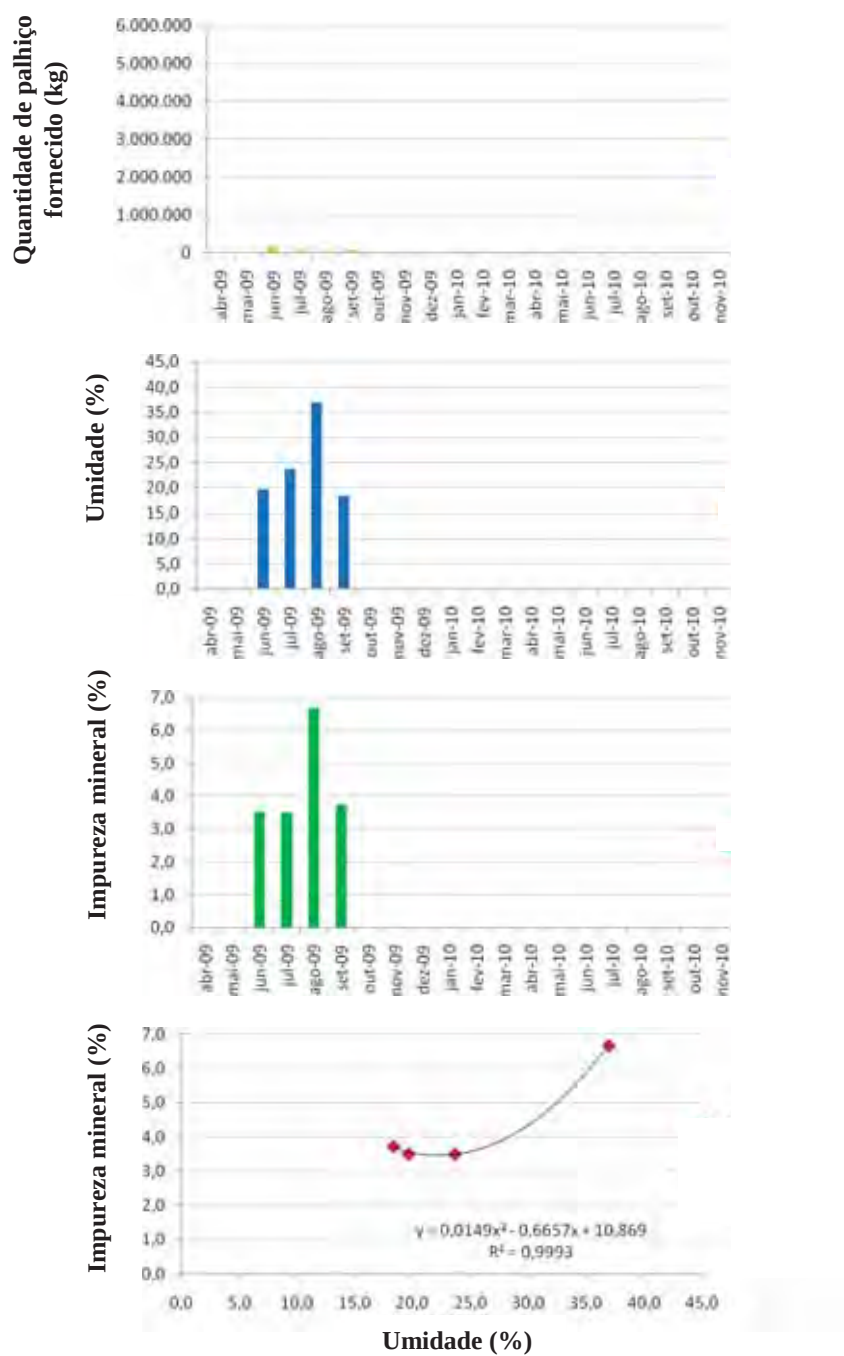


Figura 29 – Quantidade de palhicho fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor III

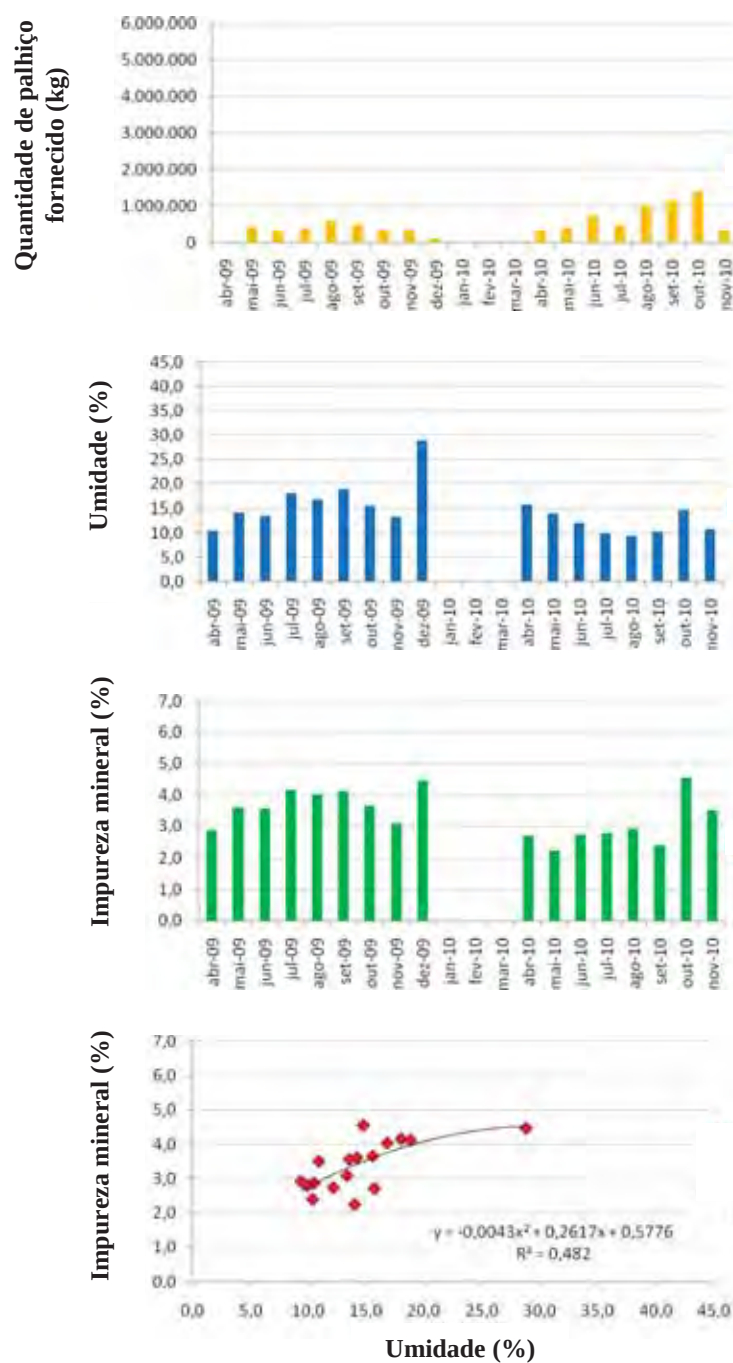


Figura 30 – Quantidade de palhico fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor IV.

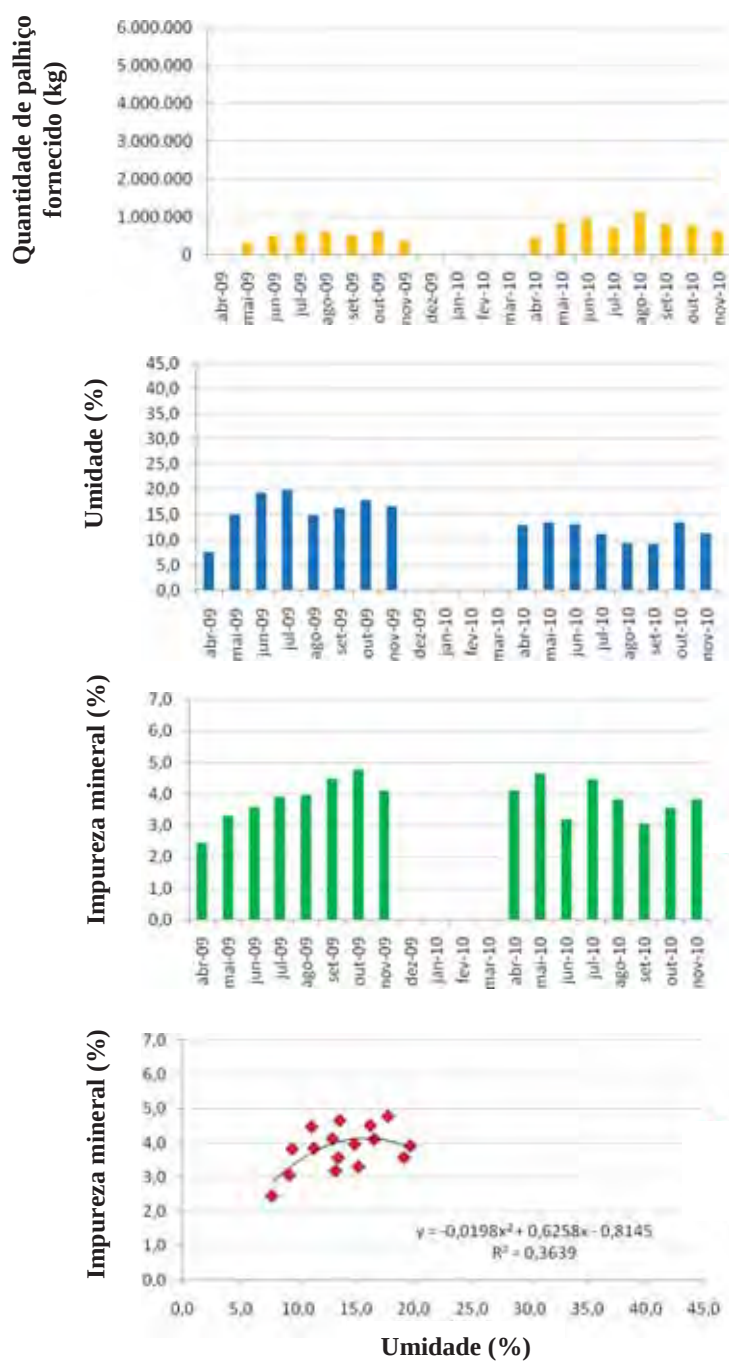


Figura 31 – Quantidade de palheiro fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor V.

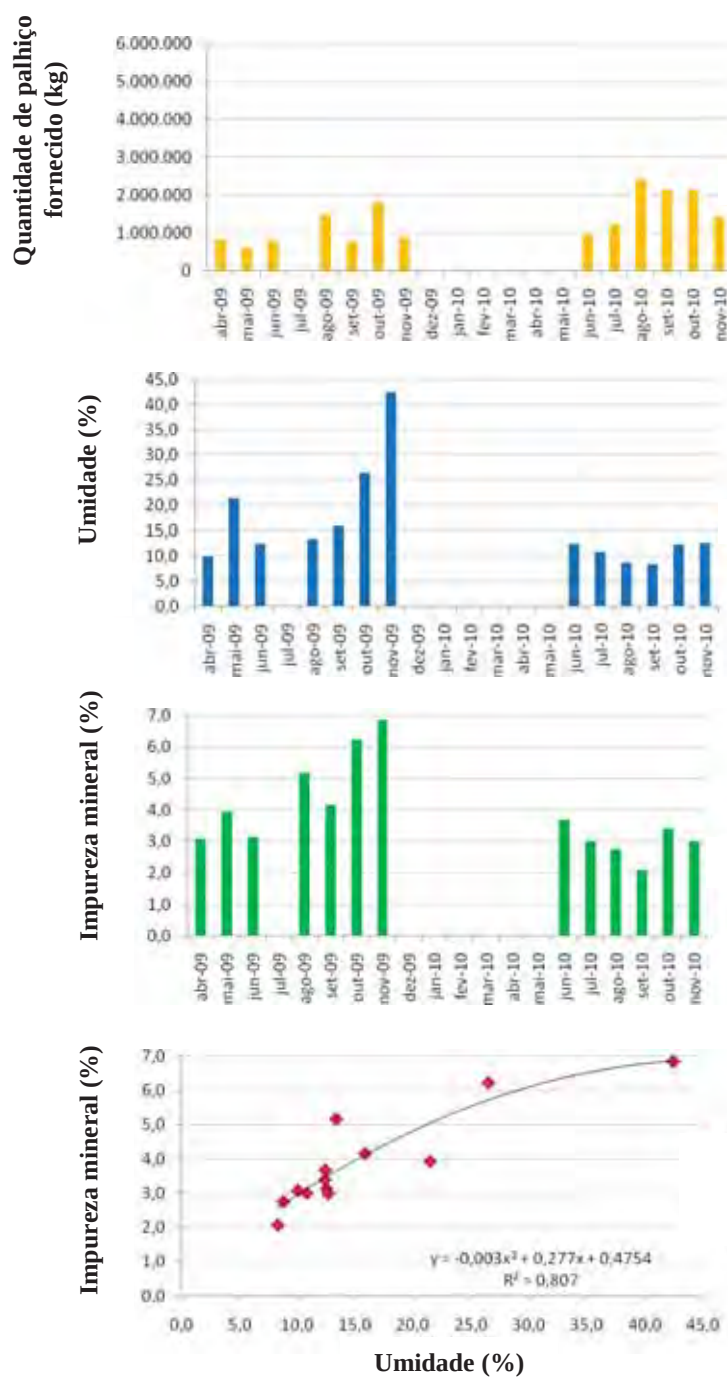


Figura 32 – Quantidade de palhicho fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor VI.

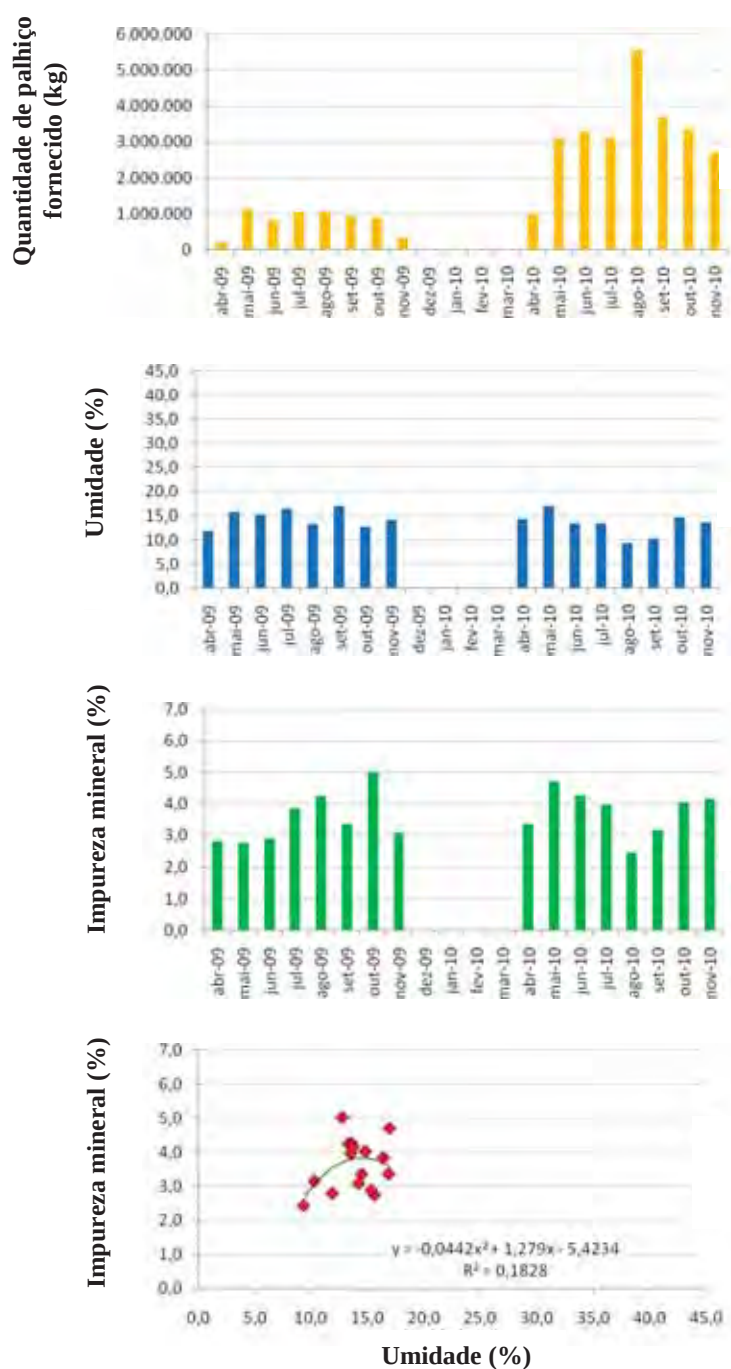


Figura 33 – Quantidade de palhicho fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor VII.

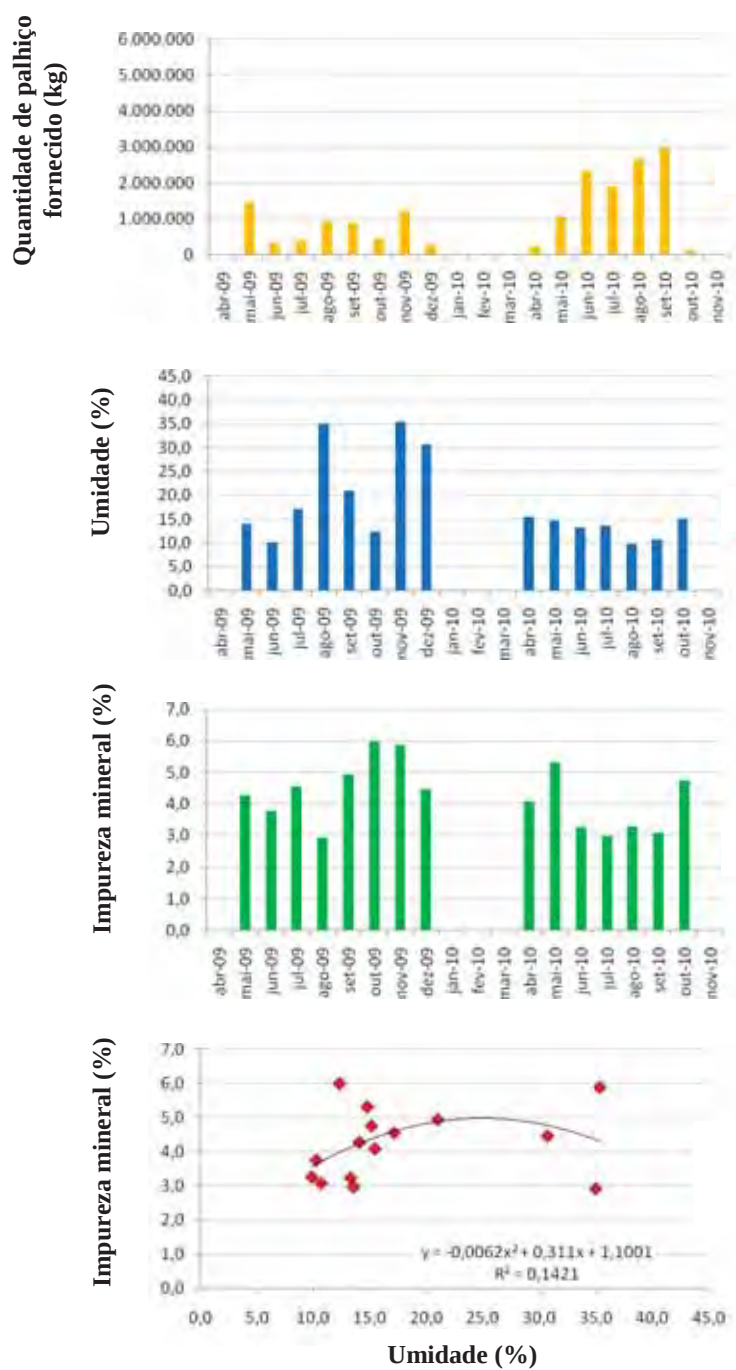


Figura 34 – Quantidade de palhicho fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor VIII.

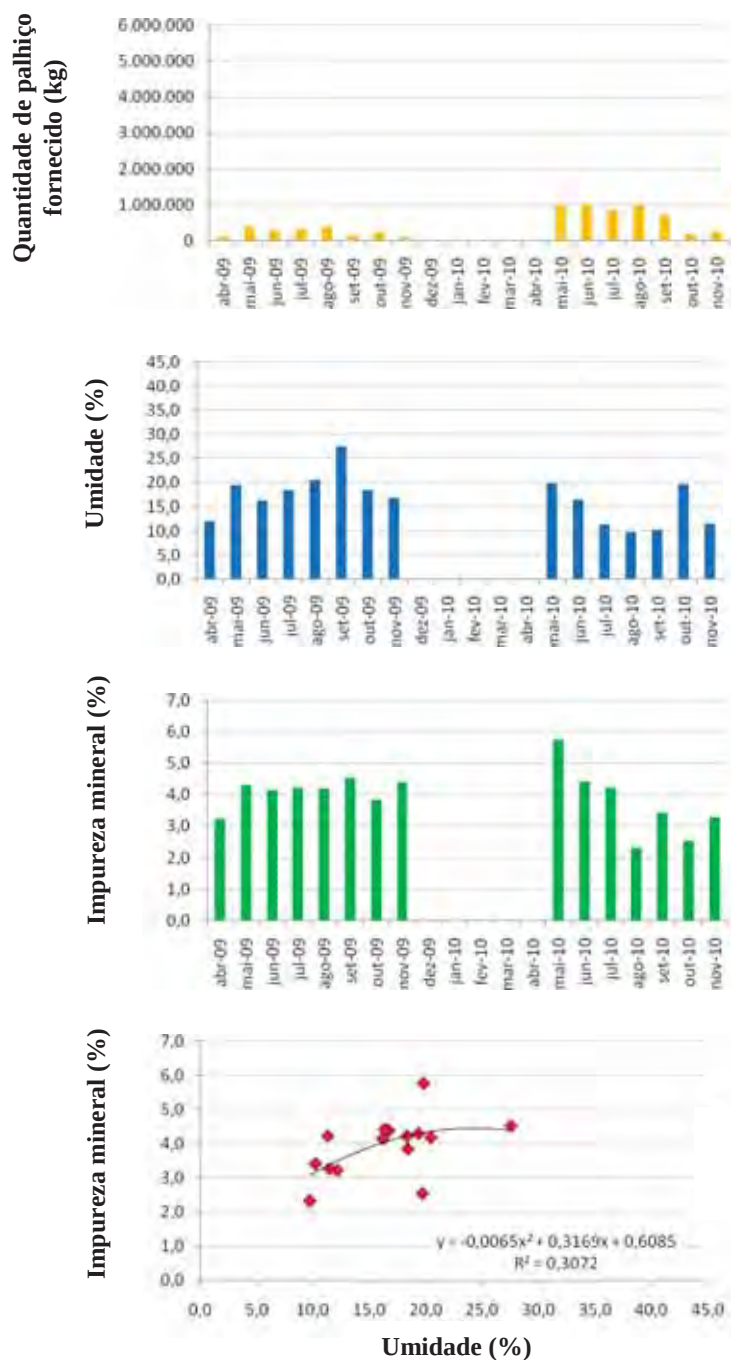


Figura 35 – Quantidade de palhicho fornecido, umidade, impureza mineral e correlação do Fornecedor IX.

Tabela 7 – Correlações entre médias mensais de umidade e impureza mineral por fornecedor

Fornecedor	Número de meses de fornecimento	Quantidade relativa de palhiço entregue (%)	Correlação (equação)
I	8	9	$y = -0,0101x^2 + 0,4965x - 1,2747$ $R^2 = 0,4988$
II	6	7	$y = -0,1057x^2 + 3,7016x - 27,376$ $R^2 = 0,7356$
III	4	1	$y = 0,0149x^2 - 0,6657x + 10,869$ $R^2 = 0,9993$
IV	17	22	$y = -0,0043x^2 + 0,2617x + 0,5776$ $R^2 = 0,482$
V	16	22	$y = -0,0198x^2 + 0,6258x - 0,8145$ $R^2 = 0,3639$
VI	13	11	$y = -0,003x^2 + 0,277x + 0,4754$ $R^2 = 0,807$
VII	16	16	$y = -0,0442x^2 + 1,279x - 5,4234$ $R^2 = 0,1828$
VIII	15	7	$y = -0,0062x^2 + 0,311x + 1,1001$ $R^2 = 0,1421$
IX	15	3	$y = -0,0065x^2 + 0,3169x + 0,6085$ $R^2 = 0,3072$

Resultados de análises estatísticas de comparação de médias através de teste de Tukey são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação de médias através de teste de Tukey *

UMIDADE					IMPUREZA MINERAL				
Grupos Tukey		Média (%)	Fornecedor		Grupos Tukey		Média (%)	Fornecedor	
	A	21,4	III			A	4,7	II	
	A	19,7	I		B	A	4,3	I	
	B	16,4	II		B	C	4,1	IX	
C	B	14,8	V		B	C	3,9	V	
C	B	D	14,6	IV	B	C	3,8	III	
C	B	D	14,3	IX	B	C	D	3,7	VII
C	E	D	12,9	VII		C	D	3,5	IV
	E	D	12,2	VIII		C	D	3,5	VIII
	E	11,2	VI			D	3,0	VI	

* grupos formados por mesma letra indicam médias com diferenças não-significativas para 95% de certeza.

7 CONCLUSÕES

Os resultados de umidade e impureza mineral dos fornecedores indicam diferenças significativas no processo de colheita do palhico da cana-de-açúcar de açúcar, que são influenciados por manejo, condição climática e solo.

A alta dispersão dos dados analisados, sem a distinção de fornecedores ou utilização de médias, impede a correlação entre as variáveis de umidade e impureza mineral ($R^2 = 0,032$). Entretanto, a utilização de médias de umidade e de impureza mineral dos fornecedores possibilitou a obtenção de correlação para os fornecimentos de palhico estudados ($R^2 = 0,9497$).

Considerando o efeito de aumento do poder calorífico inferior com a redução da umidade da biomassa, os resultados obtidos com a aplicação do teste de Tukey, com 95% de certeza de diferenças não-significativas, indicam desempenhos superiores em umidade para os Fornecedores VI (11,2%), VIII (12,2%) e VII (12,9%), representando 34% das entregas de palhico processado.

Considerando o efeito de redução da abrasividade e sujidade com a redução da impureza mineral, os resultados obtidos com a aplicação do teste de Tukey, com 95% de certeza de diferenças não-significativas, indicam desempenhos superiores em

impurezas minerais do palhiço para os Fornecedores VI (3,0%), VIII (3,5%), IV (3,5%) e VII (3,7%), representando 56% das entregas de palhiço processado.

O desenvolvimento de alternativas técnicas visando redução de custos com melhorias de produtividade e qualidade no manejo do palhiço é estratégico para atender à demanda crescente de biomassa para oportunidades de geração de energia elétrica no setor sucroenergético.

8 REFERÊNCIAS

BASTOS, V. D. **Etanol, alcoolquímica e biorrefinarias**. Rio de Janeiro: BNDES, 2007. 38 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Protocolo ambiental de 4 de junho de 2007**. São Paulo, 2007. Disponível em:
<<http://www.cetesb.sp.gov.br/resultadobusca.asp?cx=001112781003485509752%3Ay65emhcd9t0&cof=FORID%3A10&ie=UTF-8&q=protocolo+agroambiental&siteurl=www.cetesb.sp.gov.br%2F#930>>. Acesso em: 11 nov. 2010.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba, 2006, 112 p.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; AYARZA, J. A. C. Biomassa no Brasil e no mundo. In: _____. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 15-28.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da biomassa. In: _____. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 31-60.

EGGLESTON, G.; AMORIM, H. Reasons for the chemical destruction of sugar during the processing of sugarcane for raw sugar and fuel alcohol production. **International Sugar Journal**, Londres, v. 108, n. 1289, p. 275-281, May 2006.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 2. ed. Piracicaba: STAB, 2003. 240 p.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. 216 p.

HUGOT, E. **Handbook of cane sugar engineering**. New York: Elsevier, 1972. 1166 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2008**. Paris: 2008. 578 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2007**. Paris: 2007. 600 p.

JUNQUEIRA, L. C.; CARNEIRO, J. **Biologia celular e molecular**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2005. p. 259-260.

LEHNIGER, A. L. Fosforilação oxidativa e fotofosforilação. In: _____. **Princípios de bioquímica**. 2. ed. São Paulo: Sarvier, 1995. cap. 18, p. 404-438.

LEHNIGER, A. L. Biosíntese dos carboidratos. In: _____. **Princípios de bioquímica**. 2. ed. São Paulo: Sarvier, 1995. cap. 19, p. 444-473.

LEAL, M. R. L. V. et al. Produção de etanol em regiões semi-áridas. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 113-130.

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. **Experimentação agronômica, dados não-balanceados**. Botucatu: FUNDIBIO, 1996. cap. 3, p. 54-68.

MOHR, H.; SCHOPFER, P. **Plant physiology**. Nova York: Springer, 1995. 629 p.

PEREA, L. A. **Avaliação de sistemas de manejo do palhço de cana-de-açúcar no campo e na indústria**. 2009. 93 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

PERRY, R.; GREEN, DON W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 8th ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2007. chap. 24, p. 5.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. 728 p.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2. ed. Piracicaba: Edição dos Autores, 2007. 310 p.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Lei Estadual n. 11.241/02, de 19 de setembro de 2002. Disponível em:
<http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2010.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Decreto Estadual n. 47.700/03, de 11 de março de 2003. Disponível em:
<http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Decreto%20Estadual_47700_2003.pdf> . Acesso em: 11 nov. 2010.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Resolução SMA-35, de 11 de maio de 2010. Disponível em:
<<http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/Sigam2/Repositorio/24/Documentos/Resolu%c3%a7%c3%a3o%20SMA%20-%2035,%20de%2011-5-2010.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2010.

SOUZA, E. L. L.; MACEDO, I. C. (Coord.). **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010. 33 p.

STRYER, L. **Bioquímica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992. 881 p.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Dados e cotações, estatísticas, Disponível em: < <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 15 abr. 2010.