



AGROTEC
Revista Agropecuária Técnica
Since 1981

ISSN impresso 0100-7467 - ISSN online 2525-8990

AGRARIAN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Otimização dos parâmetros pH e Temperatura durante a Produção de Rapadura de Cana-de-Açúcar

Giovanni Sales¹; Guilherme Leandro Virgínio¹; Pedro Henrique Menezes¹; Normando Ribeiro-Filho¹

Resumo

A produção de rapadura representa uma importante atividade agroindustrial em regiões produtoras de cana-de-açúcar, particularmente em sistemas de pequena e média escala. Este estudo avaliou a caracterização físico-química do caldo de cana e a influência do pH e da temperatura na concentração de sólidos solúveis durante o processamento térmico para a produção de rapadura. O caldo de cana apresentou pH 5,50, teor de sólidos solúveis de 23 °Brix e acidez de 0,60 mg de ácido acético/100 mL, indicando condições adequadas para os processos de concentração e cristalização. Experimentos em escala laboratorial resultaram em um rendimento aproximado de 18% de rapadura. Um planejamento experimental fatorial e modelagem estatística foram aplicados para investigar a influência das variáveis do processo. Os resultados demonstraram que a temperatura e o pH afetam significativamente a concentração de sólidos solúveis durante o processamento. Um modelo linear apresentou bom ajuste para as condições ótimas de processamento (pH = 6 e temperatura de 107 a 110 °C), que promovem a estabilidade do processo e características de qualidade desejáveis do produto. Essas descobertas contribuem para o aprimoramento científico do processo e fornecem parâmetros relevantes para melhorar a eficiência e a padronização da produção de rapadura.

Palavras-chave: Rapadura; Caldo de cana-de-açúcar; Sólidos solúveis; Planejamento experimental; Processamento térmico.

Abstract

Jaggery production represents an important agro-industrial activity in sugarcane-producing regions, particularly in small and medium-scale systems. This study evaluated the physicochemical characterization of sugarcane juice and the influence of pH and temperature on soluble solids concentration during thermal processing for rapadura production. The sugarcane juice showed pH 5.50, soluble solids content of 23 °Brix, and acidity of 0.60 mg acetic acid/100 mL, indicating suitable conditions for concentration and crystallization processes. Laboratory-scale experiments resulted in an approximate yield of 18% jaggery production. A factorial experimental design and statistical modeling were applied to investigate the influence of process variables. The results demonstrated that temperature and pH significantly affect the concentration of soluble solids during processing. A linear model showed a good fit well for optimal processing conditions (pH = 6 and temperature from 107 to 110 °C), which promote process stability and desirable product quality characteristics. These findings contribute to the scientific improvement of the process and provide relevant parameters for improving the efficiency and standardization of rapadura production.

Key-words: Jaggery; Sugarcane juice; Soluble solids; Experimental design; Thermal processing.

Submetido em 31/01/2023;

¹Departamento de Solos e Engenharia Rural, DSER/CCA/UFPB – Bairro universitário, SN, CEP: 58.397-000, Areia-PB, Paraíba, Brasil

Email: normandofilho@cca.ufpb.br * (Autor correspondente)

Introdução

A rapadura é um produto tradicional obtido da cana-de-açúcar que possui relevante importância alimentar, cultural e socioeconômica em diversas regiões do mundo. Produzida pela concentração térmica do caldo de cana sem etapas de refino ou centrifugação, a rapadura preserva grande parte dos compostos naturais presentes na matéria-prima, incluindo açúcares, minerais e pequenas quantidades de vitaminas. Esse alimento é amplamente consumido em países da América Latina, África e Ásia, onde produtos açucarados não centrifugados desempenham papel importante na segurança alimentar e na oferta de energia de rápida assimilação (Zanten, 1996). Além do elevado valor energético, a rapadura apresenta teores consideráveis de minerais como ferro, cálcio, fósforo, potássio e magnésio, os quais contribuem para sua relevância nutricional quando comparada ao açúcar refinado (Coultate, 2004; Fennema, 2000). Em muitas regiões rurais do Brasil, especialmente no Nordeste, esse produto integra a alimentação cotidiana e programas institucionais de suplementação alimentar. Dessa forma, a rapadura destaca-se não apenas como alimento tradicional, mas também como importante componente da economia de pequenas agroindústrias ligadas ao setor canavieiro.

O processo de produção de rapadura baseia-se fundamentalmente na concentração térmica do caldo de cana seguida pela cristalização parcial dos sólidos solúveis presentes na solução açucarada. Inicialmente, o caldo extraído da cana-de-açúcar passa por etapas de filtração e clarificação, frequentemente realizadas com adição de hidróxido de cálcio, visando remover impurezas e melhorar a estabilidade do sistema (Castro & Andrade, 2007). Posteriormente, o caldo é submetido ao aquecimento progressivo, promovendo evaporação da água e aumento da concentração de sacarose até atingir condições de supersaturação, etapa essencial para o início da cristalização. Esse fenômeno envolve diferentes mecanismos físico-químicos, incluindo formação de supersaturação, nucleação primária ou secundária, adição de sementes cristalinas (seed) e crescimento cristalino controlado (Derenzo, 1994; Morales et al., 2024). Durante o crescimento, moléculas de sacarose depositam-se na superfície dos núcleos cristalinos, aumentando gradualmente o tamanho das partículas até atingir a chamada granagem, responsável pela textura característica do produto final (Castro et al., 2019). Assim, o controle adequado das etapas de cristalização é fundamental para garantir uniformidade estrutural e qualidade tecnológica da rapadura.

Entre os fatores operacionais que influenciam o processamento térmico do caldo de cana, destacam-se o pH e a temperatura, que exercem papel determinante na estabilidade dos carboidratos e na qualidade do produto final. A sacarose pode sofrer hidrólise em meio aquoso, especialmente sob condições ácidas e temperaturas elevadas, formando glicose e frutose por meio da reação conhecida como inversão da sacarose (Chen & Chou, 1993). Esses açúcares redutores podem interferir no processo de cristalização e favorecer reações secundárias, como caramelização e escurecimento não enzimático, afetando a cor e as características sensoriais da rapadura (Clarke & Edye, 1995; Bobbio & Bobbio, 1992). Além disso, a temperatura controla diretamente a taxa de evaporação da água e a formação da supersaturação necessária para a nucleação e crescimento dos cristais. Devido à interação simultânea dessas variáveis, métodos estatísticos multivariados têm sido amplamente empregados para compreender e otimizar processos industriais complexos. Nesse contexto, o planejamento fatorial experimental e a metodologia de superfície de resposta permitem avaliar os efeitos individuais e combinados dos fatores de processo e identificar condições operacionais ideais (Barros Neto et al., 2003; Reis, 1999). Dessa forma, a aplicação dessas ferramentas possibilita maior eficiência tecnológica e melhor controle do processo produtivo.

Apesar da relevância econômica e cultural da rapadura, grande parte de sua produção ainda é realizada de forma artesanal e empírica, com baixo nível de controle das variáveis de processamento e limitada aplicação de ferramentas científicas de otimização. Essa condição frequentemente resulta em variações na qualidade do produto, perdas de rendimento e dificuldade de padronização para atender mercados mais exigentes (Hamerski, 2009). Nesse contexto, estudos

voltados à compreensão dos fenômenos físico-químicos envolvidos no processamento da rapadura tornam-se essenciais para promover avanços tecnológicos no setor. O presente trabalho apresenta uma abordagem científica baseada em planejamento experimental e modelagem por superfície de resposta para investigar a influência das variáveis pH e temperatura durante o processamento térmico do caldo de cana. O objetivo da pesquisa foi avaliar as características físico-químicas do caldo de cana e determinar como o pH e a temperatura influenciam a concentração de sólidos solúveis durante a produção de rapadura. Os resultados obtidos podem contribuir para o aprimoramento tecnológico do processo, fornecendo subsídios para a modernização da produção e o fortalecimento de pequenas agroindústrias do setor sucroalimentar.

2. Metodologia

2.1. Local de realização do experimento

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Tecnologia de Produtos Agropecuários (LTPA), pertencente ao Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER) do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal da Paraíba, localizado no município de Areia, estado da Paraíba, Brasil. Esse laboratório possui infraestrutura adequada para análises físico-químicas e processamento experimental de derivados da cana-de-açúcar. Todas as etapas experimentais, incluindo a extração do caldo, caracterização físico-química, testes preliminares de produção de rapadura e execução do planejamento experimental, foram realizadas nesse ambiente controlado. O uso de instalações laboratoriais permitiu maior padronização das condições experimentais, garantindo maior confiabilidade na obtenção dos dados e minimizando interferências externas no processo de produção.

2.2 Caracterização do caldo de cana-de-açúcar

2.2.1 Extração do caldo

A matéria-prima utilizada neste estudo consistiu em cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), obtida em engenhos tradicionais do município de Areia, no estado da Paraíba. Após a colheita, os colmos foram transportados imediatamente ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Agropecuários para evitar processos de fermentação ou degradação da sacarose. A extração do caldo foi realizada utilizando uma **moenda manual modelo B120 Bx**, equipamento comumente empregado em pequenas unidades produtivas. Durante o processo, os colmos de cana foram submetidos à prensagem mecânica, promovendo a liberação do caldo. O líquido extraído foi coletado em recipientes plásticos previamente higienizados e imediatamente submetido às análises físico-químicas iniciais. Essa etapa foi fundamental para garantir a qualidade da amostra e preservar as características naturais do caldo antes das etapas subsequentes de processamento.

2.2.2 Determinação das propriedades físico-químicas

A caracterização físico-química do caldo de cana foi realizada por meio da determinação de parâmetros considerados essenciais para avaliar sua aptidão tecnológica na produção de rapadura. Foram analisadas as seguintes variáveis: sólidos solúveis (°Brix), temperatura, pH e acidez titulável. Essas propriedades são amplamente utilizadas na indústria sucroalcooleira para monitorar a qualidade do caldo e prever o comportamento do sistema durante o processo de concentração e cristalização dos açúcares. As análises foram realizadas imediatamente após a extração do caldo, a fim de evitar alterações na composição química decorrentes de fermentação ou reações enzimáticas. Todas as determinações seguiram metodologias padronizadas descritas por normas oficiais brasileiras, garantindo reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

2.2.3 Determinação de sólidos solúveis (°Brix)

O teor de sólidos solúveis totais foi determinado por leitura direta em refratômetro digital INSTRUTHERM modelo RT-280, equipamento amplamente utilizado para quantificação da concentração de açúcares em soluções alimentícias. Uma pequena alíquota do caldo foi depositada na superfície do prisma do equipamento, previamente calibrado com água destilada. A leitura foi expressa em graus Brix (°Brix), unidade que representa a porcentagem em massa de sólidos dissolvidos presentes na solução. O procedimento analítico foi realizado de acordo com a metodologia oficial descrita pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (Brasil, 2008). Esse parâmetro é fundamental para avaliar o potencial do caldo para processos de concentração e cristalização durante a produção de rapadura.

2.2.4 Determinação da temperatura

A temperatura do caldo recém-extraído foi determinada utilizando um termômetro infravermelho ICEL MANAUS modelo TD-950, com faixa de medição de -20°C a 275°C e resposta espectral entre 6 e 14 μm . O equipamento permite leituras rápidas e sem contato direto com o líquido, reduzindo riscos de contaminação da amostra. Durante a análise, o sensor foi direcionado para a superfície do caldo contido no recipiente plástico, sendo registrada a temperatura média da amostra. A determinação desse parâmetro é importante para monitorar as condições iniciais do caldo antes do processamento térmico, uma vez que variações de temperatura podem influenciar reações químicas e a estabilidade da sacarose.

2.2.5 Determinação do pH

O potencial hidrogeniônico (pH) do caldo de cana foi determinado por leitura direta utilizando um pHmetro digital TECNOPON modelo mPA-210p, previamente calibrado com soluções tampão padrão. Uma amostra do caldo foi transferida para um béquer de vidro e submetida à medição com o eletrodo imerso na solução. O procedimento analítico seguiu as recomendações metodológicas estabelecidas por Brasil (2008). O pH constitui um parâmetro crítico para o processamento do caldo, pois influencia diretamente a estabilidade da sacarose, a formação de açúcares redutores e a ocorrência de reações de escurecimento durante o aquecimento.

2.2.6 Determinação da acidez titulável

A acidez titulável do caldo de cana foi determinada por titulação ácido-base conforme metodologia descrita por Brasil (2008). Inicialmente, uma alíquota da amostra foi transferida para um erlenmeyer e titulada com solução padrão de hidróxido de sódio (NaOH) até atingir o ponto final da reação, indicado por mudança de coloração do indicador. Os resultados foram expressos em mg de ácido acético por 100 mL de caldo. A determinação da acidez é importante para avaliar o grau de estabilidade química do caldo, uma vez que valores elevados podem indicar início de fermentação ou degradação dos açúcares.

2.3 Teste preliminar de produção de rapadura

Antes da execução do planejamento experimental, foi realizado um teste preliminar de produção de rapadura em escala laboratorial no LTPA/CCA/UFPB. O objetivo desse ensaio foi reproduzir, em ambiente controlado, as condições de processamento tradicional utilizadas em engenhos da região, especificamente nos engenhos Monte Alegre e Bujary. Durante esse teste, o caldo de cana foi submetido ao aquecimento progressivo até atingir elevadas concentrações de sólidos solúveis, promovendo evaporação da água e formação da massa concentrada. Esse experimento inicial permitiu definir os procedimentos operacionais, ajustar os métodos analíticos e identificar possíveis fontes de erro experimental. Além disso, o teste preliminar contribuiu para estabelecer parâmetros de controle importantes, como faixa de temperatura de aquecimento, comportamento da concentração de sólidos solúveis e características finais da rapadura obtida.

2.4 Planejamento experimental

Para avaliar a influência das variáveis de processo na produção de rapadura, foi aplicada a metodologia de superfície de resposta (RSM – Response Surface Methodology) associada a um planejamento fatorial completo 2^2 . Esse planejamento experimental permitiu analisar simultaneamente os efeitos das variáveis independentes pH inicial do caldo e temperatura de processamento sobre a variável resposta concentração de sólidos solúveis ao final do processo.

O planejamento experimental foi composto por quatro pontos fatoriais, correspondentes aos níveis codificados -1 e $+1$, além de três pontos centrais (nível 0) utilizados para estimar o erro experimental e avaliar a reprodutibilidade do processo, totalizando sete ensaios experimentais. Os níveis das variáveis estudadas foram definidos da seguinte forma:

- pH inicial: 5,6 (-1), 6,0 (0) e 6,4 ($+1$)

- Temperatura: 95 °C (-1), 105 °C (0) e 115 °C ($+1$)

Os experimentos foram conduzidos de acordo com a matriz experimental estabelecida no planejamento fatorial. A análise estatística e o tratamento dos dados experimentais foram realizados utilizando o software STATISTICA for Windows versão 5.0, que permitiu gerar superfícies de resposta, curvas de contorno e modelos matemáticos representativos do processo.

2.5 Análise estatística (ANOVA)

A análise estatística dos resultados experimentais foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA), adotando nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Esse procedimento estatístico foi utilizado para avaliar a significância dos efeitos individuais das variáveis estudadas, bem como suas interações sobre a variável resposta. A ANOVA permitiu identificar quais fatores apresentaram influência significativa na concentração final de sólidos solúveis e verificar a adequação dos modelos matemáticos gerados. Esse método é amplamente utilizado em estudos de otimização de processos industriais, pois permite validar estatisticamente os resultados experimentais obtidos.

2.6 Validação dos modelos matemáticos

Os modelos matemáticos utilizados para descrever o processo foram obtidos a partir do ajuste de equações de regressão linear. A validação desses modelos foi realizada considerando diferentes critérios estatísticos e fenomenológicos. Entre os principais parâmetros avaliados destacam-se o coeficiente de determinação (R^2), o erro percentual ($P\%$), a significância estatística obtida pela ANOVA, bem como a análise das superfícies de resposta e curvas de contorno geradas pelo modelo. Além disso, foi realizada a interpretação dos gráficos de Pareto, que permitem identificar a magnitude e a relevância dos efeitos das variáveis independentes sobre a resposta do sistema. A combinação dessas ferramentas possibilitou verificar a capacidade dos modelos em representar adequadamente o comportamento do processo e prever condições ótimas para a produção de rapadura.

3. Resultados e discussão

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologia de Produtos Agropecuários (LTPA), pertencente ao Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER) do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). A matéria-prima utilizada foi cana-de-açúcar proveniente de engenhos do município de Areia-PB. O caldo foi extraído por meio de uma moenda manual e posteriormente acondicionado em recipientes plásticos para análise físico-química. Foram determinadas as propriedades de sólidos solúveis (°Brix), temperatura, pH e acidez utilizando refratômetro digital, termômetro infravermelho e pHmetro digital, conforme metodologias

padronizadas. Inicialmente, realizou-se um teste preliminar de fabricação de rapadura para definição dos parâmetros experimentais e métodos analíticos. Em seguida, aplicou-se um planejamento experimental fatorial, com três pontos centrais, totalizando sete ensaios, para avaliar a influência do pH inicial e da temperatura sobre a concentração final de sólidos solúveis. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA e os modelos matemáticos foram validados por coeficiente de determinação, erro percentual e análise das superfícies de resposta.

Caracterização do caldo de cana-de-açúcar. A caracterização físico-química do caldo de cana constitui etapa fundamental para avaliar sua viabilidade na produção de rapadura. Os resultados apresentados indicaram temperatura de 27,2 °C, pH de 5,50, teor de sólidos solúveis de 23 °Brix e acidez de 0,60 mg de ácido acético/100 mL, valores considerados típicos para canas provenientes da região do brejo paraibano (Tabela 1). Esse intervalo de pH, geralmente entre 5,3 e 5,8, aproxima-se do ponto de maior estabilidade da sacarose, favorecendo processos posteriores de concentração e cristalização (Tabela 1). Adicionalmente, níveis adequados de sólidos solúveis indicam elevada disponibilidade de açúcares fermentescíveis e cristalizáveis, o que contribui diretamente para o rendimento do produto final. Assim, os resultados obtidos demonstram que o caldo analisado apresenta condições adequadas para o processamento e obtenção de rapadura de qualidade.

Tabela 1 - Caracterização do Caldo de cana-de-açúcar

	Temperatura	pH	SS (°Brix)	Acidez
Caldo de cana-de-açúcar	27,2	5,5	23	0,60

SS – Sólidos Solúveis, pH – Potencial hidrogeniônico, Acidez - dada em mg de ácido acético /100 mL de caldo

Avaliação do rendimento do processo de produção de rapadura. A análise das condições iniciais e finais do processamento permitiu avaliar o rendimento do processo de produção de rapadura em escala laboratorial. A partir de 10 L de caldo contendo 23 °Brix e pH inicial de 5,50, obteve-se rendimento de aproximadamente 1,8 kg de rapadura, equivalente a 18% do volume processado (Tabela 2). Durante o aquecimento e a evaporação da água, ocorreu aumento da concentração de sólidos solúveis até 80 °Brix, condição necessária para a formação da estrutura característica do produto (Tabela 2). Esse comportamento evidencia a eficiência do processo de concentração térmica na remoção de água e na intensificação da matriz açucarada. Portanto, os resultados confirmam que o processamento empregado foi capaz de produzir rapadura com rendimento compatível com valores reportados para produções artesanais e laboratoriais.

Tabela 2 - Resultados do teste preliminar para produção de rapadura.

Condições iniciais do caldo				Condições finais do processo				
V caldo (L)	SS (°Brix)	pH	Acidez (mg de ácido acético/100 mL)	Rendimento Rapadura (kg)	Esborro (L)	pH rapadura	SS (°Brix)	H ₂ O Evaporada (L)
10	23	5,50	0,60	1,8	0,5	6,0	80	7,7

Influência do pH e da temperatura na concentração de sólidos solúveis. A avaliação do planejamento experimental demonstrou que as variáveis pH e temperatura exercem influência significativa na concentração final de sólidos solúveis durante a produção de rapadura. Nos ensaios realizados a 95 °C observou-se que pequenas variações de pH resultaram em alterações na concentração de açúcares, indicando sensibilidade do sistema às condições químicas do meio (Tabela 2). Em temperaturas mais elevadas, próximas de 115 °C, verificou-se que os sólidos solúveis atingiram valores máximos; porém, acompanhados de indícios de degradação dos açúcares

(Tabela 2). Esse fenômeno pode ser explicado pela ocorrência de reações térmicas que alteram a estrutura dos carboidratos presentes no caldo (Castro et al., 2019; Morales et al., 2024). Dessa forma, a correta combinação entre pH e temperatura torna-se essencial para otimizar a concentração de açúcares e evitar perdas de qualidade do produto.

Reações de escurecimento durante o processamento térmico. Durante o aquecimento do caldo de cana, diferentes reações químicas podem ocorrer, influenciando diretamente a coloração e as características sensoriais da rapadura. Entre essas reações destaca-se a caramelização, processo no qual açúcares são degradados pelo calor formando compostos voláteis e pigmentos escuros, amplamente utilizados como corantes alimentícios (Bobbio & Bobbio, 1992). Além disso, o escurecimento não enzimático pode ocorrer por meio da reação de Maillard, envolvendo a interação entre açúcares redutores e aminoácidos presentes na matriz alimentar (Castro et al., 2019; Morales et al., 2024; Fennema, 2000). Esses mecanismos são intensificados em condições de alta temperatura e tempo prolongado de aquecimento (Castro et al., 2019; Morales et al., 2024, Chen & Chou, 1993). Portanto, o controle rigoroso das condições térmicas durante o processamento é essencial para preservar a qualidade visual e sensorial da rapadura produzida.

Estabilidade dos carboidratos na região central do planejamento experimental. Nos ensaios correspondentes aos pontos centrais do planejamento experimental, nos quais o pH foi mantido em torno de 6,0 e a temperatura próxima de 105°C, observou-se estabilidade significativa nos resultados obtidos para sólidos solúveis, com valores médios de 74 % (Tabela 3). Essa repetibilidade sugere que essa faixa de condições promove maior estabilidade dos carboidratos cristalizáveis presentes no caldo de cana (Figura 1). Além disso, essa região de operação favorece a manutenção da coloração e da consistência desejadas para a rapadura, evitando escurecimento excessivo ou degradação térmica (Castro et al., 2019; Morales et al., 2024, Chen & Chou, 1993). A estabilidade observada indica que pequenas variações operacionais nessa faixa não comprometem significativamente o processo. Assim, o ponto central do planejamento experimental apresenta-se como uma condição promissora para a produção estável e padronizada de rapadura.

Tabela 3 - Resultados da Matriz do planejamento fatorial 2^2 com 3 pontos centrais.

Ensaios	pH	T	SS
1	5,6	95	22
2	6,4	95	24
3	5,6	115	100
4	6,4	115	100
5	6,0	105	74
6	6,0	105	74
7	6,0	105	74

T – temperatura (°C), SS – Sólidos Solúveis

Influência da temperatura no processo de concentração. A análise das superfícies de resposta revelou que a temperatura exerce papel determinante na concentração dos sólidos solúveis durante o processamento do caldo de cana (Tabela 3/Figura 1). Um aumento gradual da temperatura promove maior evaporação da água, resultando em aumento progressivo da concentração de açúcares no sistema (Hamerski, 2009; Castro et al., 2019; Morales et al., 2024). Vale salientar que temperaturas superiores a 110 °C podem desencadear reações de degradação térmica dos açúcares, formando compostos aromáticos e pigmentos escuros associados à caramelização (Castro et al., 2019; Coultate, 2004). Esse comportamento demonstra a existência de um limite térmico ideal para o processo (Tabela 3/Figura 1A). Portanto, o controle preciso da temperatura torna-se um fator crítico para maximizar a concentração de sólidos solúveis sem comprometer a qualidade do produto final.

Efeito do pH na degradação da sacarose e formação de compostos coloridos. O pH do meio também exerce influência significativa sobre a estabilidade da sacarose durante o processamento térmico do caldo de cana. Em condições alcalinas, a decomposição da sacarose pode resultar na formação de misturas complexas de compostos escuros e intensamente coloridos (Honig, 1953). A degradação da sacarose apresenta valores mínimos em faixas de pH de 6,5 a 8,5, enquanto a formação de cor pode ser reduzida em valores entre 4,4 e 7,0 (Hamerski, 2009; Castro et al., 2019; Morales et al., 2024). Nossos resultados demonstram a sensibilidade do sistema às variações do potencial hidrogeniônico, onde grandes variações de pH (de 5,6 a 6,4) não tem influencia significativa e tão pouco positiva sobre processo e a qualidade da rapadura (Figura 1A/Figura 1B). Em contraste, os testes com pH=6 indicam ser a melhor condição para produção e obtenção de rapadura de qualidade (Tabela 3/Figura 1). Assim, o controle adequado do pH durante o processamento é essencial para minimizar perdas de sacarose e garantir características visuais adequadas ao produto.

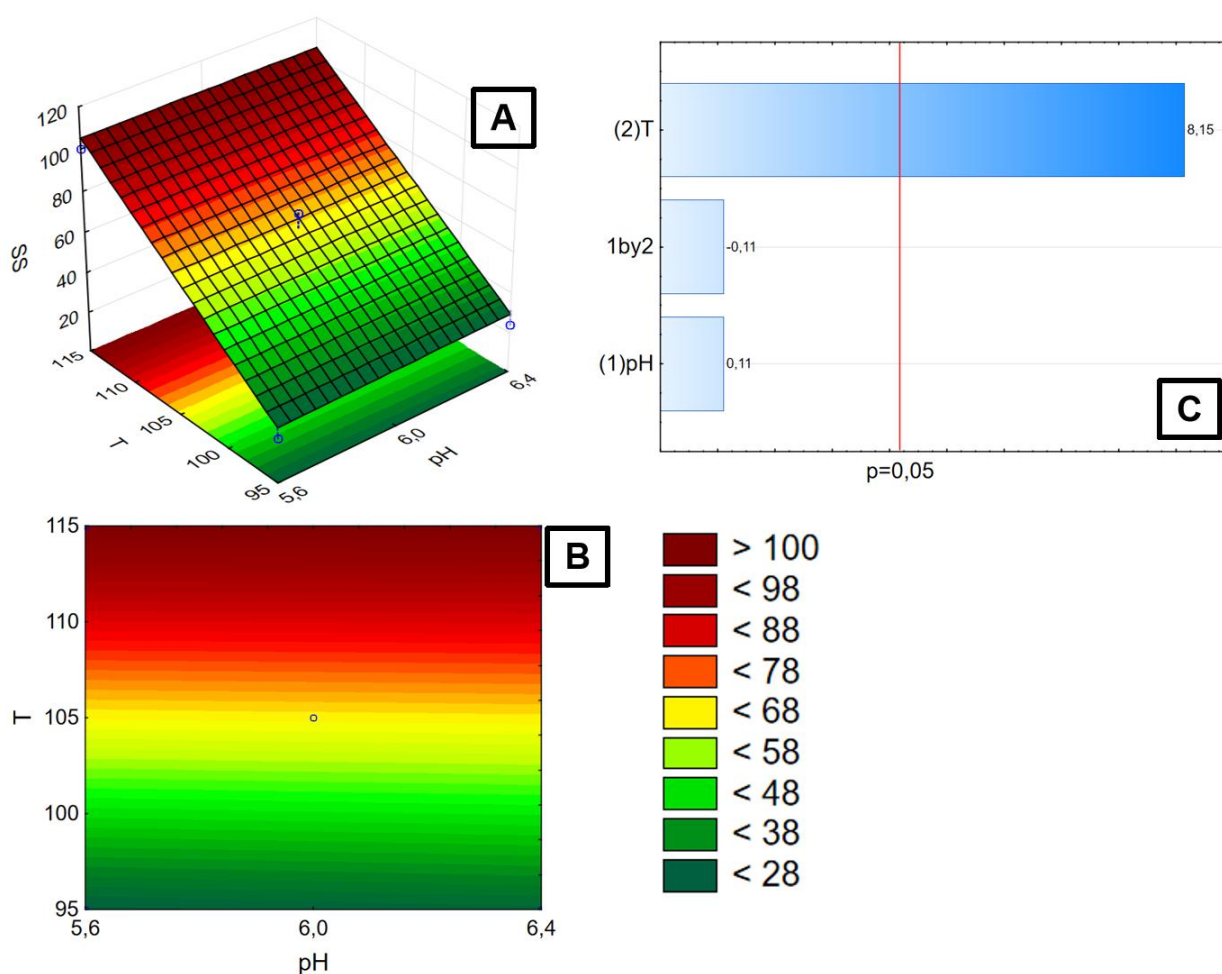


Figura 1: (A) Gráfico de Superfície de resposta, (B) Gráfico de curvas de contorno, e (C) Gráfico de Pareto para aplicação do Modelo linear.

Influência do pH na qualidade tecnológica do caldo de cana. Além de afetar a estabilidade da sacarose, o pH influencia diretamente a formação de compostos indesejáveis durante o processamento do caldo de cana (Castro et al., 2019; Morales et al., 2024). A presença de açúcares redutores pode favorecer a formação de ácidos orgânicos escuros quando submetidos a temperaturas próximas de 100 °C em meio alcalino (Souza, 1988; Oetterer et al., 2006; Castro & Andrade, 2007). Esses compostos contribuem para alterações de cor e possíveis perdas de qualidade do produto final.

(Morales et al., 2024; Chen & Chou, 1993). Dessa forma, o controle do pH torna-se um fator tecnológico essencial para a produção de açúcar quanto para produção da rapadura. A $\text{pH} < 6$, a rapadura fica mole; por outro lado, a $\text{pH} \geq 6,5$ a rapadura ficará escura. A correção do pH para regiões mais alcalinas (pH entre 6-6,4) diminui o processo de inversão da sacarose, resultado na diminuição a formação de açúcares redutores (glicose e frutose) e, conseqüentemente, facilitando a concentração dos sólidos solúveis. A porcentagem máxima de açúcar redutor para se obter uma rapadura de boa qualidade não deve ultrapassar dos 10% (Morales et al., 2024; Oetterer et al., 2006; Castro & Andrade, 2007). Poranto, durante a produção de rapadura, o caldo de cana-de-açúcar deve ter e manter o pH levemente ácido (pH de 6 a 6,4), favorecendo maior estabilidade da sacarose e reduzindo reações indesejáveis.

Tabela 4 - Modelos gerados com aplicação de equações linear e quadráticas com seus respectivos R^2 e Significância a nível de 5%.

Modelos	Equações	R^2	Significância (5%)	P (%)
Linear	$SS = -423,6 + 4,6 \times T + 10$	0,957	6,38	-3,97

Desempenho dos modelos matemáticos na previsão do processo. A análise estatística por meio do gráfico de Pareto evidenciou que o modelo linear apresentou predominância da temperatura como principal variável significativa, enquanto o pH e sua interação com a temperatura não apresentaram significância estatística ao nível de 5 % (Figura 1C). Os resultados obtidos neste estudo demonstram avanços relevantes na compreensão das condições ideais para a produção de rapadura a partir do caldo de cana-de-açúcar (Tabela 3/Figura 1). A caracterização inicial do caldo evidenciou composição adequada para processos de concentração e cristalização, destacando-se o teor de sólidos solúveis de 23 °Brix e pH próximo de 5,5, condições favoráveis à estabilidade da sacarose (Tabela 1). Os experimentos realizados confirmaram que a combinação entre temperatura e pH exerce influência decisiva na concentração final de sólidos solúveis e, conseqüentemente, na qualidade tecnológica do produto (Tabela 2/Tabela 3). A aplicação do modelo matemático apresentou coeficientes de determinação elevados, com valores de $R^2 > 0,99$ (Tabela 4). O modelo linear apresentou significancia e predição, indicando que as condições ótimas de processamento são pH 6,0 e temperaturas entre 107 à 110 °C, representando 78 à 92 °Brix, respectivamente. Porém, este modelo limita-se a prever o processo apenas na citadas condições ótimas, não sendo significativo e/ou preditivo para tomada de decisão em outras condições. Esse resultado indica que o processo apresenta natureza não linear, exigindo modelagens mais complexas para descrever adequadamente os fenômenos envolvidos.

Do ponto de vista industrial, os achados fornecem parâmetros operacionais que podem auxiliar na padronização do processo e na melhoria da eficiência produtiva de pequenos, médios e grandes unidades industriais. Esses resultados apresentam relevância científica ao contribuir para a compreensão dos fenômenos de concentração térmica e estabilidade dos açúcares durante o processamento. Entretanto, a pesquisa apresenta limitações relacionadas à escala laboratorial e ao número restrito de variáveis analisadas. Estudos futuros podem incluir aplicação de modelos não-lineares, análise sensorial, avaliação da composição nutricional e aplicação em escala piloto ou industrial.

4. Conclusão

Os resultados deste estudo demonstraram que a caracterização físico-química do caldo de cana-de-açúcar é essencial para determinar sua aptidão tecnológica na produção de rapadura. O caldo analisado apresentou condições adequadas de pH, acidez e teor de sólidos solúveis, favorecendo os

processos de concentração térmica e formação do produto final. O planejamento experimental evidenciou que as variáveis temperatura e pH influenciam significativamente a concentração de sólidos solúveis durante o processamento. O modelo linear ajustou-se bem, descrevendo as condições ótimas de processamento foram identificadas em pH próximo de 6,0 e temperaturas entre 107 e 110 °C, permitindo alcançar teores de sólidos solúveis compatíveis com os requisitos tecnológicos da rapadura. Os resultados contribuem para o aprimoramento científico do processo e fornecem parâmetros relevantes para a melhoria da eficiência e padronização da produção de rapadura.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Federal da Paraíba por disponibilizar sua infraestrutura e ao Engenheiros Bujary e Monte Alegre, ambos localizados na cidade de Areia na Paraíba, por fornecer a matéria prima para o estudo.

Referencias

- Barros Neto, B., Scarminio, I. S., & Bruns, R. E. (2003). **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp.
- Bobbio, F.O.; Bobbio, P.A. (1992). Química do processamento de alimentos. São Paulo : Livraria Varela.
- Brazil (2008) Métodos Físico-Químicos Para análises de alimentos. Ministério Da Saúde. Instituto Adolfo Lutz 2008(5):205–260
- Castro, S. B. De; Andrade, S. A. C. (2007). Tecnologia do Açúcar. Recife : Universitária UFPE.
- Castro, B. J. C., Junior, M. M., Giulietti, M. (in memoriam), Bernardo, A. (2019). Sucrose crystallization: modeling and evaluation of production responses to typical process fluctuations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36(3), 1237–1253. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190363s20180240>
- Chen, J. C. P., Chou, C. C. (1993). **Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists** (12th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Clarke, M. A., Edye, L. A. (1995). Sucrose decomposition in sugar processing systems. In: Honig, P. (Ed.), **Principles of Sugar Technology**. Amsterdam: Elsevier.
- Coulter, T.P. (2004). Alimentos: a química de seus componentes. 3ed. Porto Alegre : ARTMED.
- Derenzo, S. (1994). **Cristalização na indústria do açúcar: fundamentos e aplicações industriais**. São Paulo: STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil.
- Fennema, O. R. (2000). Química de los Alimentos. 2ed. Zaragoza : Acribia S.A.
- Hamerski, F. (2009). **Estudo do processo de produção de rapadura e avaliação de parâmetros tecnológicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Morales, H., di Sciascio, F., Aguirre-Zapata, E., & Amicarelli, A. (2024). Crystallization process in the sugar industry: A discussion on fundamentals, industrial practices, modeling, estimation and control. *Food Engineering Reviews*, 16, 441–469. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09377-3>
- Oetterer, M.; Reginato-D'Arce, M. A. B.; Spoto, M. H. F. (2006). Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos. Barueri : Manole.

- Reis, M. M. (1999). **Planejamento e análise de experimentos aplicados à engenharia química**. Campinas: Unicamp.
- Souza, J. (1988). Estudo da eficiência de alguns polieletrólitos utilizados na clarificação do caldo de cana. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Zanten, L. (1996). **Nutritional aspects of non-centrifugal sugar products**. International Sugar Journal, 98, 430–435.