



AVALIAÇÃO MULTIVARIADA DOS FATORES ASSOCIADOS À VARIAÇÃO DO PODER DE PREENCHIMENTO DO TABACO DURANTE O PROCESSAMENTO EM GLT

Maurilio Gustavo Nespeca¹

*1 British American Tobacco Brasil, Cachoeirinha, RS, Brasil
maurilio_gustavo_nespeca@bat.com*

Palavras-Chave: poder de preenchimento; análise multivariada; processo industrial.

Introdução

O poder de preenchimento é uma propriedade física relacionada à capacidade do tabaco de ocupar determinado volume após etapas controladas de condicionamento, compressão e expansão. Esse atributo apresenta relevância industrial por estar associado à eficiência de utilização da matéria-prima, à uniformidade do produto e à estabilidade do processo produtivo. Variações no poder de preenchimento podem, portanto, alterar a quantidade de tabaco necessária para atingir especificações definidas, tornando relevante a identificação dos fatores responsáveis por sua variabilidade.

O poder de preenchimento resulta da interação entre características da matéria-prima e condições de processamento, incluindo teor de umidade, composição química, características morfológicas e distribuição granulométrica. Consequentemente, sua investigação requer abordagens multivariadas capazes de avaliar simultaneamente a contribuição desses fatores. Embora estudos anteriores tenham demonstrado relações entre características físico-químicas do tabaco e suas propriedades físicas (YIN et al., 2015; MENG et al., 2024; PENG et al., 2022), a contribuição conjunta da matéria-prima e das diferentes etapas do processamento industrial para a variação do poder de preenchimento permanece pouco caracterizada.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo identificar os principais fatores associados à variação do poder de preenchimento do tabaco ao longo do processamento em uma Green Leaf Threshing Facility (GLT), considerando a contribuição das etapas de processo e das características físicas, químicas e de classificação da matéria-prima.

Material e Métodos

Foram acompanhados os mesmos lotes ao longo de cinco setores consecutivos do processo GLT, identificados como S1 a S5 e correspondentes às etapas de alimentação (S1), condicionamento (S2), debulha (S3), secagem (S4) e empacotamento (S5). Em cada setor, foram coletadas três amostras físicas do mesmo lote em pontos distintos do processo, analisadas individualmente pelos métodos de referência. Portanto, as triplicatas correspondem a replicatas reais de processo, e não a repetições analíticas da mesma amostra. A base de dados foi constituída por 149 conjuntos amostrais, totalizando 447 observações, todas tratadas como amostras independentes na modelagem. As amostras foram caracterizadas quanto à posição foliar, cor, maturidade e qualidade, possibilitando avaliar os efeitos associados à matéria-prima e às etapas do processamento.

O poder de preenchimento foi determinado a partir de uma massa fixa de tabaco submetida a compressão e expansão sob condições controladas, seguida da medição do volume final ocupado pelo material. Os resultados foram expressos em cm³/10 g. Antes das análises multivariadas, as variáveis foram autoescaladas para reduzir a influência das diferentes magnitudes e unidades de medida.



Inicialmente, matrizes de correlação foram utilizadas para investigar associações entre setor de processamento, variáveis químicas, atributos de grade e poder de preenchimento. A análise de agrupamento hierárquico (HCA) foi aplicada às variáveis umidade, nicotina, açúcar e poder de preenchimento, utilizando o método de Ward como critério de ligação.

Os modelos de regressão linear múltipla (MLR) foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (Ordinary Least Squares, OLS), com o objetivo de minimizar a soma dos quadrados dos resíduos. O diagnóstico do modelo foi realizado pelos valores de R^2 e pela estatística F, empregada para avaliar a significância global da regressão. O modelo foi utilizado para quantificar a contribuição conjunta de setor, atributos de grade, umidade e teor de açúcar para a variação do poder de preenchimento e para simular diferentes condições de matéria-prima e processamento.

Como abordagem complementar, o perfil químico foi determinado por injeção em fluxo acoplada à espectrometria de massas de alta resolução (FIA-HRMS), conforme a abordagem descrita por Kaiser et al. (2018). Os sinais massa/carga foram atribuídos a compostos conhecidos do tabaco e agrupados em classes químicas, incluindo aminoácidos, polifenóis, carotenoides, diterpenos, ácidos graxos e compostos de Amadori. A relação entre o perfil químico e o poder de preenchimento foi investigada por regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). O número de variáveis latentes foi selecionado pelo menor erro quadrático médio de validação cruzada (RMSECV), utilizando validação Venetian Blinds com sete divisões. A contribuição das variáveis foi avaliada pelos valores de Importância da Variável na Projeção (VIP). Um segundo modelo PLS, com o mesmo procedimento de validação, foi desenvolvido a partir das frações granulométricas obtidas por peneiramento.

Resultados e Discussão

Os resultados demonstraram redução progressiva do poder de preenchimento entre S1 e S5. Como os mesmos lotes foram acompanhados ao longo do processo, essa variação permitiu avaliar as alterações ocorridas entre as etapas do GLT. As principais reduções foram observadas nas transições S3-S4 e S4-S5, com valores médios de 9,31% e 13,43%, respectivamente. Esses resultados indicam que as etapas finais apresentam maior contribuição para a perda de potencial volumétrico e constituem pontos prioritários para investigação de condições operacionais relacionadas à preservação do poder de preenchimento.

A HCA, realizada a partir das variáveis açúcar, nicotina, umidade e poder de preenchimento, evidenciou uma organização das amostras predominantemente associada aos setores S3 e S4. Esse comportamento mostra uma diferenciação multivariada nessas etapas e reforça que a transição entre S3 e S4 está associada a alterações simultâneas nas características físico-químicas e no poder de preenchimento.

O modelo MLR integrou variáveis de processo, grade e composição química em uma mesma estrutura e apresentou significância global ($R^2 = 0,45$; $p = 1,93 \times 10^{-51}$, teste F), indicando que os fatores avaliados explicaram aproximadamente 45% da variabilidade do poder de preenchimento. Como cerca de 55% da variabilidade permaneceu não explicada, o modelo possui maior utilidade para interpretação sobre a relação dos fatores de processo e matéria-prima com o poder de preenchimento. Além do setor, os atributos de grade contribuíram para diferenciar amostras com maior e menor potencial volumétrico. Posição foliar e qualidade apresentaram os maiores efeitos relativos, seguidas por maturidade e cor, sendo posição foliar, qualidade e maturidade estatisticamente significativas.



O teor de açúcar apresentou associação inversa com o poder de preenchimento, com maiores valores da resposta em amostras com menores concentrações de açúcar. Essa relação pode estar associada à influência de açúcares e outros constituintes solúveis sobre a higroscopicidade e a retenção de água na matriz vegetal (YIN et al., 2015).

A caracterização por HRMS identificou grupos químicos com VIP superior a 1 no modelo PLS, destacando-se aminoácidos, carotenoides, polifenóis, compostos de Amadori, produtos de oxidação de carotenoides e açúcares. A contribuição dessas classes é consistente com transformações relacionadas à maturação e à cura da folha, incluindo metabolismo de carboidratos, degradação de pigmentos, transformação de compostos fenólicos e reações de escurecimento (MENG et al., 2024; PENG et al., 2022).

O modelo PLS baseado nas frações granulométricas apresentou capacidade preditiva limitada ($R^2CV = 0,21$; erro relativo = 22%). Entretanto, as frações entre $>1/8''$ e $<1/2''$ apresentaram VIP superior a 1 e associação positiva com o poder de preenchimento. Assim, a granulometria contribuiu de forma complementar para a interpretação da resposta, mas não foi suficiente, isoladamente, para explicar ou predizer adequadamente sua variação.

De forma integrada, os resultados demonstram que o poder de preenchimento é uma propriedade multifatorial, associada às diferentes etapas do processamento e às características físicas e químicas da matéria-prima. O setor de processamento apresentou a associação mais consistente com a redução da resposta, enquanto atributos de grade, composição química e granulometria contribuíram para modular sua magnitude. A **Tabela 1** sintetiza as principais evidências obtidas pelas diferentes abordagens multivariadas e suas respectivas implicações para a interpretação e o controle do poder de preenchimento.

Tabela 1. Síntese dos principais fatores associados à variação do poder de preenchimento e suas implicações para o processo.

Fator	Evidência no estudo	Implicação para controle
Setor de processamento	Redução progressiva do poder de preenchimento entre S1 e S5.	S4 e S5 representam etapas prioritárias para investigação e otimização.
Umidade e açúcar	Menores teores associados a maior poder de preenchimento	Condição físico-química da matéria-prima contribui para a variabilidade da resposta.
Classe de tabaco	Efeito relativo: posição $\approx$ qualidade $>$ maturidade $>$ cor.	Seleção e balanceamento de classes podem contribuir para reduzir a variabilidade entre lotes.
Perfil químico (HRMS)	Aminoácidos, açúcares, carotenoides, polifenóis, compostos de Amadori e produtos de oxidação de carotenoides associados à resposta.	Evidencia a contribuição conjunta da composição química e do estado fisiológico da folha.
Granulometria	Modelo PLS com baixa capacidade preditiva ($R^2CV = 0,21$; erro relativo = 22%), porém frações entre $>1/8''$ e $<1/2''$ apresentaram VIP > 1 e associação positiva com a resposta	O tamanho de partícula atua como fator complementar, devendo ser considerado em conjunto com variáveis químicas e de processo



Conclusões

A variação do poder de preenchimento esteve predominantemente associada ao avanço do processamento GLT, com as maiores reduções observadas nas etapas finais, particularmente entre S3–S4 e S4–S5. Entretanto, características da matéria-prima também contribuíram significativamente para a resposta, destacando-se posição foliar, qualidade e maturidade, além de variáveis físico-químicas como umidade e teor de açúcar.

A caracterização por HRMS evidenciou a contribuição de diferentes classes químicas, incluindo aminoácidos, carotenoides, polifenóis, compostos de Amadori, produtos de oxidação de carotenoides e açúcares, reforçando a natureza multifatorial do poder de preenchimento. A granulometria apresentou contribuição complementar, embora o modelo baseado exclusivamente nessas variáveis tenha apresentado baixa capacidade preditiva.

O modelo MLR permitiu integrar fatores relacionados ao processo, à classificação e à composição da matéria-prima, apresentando potencial como ferramenta para simulação de cenários. Em conjunto, os resultados indicam que estratégias para preservação do poder de preenchimento devem considerar tanto a otimização das etapas finais do processamento quanto o controle das características físico-químicas e o balanceamento das classes de tabaco.

Agradecimentos

Agradecemos às equipes de Central Blending, Qualidade, ATEC, e Discovery Labs pelo suporte nas discussões, coleta das amostras, análises laboratoriais e organização dos dados.

Referências

KAISER, S.; DIAS, J. C.; ARDILA, J. A.; SOARES, F. L. F.; MARCELO, M. C. A.; PORTE, L. M. F.; GONÇALVES, C.; CANOVA, L. D. S.; PONTES, O. F. S.; SABIN, G. P. High-throughput simultaneous quantitation of multi-analytes in tobacco by flow injection coupled to high-resolution mass spectrometry. *Talanta*, 190, 363-374, 2018. DOI: 10.1016/j.talanta.2018.08.007.

MENG, Y.; XU, Q.; CHEN, G.; LIU, J.; ZHOU, S.; ZHANG, Y.; WANG, A.; WANG, J.; YAN, D.; CAI, X.; CHEN, X.; LI, Q.; ZENG, Q.; GUO, W.; WANG, Y. Regression prediction of tobacco chemical components during curing based on color quantification and machine learning. *Scientific Reports*, 14, 27080, 2024.

PENG, Y.; BI, Y.; DAI, L.; LIAO, F.; ZHANG, K.; SHEN, Y.; DU, F.; WANG, H. Quantitative Analysis of Routine Chemical Constituents of Tobacco Based on Thermogravimetric Analysis. *ACS Omega*, 7, 26407-26415, 2022.

YIN, C.; XU, Z.; SHU, J.; LI, Y.; SUN, W.; ZHOU, Z.; CHEN, M.; ZHONG, F. Influence of Physicochemical Characteristics on the Effective Moisture Diffusivity in Tobacco. *International Journal of Food Properties*, 18, 690-698, 2015.