

## CARACTERIZAÇÃO DAS ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DO EXOCARPO E ENDOCARPO DE CAFÉ ARÁBICA

Pedro Damasceno de Oliveira<sup>1</sup>; Eder Pedroza Isquierdo<sup>2</sup>; Fabiana Carmanini Ribeiro<sup>3</sup>; Luiza Pereira Figueiredo<sup>4</sup>; Juliana Neves Barbosa<sup>5</sup>, Flávio Meira Borém<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Agrícola, DEG-UFLA, Lavras-MG, [damascenoeng@yahoo.com.br](mailto:damascenoeng@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Doutorando em Ciência dos Alimentos, DCA-UFLA, Lavras-MG, [ederisquierdo@hotmail.com](mailto:ederisquierdo@hotmail.com)

<sup>3</sup> Mestranda em Engenharia Agrícola, DEG-UFLA, Lavras-MG, [fabianacarmanini@yahoo.com.br](mailto:fabianacarmanini@yahoo.com.br)

<sup>4</sup> Mestranda em Ciências dos Alimentos, DCA-UFLA, Lavras-MG, [lupefi@gmail.com](mailto:lupefi@gmail.com)

<sup>5</sup> Doutoranda em Ciências dos Alimentos, DBI-UFLA, Lavras-MG, [juliananevesbarbosa@gmail.com](mailto:juliananevesbarbosa@gmail.com)

<sup>6</sup> Professor Dr., Departamento de Engenharia, DEG-UFLA, Lavras-MG, [flavioborem@ufla.br](mailto:flavioborem@ufla.br)

**RESUMO:** Objetivou-se no presente trabalho, determinar as curvas de umidade de equilíbrio de dessecção, e selecionar os modelos matemáticos que mais se ajustem ao comportamento dos exocarpos (casca) e endocarpos (pergaminho) de café arábica. Os exocarpos e endocarpos de café, armazenado por um período de um ano, foram embebidos em água durante uma hora. Após esse período foram deixados expostos ao ar ambiente em uma peneira por um período de trinta minutos com o objetivo de se retirar o excesso de água presente na sua superfície. Utilizaram-se três amostras de 50g de exocarpo e endocarpo, para cada tratamento. As amostras foram colocadas para entrar em equilíbrio com o fluxo de ar em condições previamente estabelecidas, realizando pesagens regulares até que a variação da massa da amostra fosse igual ou inferior 0,001g. As umidades de equilíbrio higroscópico do produto para as condições de cada tratamento foram determinadas pelo método da estufa. Os tratamentos de dessecção de umidade foram dispostos em um esquema fatorial 3 x 4, com três níveis de temperatura (25, 35 e 45°C) e quatro níveis de umidade relativa (25, 40, 55 e 70%), no delineamento inteiramente casualizado. Em todos os tratamentos foi utilizado um Sistema Condicionador de Ar de Laboratório "SCAL", dotada de dispositivos para o controle da temperatura e umidade relativa do ar fornecido. O fluxo de ar utilizado foi de, aproximadamente, 20 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>. A temperatura massa de ar foi determinada e monitorada utilizando-se um termômetro de mercúrio, instalado no interior da bandeja contendo as amostras do produto. A umidade relativa do ar foi calculada por meio de um programa computacional (GRAPSI). Aos dados experimentais de higroscopicidade, foram ajustados modelos matemáticos. Os modelos ajustados foram: Halsey-Iglesias e Sigma-Copace. Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi feita análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa computacional R 2.4.1. A partir dos resultados, verificou-se que os modelos selecionados tiveram ajustes satisfatórios aos dados experimentais, uma vez que apresentou coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) elevado e erros relativos e estimados baixos. Escolheu-se o modelo de Sigma-Copace por este apresentar menor complexidade de cálculos.

**Palavras-chave:** Umidade de equilíbrio, dessecção, exocarpo, endocarpo, café.

## CHARACTERIZATION OF THE DESORPTION ISOTHERM OF EXOCARPS AND ENDOCARPS OF ARABICA COFFEE

**ABSTRACT:** The objective of this work is to determine the curves of equilibrium moisture content of desorption, and select the models that best fit the behavior of the exocarps (peel) and endocarps (parchment) of arabica coffee. The exocarps and endocarps of coffee, stored for a period of one year, were soaked in water for one hour. After that were left exposed to ambient air in a sieve for a period of thirty minutes in order to remove the excess water in their area. We used three samples of 50g of exocarp and endocarp for each treatment. The samples were placed to come into equilibrium with the air flow under conditions previously established by conducting regular weighings until the variation of the mass of the sample was less than 0001g. The hygroscopic equilibrium moisture of the product to the conditions of each treatment was determined by the method of the oven. The desorption of moisture treatments were arranged in a factorial 3 x 4 with three levels of temperature (25, 35 and 45°C) and four levels of relative humidity (25, 40, 55 and 70%), the design fully randomized. In all treatments we used a system of air-conditioners Laboratory "SCAL", with devices to control the temperature and relative humidity provided. The flow of air used was approximately 20 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>. The temperature of air mass was determined and monitored using a mercury thermometer, installed in the tray containing the samples of the product. The relative humidity was calculated using a computer program (GRAPSI). The hygroscopic of experimental data, mathematical models have been adjusted. The adjusted models were: Halsey-Iglesias and Sigma-Copace. For the fit of models was made of nonlinear regression analysis, the Quasi-Newton method, using the software R 2.4.1. From the results it was found that the models selected were satisfactory adjustment to the experimental data, presented as coefficient of determination (R<sup>2</sup>) and high relative errors and estimated low. Picked up the model of the Sigma-Copace by the present lower complexity of calculations.

**Key words:** Equilibrium moisture, desorption, exocarp, endocarp, coffee.

## INTRODUÇÃO

Para que as operações de secagem e armazenagem ocorram de forma adequada, torna-se necessário conhecer as relações existentes entre a temperatura e a umidade relativa do ar, bem como as condições desejáveis de conservação do produto. É importante que o café seja armazenado com baixos teores de água em locais secos. Com isso haverá a manutenção de sua qualidade. Caso não seja possível o acomodamento do produto nestas condições, pode ocorrer o desenvolvimento de microrganismos, os quais podem causar fermentações indesejáveis e contaminações por toxinas, depreciando a qualidade do produto e dificultando sua comercialização (AFONSO JÚNIOR, 2001).

Carvalho Júnior et al. (2003) afirmam que entre os microrganismos presentes nos produtos agrícolas, os fungos são os que mais toleram a pouca disponibilidade de água e são, conseqüentemente, causadores de deterioração. A disponibilidade de água em frutos e grãos é indicada pela atividade de água ou pelo teor de água em que ocorre equilíbrio com a umidade relativa do ar ambiente. A atividade de água do produto armazenado e a umidade relativa do ar ambiente quando atingido o equilíbrio são iguais (BORÉM, 2008).

Como todo material higroscópico, o exocarpo e endocarpo de café têm a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente, buscando sempre manter uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e a umidade do ar ambiente. O teor de água de equilíbrio, também denominado umidade de equilíbrio higroscópico, é o teor de água na qual a pressão de vapor d'água no produto é igual a do ar que o envolve (ARAÚJO et al. 2001).

De acordo com Hall (1980) o estabelecimento de curvas de equilíbrio higroscópico é importante para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças de umidade sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de água propícios ao início de atividade de agentes que irão provocar a deterioração do produto. No caso do café torna-se importante ressaltar que as condições de secagem e o armazenamento adequado são essenciais para manter a qualidade desses produtos, devido ao elevado teor de água do fruto e à presença de microrganismos no momento da colheita. O café deve ser seco imediatamente após a colheita e armazenado sob condições seguras, as quais são determinadas conhecendo-se os valores de teor de água, umidade relativa e temperatura de equilíbrio (CLARKE, 1989).

O teor de água de equilíbrio de um produto agrícola depende, além das condições ambientes, do caminho seguido para ser atingido o equilíbrio. Para uma mesma combinação de temperatura e umidade relativa pode existir duas isotermas, chamadas isotermas de adsorção e dessorção. Grãos que ganham umidade para alcançar o equilíbrio higroscópico acompanham as isotermas de adsorção, enquanto que grãos que perdem água até atingir o equilíbrio seguem as isotermas de dessorção (BORÉM, 2008).

Em função da necessidade de se estudar o processo de dessorção no exocarpo e endocarpo do café, devido ao interesse tecnológico no processamento e armazenamento do produto, e diante da escassez de informações na literatura, objetivou-se desenvolver um trabalho para se determinar as curvas de umidade de equilíbrio de dessorção do exocarpo e endocarpo, e selecionar o modelo matemático que mais se ajusta aos dados experimentais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

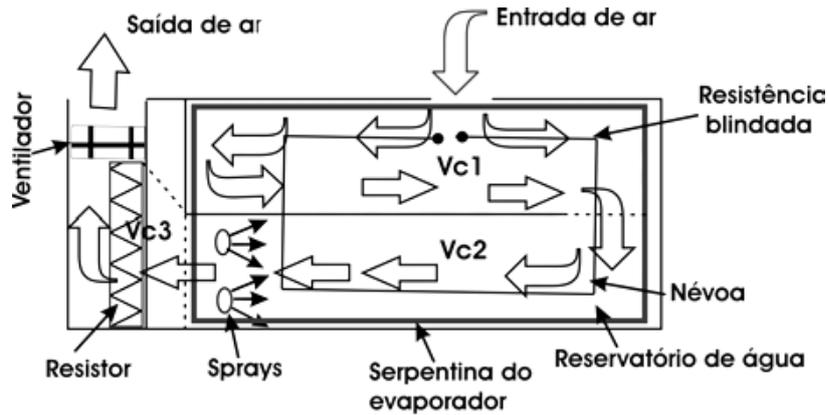
O presente trabalho foi realizado no laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia pertencente Universidade Federal de Lavras.

Foram utilizados exocarpo e endocarpo de café (*Coffea arabica* L.) armazenado em tulhas pelo período de um ano após o processamento. Após separação e limpeza do produto, foi feita a embebição dos exocarpos e endocarpos em água durante uma hora, com o intuito de se elevar seu teor de água e assim proceder à secagem, para e obter as curvas de dessorção. Tanto o exocarpo quanto o endocarpo foram deixados expostos ao ar ambiente em uma peneira por um período de trinta minutos com o objetivo de se retirar o excesso de água presente na sua superfície.

Na plotagem das curvas foram utilizadas três amostras de 50g de exocarpos e endocarpos, para cada tratamento. Após pesagem inicial, as amostras foram colocadas para entrar em equilíbrio com o fluxo de ar em condições previamente estabelecidas. As amostras foram pesadas regularmente em uma balança Shimadzu (UX420H) de quatro dígitos até que a variação da massa da amostra fosse igual ou inferior a 0,001g, sendo em seguida determinado seu teor de água, obtendo-se, assim, a umidade de equilíbrio higroscópico do produto para as condições de cada tratamento.

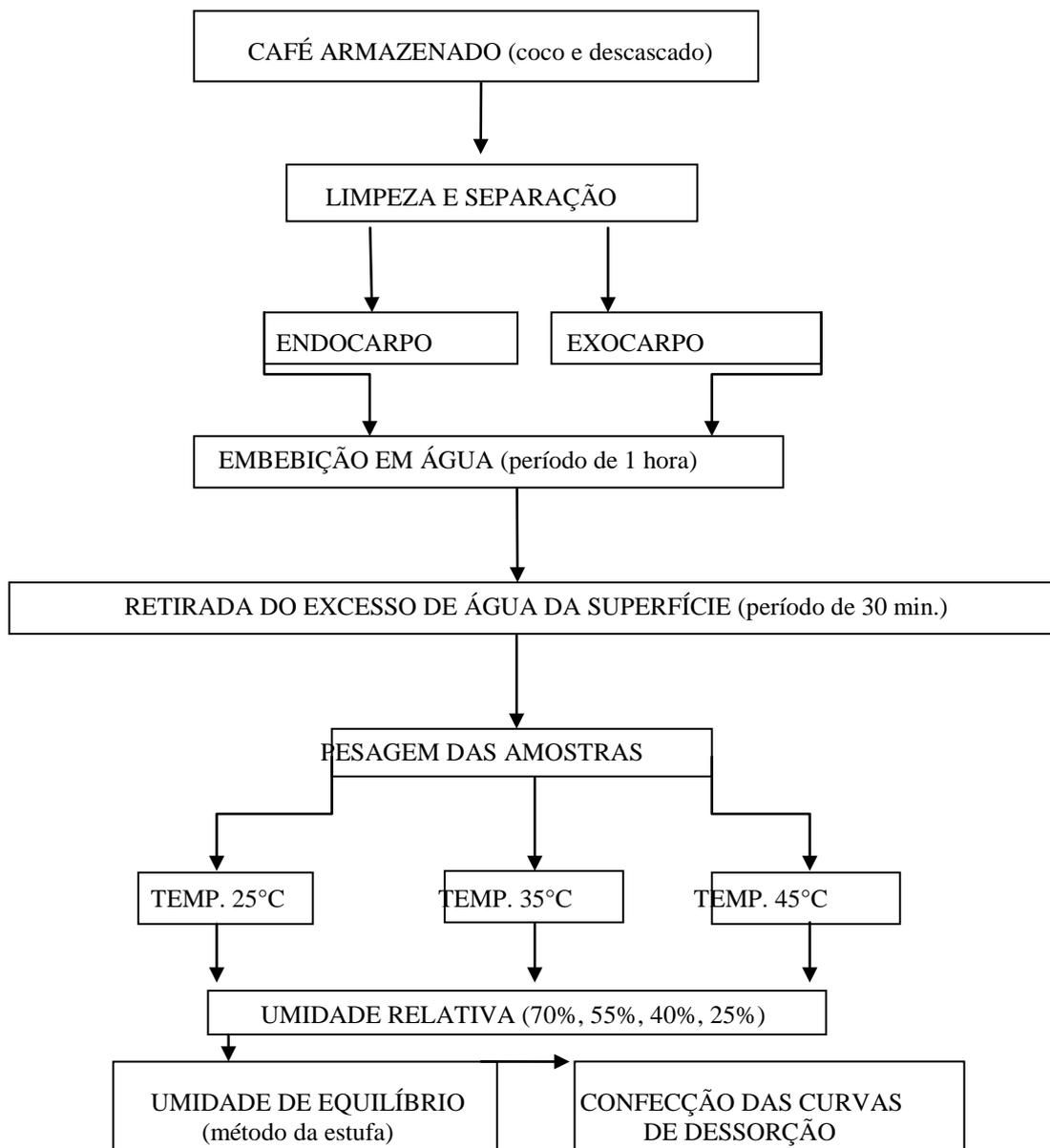
Os valores de umidade de equilíbrio do produto foram determinados pelo método da estufa,  $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  em um período de 24 horas, conforme Regras para Análise de Sementes (RAS) (BRASIL, 1992), em três repetições, utilizando 3g para cada amostra.

Os tratamentos de sorção de umidade foram dispostos em um esquema fatorial 3 x 4, com três níveis de temperatura (25, 35 e  $45^{\circ}\text{C}$ ) e quatro níveis de umidade relativa (25, 40, 55 e 70%), no delineamento inteiramente casualizado. Escolheram-se estas temperaturas e umidades relativas por estarem na faixa de temperatura e umidade relativa ambiente da região onde o projeto foi desenvolvido. Em todos os tratamentos utilizou-se um Sistema Condicionador de Ar de Laboratório "SCAL", dotada de dispositivos para o controle da temperatura e umidade relativa do ar fornecido, composta por uma bandeja removível com fundo telado subdividida em quatro partes, para permitir a passagem do ar por entre a massa de produto (FIGURA 1) (FORTES, 2006).



**FIGURA 1** – Desenho esquemático do equipamento experimental.

O fluxograma (FIGURA 2) abaixo retrata a metodologia aplicada para a confecção das curvas de dessecção do exocarpo e endocarpo de café.



**FIGURA 2** – Fluxograma da metodologia aplicada pra a confecção das curvas de dessecção da casca e do pergamimho de café.

O fluxo de ar foi determinado a partir da velocidade do ar fornecido pelo equipamento com o auxílio de um anemômetro de lâminas rotativas e mantido constante para todos os tratamentos em  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

A temperatura massa de ar foi determinada e monitorada utilizando-se um termômetro de mercúrio, instalado no interior das bandejas contendo as amostras do produto. A umidade relativa do ar foi calculada por meio de um programa computacional (GRAPSI) desenvolvido a partir de equações psicrométricas.

Aos dados experimentais de higroscopicidade dos exocarpos e endocarpos, foram ajustados modelos matemáticos, com aplicação reconhecida na predição da umidade de equilíbrio higroscópico de vários produtos agrícolas. Os modelos ajustados foram: Halsey-Iglesias e Sigma-Copace. Tais modelos foram selecionados por apresentarem melhores ajustes, reconhecidos por outros autores (ARAÚJO et al., 2001; CORRÊA et al., 1998), na predição das umidades de equilíbrio de vários produtos agrícolas.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de umidade de equilíbrio higroscópico, foi feita análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa computacional R 2.4.1, obtendo-se os valores dos parâmetros dos modelos, em função das variáveis independentes temperatura e umidade relativa do ar.

O erro médio relativo (P) e o erro médio estimado (SE), para cada modelo, foram calculados conforme equações abaixo:

$$P = \frac{1}{n} \times \sum \frac{|Y - Y_c|}{Y} \quad SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_c)^2}{GLR}}$$

em que:

**n** = número de observações; **Y** = valor observado experimentalmente; **Y<sub>c</sub>** = valor calculado para cada modelo;

**GLR** = grau de liberdade do modelo.

Com os valores dos erros médios relativos e estimados, fez-se a comparação para os modelos matemáticos selecionados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados médios de equilíbrio higroscópico dos exocarpos e endocarpos de café obtidos por dessorção, para as temperaturas de 25, 35 e 45°C e umidades relativas de 0,25, 0,40, 0,55 e 0,70, bem como os teores de água no início da secagem, são apresentados na TABELA 1 e 2.

**TABELA 1** – Valores médios experimentais dos teores de água de equilíbrio higroscópico (decimal, base seca) do exocarpo e endocarpo de café, pelo processo de dessorção, em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

Valores Médios Experimentais de Equilíbrio Higroscópico do Exocarpo e Endocarpo de Café (decimal, base seca)				
Temperatura (°C)	Umidade Relativa do Ar de Secagem (decimal)			
	0,25	0,40	0,55	0,70
Exocarpo				
25	0,13891	0,15921	0,17976	0,22167
35	0,09929	0,10875	0,11696	0,14140
45	0,06905	0,07523	0,07996	0,09382
Endocarpo				
25	0,0951	0,1073	0,1197	0,1308
35	0,0701	0,0842	0,0934	0,1053
45	0,0416	0,0504	0,0635	0,0752

**TABELA 2** - Valores médios experimentais de teor de água (após umedecimento) (% bu), dos exocarpos e endocarpos de café arábica.

Valores Médios Experimentais de Teor de Água (Após Umedecimento) (% bu), dos Exocarpos e Endocarpos de Café Arábica			
	Temperatura (°C)		
	25	35	45
Exocarpo	78,3278	84,1489	81,2207
Endocarpo	64,4734	64,1419	64,2539

Na TABELA 3 estão apresentados os resumos dos modelos matemáticos avaliados, com os parâmetros ajustados por meio de regressão não linear aos dados experimentais de equilíbrio higroscópico do exocarpo e endocarpo, obtidos por dessorção, com os respectivos coeficientes de determinação ajustado ( $R^2$ ) e erros médios relativos (P) e estimados (SE).

Observa-se na TABELA 3 que as equações com base nos modelos de Halsey-Iglesias e Sigma-Copace, apresentaram ajustes satisfatórios aos dados experimentais de equilíbrio higroscópico do exocarpo e endocarpo de café,

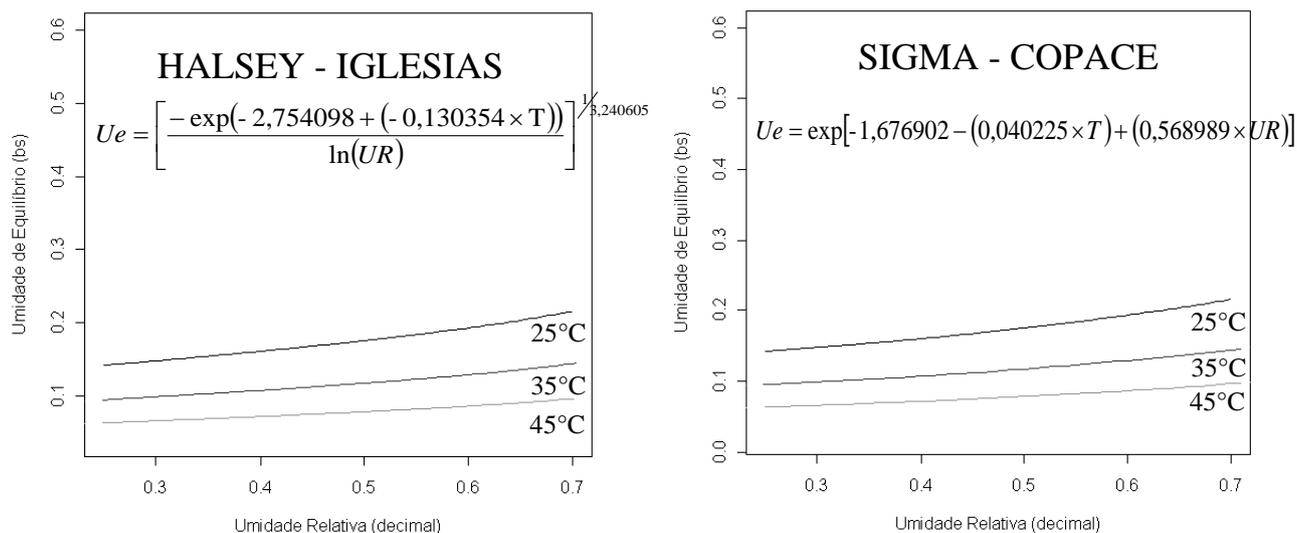
uma vez que apresentaram coeficientes de determinação ajustados elevados e erros médios relativos e estimados muito baixos. A escolha do modelo de Sigma-Copace como o melhor método para determinação das umidades de equilíbrio higroscópico, por sua equação apresentar a menor complexidade de cálculos comparada à equação do modelo de Halsey-Iglesias.

**TABELA 3** – Parâmetros das equações ajustadas para estimar o teor de água de equilíbrio higroscópico do exocarpo e endocarpo de café.

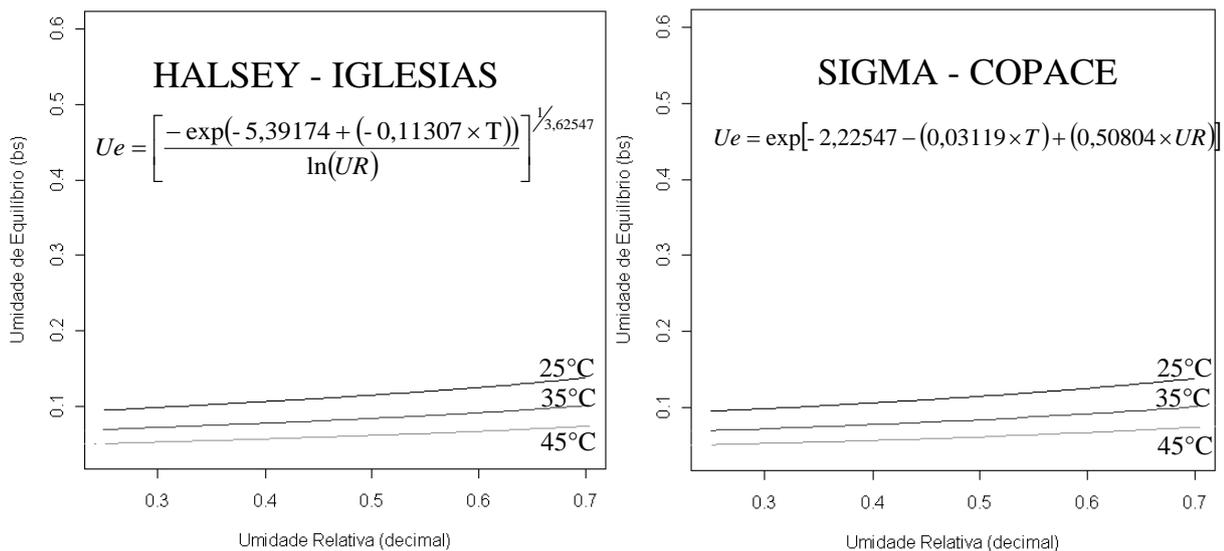
Modelos Matemáticos	Parâmetros Calculados					
	a	b	c	R <sup>2</sup>	P	SE
Exocarpo						
Halsey – Iglesias	-2,75409	-0,13035	3,24060	0,99229	0,03167	0,00449
Sigma – Copace	-1,67690	0,04022	0,56898	0,99231	0,03193	0,00448
Endocarpo						
Halsey – Iglesias	-5,39174	-0,11307	3,62547	0,96545	0,05330	0,00553
Sigma – Copace	-2,22547	0,03119	0,50804	0,96571	0,05328	0,00549

Quando comparados os valores de umidade de equilíbrio higroscópicos do exocarpo e endocarpo, sob mesmas condições de temperatura e umidade relativa do ar, nota-se que os valores do teor de água de equilíbrio foram maiores no exocarpo do que no endocarpo, sugerindo a existência de compostos higroscópicos distintos entre esses produtos. A composição química do exocarpo apresenta uma grande quantidade de carboidratos e proteína bruta solúveis em água, cerca de 74,20% e 8,25% respectivamente. Já o endocarpo é composto essencialmente por material celulósico, cerca de 90%, os quais são hidrofóbicos (BORÉM, 2008). Essa maior presença de compostos hidrofílicos no exocarpo explica o maior teor de água de equilíbrio quando comparado com o endocarpo sob as mesmas condições ambientais.

Nas figuras 3 a 4 estão apresentadas as curvas de desorção do exocarpo e endocarpo para os métodos de Halsey-Iglesias e Sigma-Copace.



**FIGURA 3** – Isotermas de desorção dos exocarpos de café obtidas pelo ajuste do modelo matemático Halsey-Iglesias e Sigma-Copace aos dados de umidade de equilíbrio de desorção.



**FIGURA 4** – Isotermas de dessecação dos endocarpos de café obtidas pelo ajuste do modelo matemático Halsey-Iglesias e Sigma-Copace aos dados de umidade de equilíbrio de dessecação.

As isotermas de dessecação dos exocarpos e endocarpos de café apresentam uma linearidade e um comportamento sigmoidal, possivelmente devido à restrita faixa de umidade relativa utilizada no trabalho.

## CONCLUSÕES

- o Os modelos de Halsey–Iglesias e Sigma–Copace apresentaram ajustes satisfatórios aos dados experimentais de equilíbrio higroscópico tanto do exocarpo quanto do endocarpo de café;
- o O modelo de Sigma-Copace foi selecionado como o melhor para a determinação das umidades de equilíbrio higroscópico, por sua equação apresentar a menor complexidade de cálculos comparada à equação do modelo de Halsey-Iglesias;
- o As umidades de equilíbrio higroscópicas do exocarpo são maiores quando comparadas as do endocarpo, sob mesmas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e da qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 373 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ARAÚLO, E. F.; CORRÊA, P. C.; SILVA, R. F. **Comparação de modelos matemáticos para descrição das curvas de dessecação de sementes de milho-doce**. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 36, n. 7, p. 991-995, jul. 2001.
- BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: Editora UFLA, 2008. 631p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992. 188p.
- CARVALHO JUNIOR, C.; BORÉM, F. M.; FERREIRA, R. G. F. A.; SILVA, F. M. **Influência de diferentes sistemas de colheita na qualidade do café**. *Ciênc. Agrotec.*, Lavras, V.27, n.5, p.1089-1096, set./out., 2003.
- CLARKE, R. J. **Grading, storage, pre-treatments and blending**. In: CLARKE, R. J.; MACRAE, R. *Coffee: technology*. London: Elsevier Applied Science, 1989. p.35-58.
- CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; CHRIST, D.; MANTOVANI, B. H. M. **Curvas de dessecação e calor latente de vaporização para as sementes de milho de pipoca (*Zea mays*)**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.2, n.1, p.75-79, 1998.
- FORTES, M.; FERREIRA, D. A.; FERREIRA, W. R.; SOUZA, A. C. **Modelagem de um condicionador de ar para o uso em processamento agrícola**. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.26, n.2, p.578-589, maio/ago. 2006.
- HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: The AVI Publishing Company, 1980. 382 p.