



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Secagem de café com polpa em secador solar de bandeja

Carlos Roberto Rodrigues Veloso

Uberlândia – MG

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Secagem de café com polpa em secador solar de bandeja

Carlos Roberto Rodrigues Veloso

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

V443s
2020 Veloso, Carlos Roberto Rodrigues, 1994-
 Secagem de café com polpa em secador solar de bandeja [recurso
 eletrônico] / Carlos Roberto Rodrigues Veloso. - 2020.

Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.
Coorientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3025>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976-,
(Orient.). II. Barrozo, Marcos Antonio de Souza, 1961-, (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

Rejâne Maria da Silva –
CRB6/1925



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica,
Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 14/2020, PPGEQ				
Data:	28 de julho de 2020	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:20
Matrícula do Discente:	11812EQU005				
Nome do Discente:	Carlos Roberto Rodrigues Veloso				
Título do Trabalho:	Secagem de café com polpa em secador solar de bandeja				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo de concentradores solares				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Irineu Petri Júnior - DEG/UFLA; Ricardo Correa de Santana - PPGEA/UFU; Marina Seixas Pereira - PPGEQ/UFU; Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, coorientador e Luiz Gustavo Martins Vieira - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Irineu Petri Júnior, Usuário Externo**, em 28/07/2020, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Gustavo Martins Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/07/2020, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Correa de Santana, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/07/2020, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2020, às 09:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marina Seixas Pereira, Membro de Comissão**, em 29/07/2020, às 14:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2132132** e o código CRC **B5A1E6A8**.

Referência: Processo nº 23117.039634/2020-01

SEI nº 2132132

“Walk on, walk on
With hope in your heart
And you’ll never walk alone
You’ll never walk alone!”

Oscar Hammerstein II/Richard Rodgers

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, uma vez que tudo acontece ao Seu planejamento, e esta fase da minha vida foi a consumação de uma parte da vida e uma oportunidade de ouro de aprendizado. De aprender a ter paciência, a ter perseverança, compreensão, autoconhecimento, responsabilidade, tão importantes para o desenvolvimento deste trabalho. Ainda não saí conhecedor destas virtudes, mas graças a Deus estou percorrendo este caminho.

Segundo, aos meus avós, que nunca me negaram nenhum tipo de apoio, fosse ele financeiro, material, ou mesmo imaterial, inclusive durante a pandemia, em que me acolheram, me ajudaram e me ajudam, me incentivam e me cobram sempre na medida certa. Aos meus tios, especialmente o Fernando, que me ajudou muito emocionalmente no maior período de dificuldade.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira e Prof. Dr. Marcos A. S. Barrozo por toda a paciência necessária para me ajudarem, por não desistirem de mim quando eu mesmo já pensava em desistir, pela ajuda em partes-chave deste trabalho, nas dificuldades com o armazenamento, o manejo do café. Ao Prof. Dr. Irineu Petri Júnior pela contribuição de vital importância para um trabalho de café, na leitura da cafeína e de outros compostos importantes do café.

Aos colegas de laboratório pelo apoio prestado, a Janaína Barbosa por ter me ajudado já desde antes do mestrado, ao Gregori Ullmann, à Raissa Rossi e ao Marcus Paulo por me apoiarem com dicas, assuntos técnicos e logísticos, além da companhia.

Ao meu querido colega e amigo Raphael Lima Santos por todo apoio técnico e emocional durante este trabalho, pelas conversas, pelas músicas, pela tão necessária companhia dentro do laboratório.

Mas principalmente à Layla, minha namorada, tão apoiadora, tão companheira, professora e confidente, que segurou as pontas tantas vezes quando foi preciso, me acompanhou enquanto estive mal e me ajudou até mesmo nos testes.

Eu não estaria aqui sem a ajuda, o apoio de vocês. Meus mais sinceros agradecimentos, muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Café.....	4
2.2 Testes de qualidade do café	11
2.2.1 Compostos fenólicos.....	12
2.3 Energia solar	21
2.4 Secagem	15
2.5 Secagem solar	22
2.6 Secagem de café.....	25
2.7 Secador de bandejas.....	28
2.8 Secagem solar utilizando secador de bandejas	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30

3.1	Café.....	30
3.2	Descrição do secador solar	30
3.2.1	Funcionamento do secador	35
3.2.2	Configurações relacionadas ao ar de secagem.....	35
3.2.3	Testes de secagem.....	36
3.3	Umidade de equilíbrio e cinética de secagem.....	40
3.4	Testes de qualidade do café	41
3.4.1	Extrações convencionais.....	41
3.4.2	Compostos fenólicos totais	42
3.4.3	Compostos flavonoides totais	42
3.4.4	Cafeína, trigonelina e ácido clorogênico	42
3.5	Análise estatística	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Caracterização do café natural	44
4.2	Considerações iniciais sobre o Secador Solar de Bandeja.....	44
4.3	Secagem	47
4.3.1	Cinética de secagem	47
4.3.2	Redução de umidade.....	51
4.4	Qualidade do café	56
4.4.1	Compostos fenólicos totais	57

4.4.2	Compostos flavonoides totais	61
4.4.3	Cafeína.....	65
4.4.4	Trigonelina.....	66
4.4.5	Ácido Clorogênico.....	67
4.4.6	Melhores condições de trabalho	68
5.	CONCLUSÕES	69
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de bebidas de café e suas propriedades sensoriais (adaptada de Prete, 1992).....	10
Tabela 2.2 – Modelos semi-empíricos de secagem.	19
Tabela 3.1 – Planejamento experimental para secagem com convecção natural.	37
Tabela 3.2 – Planejamento composto central para secagem com convecção forçada...	38
Tabela 3.3 – Equações de adimensionalização.....	39
Tabela 4.1 – Valores das variáveis manipuladas, valores médios das variáveis monitoradas e umidade inicial e final do material para um período de secagem de 6 h.	44
Tabela 4.2 – Valores de R^2 médios referentes aos ajustes de cada equação cinética de secagem.	47
Tabela 4.3 – Valores do parâmetro cinético k encontrados para a equação de Overhults <i>et al.</i> (1973) em cada teste e as variáveis manipuladas e monitoradas.....	49
Tabela 4.4 – Valores do Número Adimensional encontrados para cada ensaio de secagem de café e a redução de umidade.	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Frutos maduros de café arábica (<i>Coffea arabica</i>) variedade Novo Mundo.	5
Figura 2.2 – Estrutura do grão de Café (SFREDO, 2006).	7
Figura 2.3 – Estrutura molecular da cafeína (MOREIRA, 2019).	8
Figura 2.4 – Estrutura moleclular da trigonelina.	9
Figura 2.5 - Estrutura química básica dos flavonoides (BEHLING <i>et al.</i> , 2004).	13
Figura 2.6 – (a) Curva característica da cinética de secagem (SILVA, 2017) e (b) curva de taxa de secagem (GEANKOPLIS, 1993).	17
Figura 2.7 - Índice de emissão solar no Brasil e na Europa (PORTAL SOLAR, 2015).	22
Figura 3.1 – Vista lateral do secador solar de exposição indireta: (A) coletor solar, (B), câmara de secagem e (C) exaustor eólico (SILVA, 2017).	31
Figura 3.2 – Vista frontal do coletor solar com convecção natural (A) e com convecção forçada (B) (SILVA, 2017).	32
Figura 3.3 – Vista interna da câmara de secagem (SILVA, 2017).	33
Figura 3.4 – Detalhe da instrumentação para medida de temperatura e umidade: (A) FieldLogger, (B) RHT DM 150mm e (C) PT100 (SILVA, 2017).	34
Figura 4.1 – Temperatura do ar de secagem em função da vazão do ar de secagem e da radiação solar.	45
Figura 4.2 – Cinética de secagem para o ensaio CF4.	48
Figura 4.3 – Superfície de resposta do parâmetro k para as variáveis carga mássica de café (x_2) e temperatura do ar de secagem (x_3).	50
Figura 4.4 – Comportamento da redução de umidade com a temperatura de ar de secagem.	51

Figura 4.5 – Superfície de resposta do efeito da temperatura do ar de secagem (x_3) e carga mássica de café (x_2) na redução de umidade.....	53
Figura 4.6 – Dependência da redução de umidade com o Número Adimensional.	56
Figura 4.7 – Teor de fenólicos totais <i>in natura</i> e após os testes de secagem do café. ..	57
Figura 4.8 – Comparação entre a redução de fenólicos totais e a temperatura de ar de secagem.	58
Figura 4.9 – Superfície de resposta de x_2 (carga mássica de café) e x_3 (temperatura do ar de secagem) na redução dos compostos fenólicos.....	59
Figura 4.10 – Redução de Fenólicos Totais (<i>RPT</i>) em função do valor do Número Adimensional (Ψ).	60
Figura 4.11 – Teor de flavonoides totais <i>in natura</i> e após os testes com o café.	61
Figura 4.12 – Comparação entre a redução de flavonoides totais e a temperatura de ar de secagem.	62
Figura 4.13 – Superfície de resposta de x_2 (carga mássica de café) e x_3 (temperatura do ar de secagem) para a redução de flavonoides.	63
Figura 4.14 – Redução de Flavonoides Totais (<i>RFT</i>) em função do Número Adimensional (Ψ).	64
Figura 4.15 – Teor de cafeína <i>in natura</i> e após os testes de secagem.....	65
Figura 4.16 – Teor de trigonelina <i>in natura</i> e após os testes de secagem.	66

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de modelo de secagem	-
A_0	Constante de modelo de secagem	min^{-1}
a_w	Atividade de água	-
C	Carga mássica	kg/m^2
C_G	Parâmetro do modelo GAB	-
G	Radiação solar	W/m^2
k	Constante de modelo de secagem	min^{-1}
k_G	Parâmetro do modelo GAB	-
n	Constante de modelo de secagem	-
P_{atm}	Pressão atmosférica ambiente	Pa
P_S	Pressão de vapor nas condições saturadas	Pa
P_V	Pressão de vapor de água no alimento	Pa
$P_{V,atm}$	Pressão de saturação de vapor de água	Pa
Q	Vazão de ar de secagem	m^3/h
RFT	Redução de flavonoides totais	%

RPT	Redução de fenólicos totais	%
RX	Redução de umidade do material	%
T_E	Temperatura de entrada do ar de secagem	°C
t	Tempo de secagem	min
T_∞	Temperatura do ar ambiente	°C
UA_{Amb}	Umidade absoluta do ar ambiente	-
U_R	Umidade relativa do ar	%
X_0	Umidade inicial do material	%
X_{eq}	Umidade de equilíbrio do material	%
X_m	Parâmetro do modelo GAB	-
X_R	Umidade reduzida	%
ρ_∞	Massa específica do ar ambiente	kg/m ³
Ψ	Adimensional de umidade	-
$\tilde{\Psi}$	Adimensional normalizado de umidade	-

RESUMO

A utilização de energias não renováveis e dispendiosas em operações de secagem tem sido um problema para a oferta de um café mais barato para o consumidor. A energia solar é uma alternativa sustentável apresentada para esta operação. A energia solar é de baixo custo, extremamente abundante, especialmente na região do Triângulo Mineiro. O café arábica (*Coffea arabica*) é o café mais bebido no mundo, sendo o Brasil o maior produtor. A maioria das secagens no Brasil é feita em terreiros, sendo suscetíveis à poeira e a agentes patológicos trazidos pelo vento ou por animais, além de estar vulnerável à chuva e serem dependentes de condições climáticas. A secagem solar em secador de bandejas é uma alternativa que engloba a abundância da energia solar e uma melhor proteção a precipitações e intempéries naturais. Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso do secador solar de bandejas como alternativa para a secagem do café arábica, variando a vazão volumétrica de ar e a carga mássica a ser seca. O secador solar atingiu temperaturas entre 49°C e 58°C e conseguiu remover a umidade do café de 34,71% para um valor médio de 15,50% em seis horas, até ser considerada suficiente para armazenagem, abaixo de 18% de umidade. Houve uma degradação dos fenólicos e dos flavonoides, embora em pequena quantidade, sendo importante o efeito negativo da temperatura do ar de secagem na redução destes compostos bioativos. Temperaturas mais altas também são mais desejadas para manutenção dos bioativos.

Palavras-chave: bioativos; cafeína; energia solar.

ABSTRACT

The use of non-renewable, dispendious energies in drying operations is a setback for the arrival of a lower-priced beverage coffee. Solar energy is the best alternative to replace that issue on this operation for being low-cost and plentiful especially in central Brazil region Triangulo Mineiro. *Coffea arabica* is the most popular coffee drink in the world, Brazil being the first producer of the fruit. The drying operation of the coffee fruit in the country is made in concrete yards, which are vulnerable to dust and other pathological agents brought by wind or small animals, besides being vulnerable to rain. The solar drying using tray dryers is an alternative that includes both solar energy plenty and a better protection to precipitations and natural weather. This work aimed to evaluate the use of a solar tray dryer as an alternative to dehydrate *Coffea arabica* fruits, varying the volumetric air flow rate and the fruit's mass load. The temperature achieved by the dryer ranged from 49°C to 58°C and managed to dry the fruit from 34.71% down to a mean value of 15.5% enough to storage in six hours. Degradation of phenolic and flavonoid compounds were observed, although in low amounts, witnessing an important effect of the drying air temperature, that modifies inhibitory enzymes and the bioactive compounds themselves by thermal stress. Hence, to maintain bioactive compounds close to natural stage, high temperatures are desired.

Keywords: bioactives; caffeine; solar energy.

1. INTRODUÇÃO

No último século, houve um crescimento populacional exponencial no planeta, motivado por vários fatores, como o avanço da medicina e das tecnologias de produção. No entanto, este crescimento populacional trouxe consigo uma demanda cada vez maior de produtos, como alimentos e têxteis. Por causa do avanço tecnológico da Segunda Revolução Industrial do século XIX, os combustíveis fósseis, em especial o petróleo, começaram a ser amplamente utilizados na produção industrial.

A dependência de combustíveis fósseis da sociedade tem sido algo bastante discutido nas últimas décadas. Devido a vários fatores, como a poluição gerada pela sua queima, a dificuldade de extração, possível escassez de fontes e crescimento da demanda, instaura-se e cresce uma crise energética, desde a década de 60, que tem impulsionado pesquisas para fontes alternativas, renováveis e limpas de energia, como a utilização de energia eólica, energia hidrelétrica e energia solar.

Os combustíveis fósseis possuem ampla gama de aplicações, podendo ser utilizados como matéria-prima em produtos como sacolas plásticas, resinas, tintas, eletrônicos e eletroeletrônicos, entre outros, participando na produção de vários itens utilizados no dia-a-dia. Motores de automóveis, usinas termelétricas e outras máquinas utilizam combustíveis fósseis como fonte de energia. Dentre esses equipamentos, um que é bastante utilizado é o secador mecânico, que pode utilizar o calor produzido pela queima de combustíveis ou energia elétrica para secagem de vários materiais úmidos, incluindo os grãos (SILVA, 2017).

O café é uma bebida preparada do grão de café torrado e moído, sendo uma das mais consumidas no Brasil e no mundo. Trata-se de uma bebida quente e tida como amarga. Pode ser consumida descafeinada ou não. Trata-se, também, da *commodity* agrícola mais valiosa no mundo, tendo alta participação na economia de vários países da América Latina (GRIGG, 2002), sendo o Brasil o maior produtor e exportador do mundo (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018). Na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, o café tem ganhado destaque nos últimos anos. Portanto, devido à importância regional e nacional desta *commodity* agrícola, a utilização de

técnicas que promovam a redução de custo, economia de energia e melhoria da qualidade do produto tem sido motivo de estudos científicos.

A maior parte do café passa por uma secagem em terreiros, para a redução de umidade. No entanto, a secagem continua após a fase de terreiros, utilizando secadores mecânicos convencionais. Ainda há produtores que coletam o café e o colocam imediatamente nos secadores, onde a secagem é totalmente mecânica. Os secadores mecânicos permitem um maior controle operacional da secagem e das variáveis que participam processo, permitindo uma maior proteção do café a ser seco e de costumarem durar menos tempo. Entretanto, utilizam, em sua maioria, energia elétrica ou energia térmica, aumentando os custos do processo e, conseqüentemente, o produto final, além de contribuir para o maior impacto ambiental de energias não renováveis.

A fonte térmica utilizada em secagem em terreiros é a energia solar. No entanto, a exposição ao vento e à umidade pode levar agentes patológicos ao grão e ao consumidor, aumentando as chances de contaminação. Neste cenário, estudos científicos sobre o uso da energia solar como fonte de energia em secadores mecânicos para a secagem de café são necessários e importantes. A energia solar é tida como uma fonte inesgotável e limpa, mas é ainda pouco utilizada, considerando seu potencial. O Brasil é um dos países com maior incidência solar anual (PORTAL SOLAR, 2016).

Uma das alternativas para a secagem mecânica do café é o secador indireto de bandeja, onde o ar entra em contato com o material disposto em bandejas, dentro de uma câmara. O secador, então, consegue proteger melhor o contato a um possível agente patológico ou precipitações, como no secador mecânico, e também utilizar uma fonte térmica mais barata, a energia solar, assim como na secagem em terreiros. Se comparado com a secagem em terreiro, é uma alternativa que demanda menos tempo de secagem (REIS *et al.*, 2011).

Portanto, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a secagem de café utilizando um secador de bandeja alimentado com um coletor de energia solar. Para isso, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar os efeitos das variáveis operacionais, determinando sua significância na secagem do café arábica, avaliando a cinética de secagem,

a umidade final e a redução de umidade do café, além de compostos bioativos após a secagem, como Teor de Fenólicos Totais, Redução de Fenólicos Totais, Teor de Flavonoides Totais, Redução de Flavonoides Totais e os teores de cafeína, trigonelina e ácido clorogênico.

- As variáveis independentes manipuladas foram a vazão de ar de alimentação e a carga mássica de café sobre a bandeja; as variáveis monitoradas foram a radiação solar, a temperatura do ar de secagem e a umidade relativa do ar ambiente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentadas informações gerais sobre o café, suas propriedades químicas, terapêuticas, sensoriais, sua importância histórica e econômica, bem como a secagem em geral, a secagem de café, a energia solar, a secagem solar e a secagem solar de bandejas.

2.1 Café

O café é uma bebida bastante popular no mundo, em especial na Europa, que consumiu aproximadamente 30% da produção mundial de café em 2017 (FORBES, 2017). O Brasil é o segundo maior consumidor de café do mundo, com 22,3 milhões de sacas, atrás apenas dos Estados Unidos, que consumiu 25,9 milhões de sacas em 2017. O brasileiro, em média, consumiu 4,9 kg de café por ano, representando 2,25 bilhões de xícaras de café consumidas anualmente (BARROS, 2018; GRÃO GOURMET, 2018). Café é também o nome do fruto (Figura 2.1) que origina a bebida, fruto que a depender da variação pode ser vermelho ou amarelo, quando maduro.

O Brasil é o maior produtor de café, e, portanto, possui grande importância na movimentação da bebida. O país produziu, em 2017, 45 milhões de sacas (2,6 milhões de toneladas), e em 2018 houve um crescimento de 33,2% na produção, chegando a aproximadamente 60 milhões de sacas, (3,6 milhões de toneladas). Esta estimativa contribuiu para um crescimento de 7% da produção mundial de café, que para a safra 2018/19 foi de 171,2 milhões de sacas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018; GRÃO GOURMET, 2018).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Estado de Minas Gerais é o maior produtor de café do país, com um total de 32 milhões de sacas produzidas em 2018, equivalente a 53,3% da produção brasileira. Dentro do cerrado mineiro, destacam-se, pela maior produção e pela qualidade dos grãos e da bebida, as cidades de Patrocínio, Araguari e Monte Carmelo. Lavras e Viçosa também estão entre as cidades mineiras de destaque na produção e qualidade do café (G1 SUL DE MINAS, 2017).



Figura 2.1 – Frutos maduros de café arábica (*Coffea arabica*) variedade Novo Mundo.

2.1.1 Contexto histórico do café

O café possui muita importância na história do Brasil, pois foi, por mais de um século, o pilar da economia do país. Ao final do século XVIII, o ciclo do ouro vivia sua decadência e a saída encontrada foi voltar a economia para a agropecuária. Vários mineradores migraram para o Nordeste e Norte do país para plantio de *commodities*, como a cana-de-açúcar, o tabaco e o algodão. No entanto, tais produtos acabaram perdendo seu poder de mercado. Então, os produtores tiveram que encontrar novas soluções, e a melhor delas foi o café, até então tido como um produto de pequena importância (PRADO JÚNIOR, 2006).

Graças às terras férteis do Vale do Paraíba e do Oeste Paulista, o café ganhou espaço na agricultura brasileira a partir dos anos 1850. O centro-sul do país se

desenvolveu e o país retomou sua economia novamente. Associada à escravidão, o produto tinha alto poder de mercado, comparado com outros países. Os Estados Unidos foram, por muitos anos, o maior importador de café do Brasil, importando mais de 50% do volume de café produzido no país (PRADO JÚNIOR, 2006).

O café se espalhou para outras regiões do centro-sul, como o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba em Minas Gerais, Goiás, além do sul de São Paulo, Espírito Santo e o Paraná, onde o clima ameno, chuvas distribuídas e a chamada terra roxa proporcionavam um crescimento ótimo para o cafeeiro. O Brasil praticamente deteve o monopólio do mercado cafeeiro numa época em que o café era o insumo agrícola mais comercializado dos produtos primários no comércio mundial, gerando altos preços e altos lucros para o grão (PRADO JÚNIOR, 2006).

O café, no entanto, começou a sofrer com decadências no mercado, uma vez que a mão-de-obra escrava começou a ser substituída por mão-de-obra assalariada, especialmente dos imigrantes. Além disso, desenvolvia-se o mercado cafeeiro em outros locais do mundo. Para manter o alto interesse no café, o governo brasileiro chegava a comprar o café dos agricultores. Muitos dos lotes eram queimados, devido à falta de demanda. Soma-se isso à crise da bolsa de Nova Iorque, em outubro de 1929 e o resultado foi uma queda de 30% da exportação de café. A partir daí, o Brasil se diversificou novamente, mas sem esquecer o café. Em 2018, o Brasil representou cerca de 35% das exportações de café em todo o mundo (PRADO JÚNIOR, 2008; GRÃO GOURMET, 2018).

2.1.2 Características físico-químicas do café

O café (Figura 2.2) consiste em uma drupa, ou seja, um fruto carnudo, com um caroço rígido. A casca é a camada mais externa do fruto, que reveste sua polpa fibrosa. Entre o caroço e a polpa está a mucilagem, um gel amorfo, sem estrutura celular definida. O caroço contém dois grãos plano-convexos ou sementes chatas, envoltas em uma fina camada de películas: o pergaminho, uma camada amarelada, pouco permeável e com poucas capilaridades, e a película prateada. A transferência de massa e calor é bem diferente de outros tipos de grãos, como a soja e o trigo, por causa da baixa quantidade

de capilares presentes no pergaminho e a baixa capacidade térmica da mucilagem (GUIMARÃES; BERBERT; SILVA, 1998).

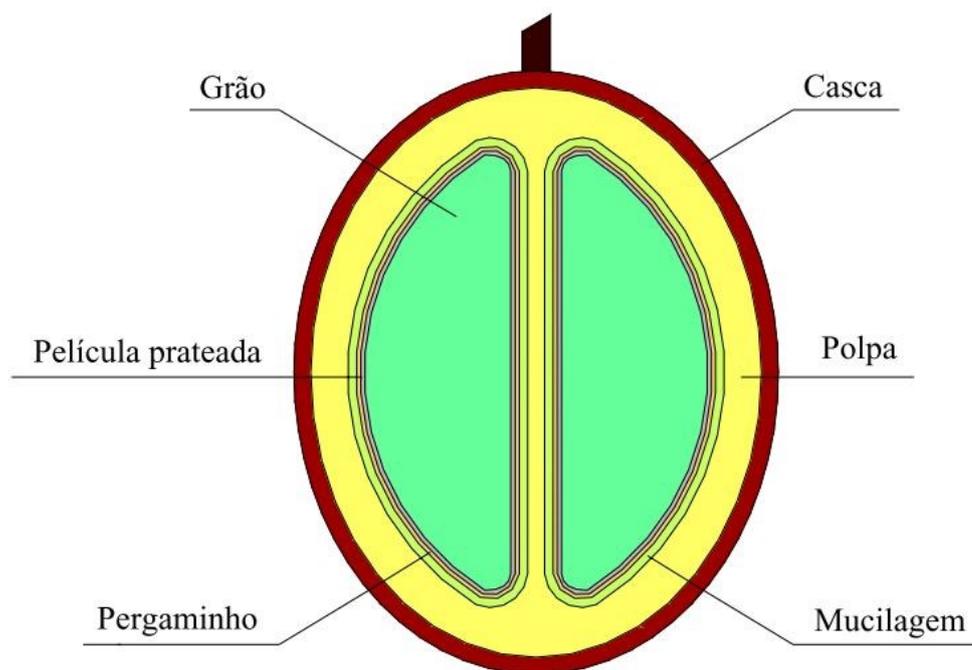


Figura 2.2 – Estrutura do grão de Café (SFREDO, 2006).

O café possui diferentes variedades, e dentre as mais importantes comercialmente destacam-se a *Coffea arabica* e a *Coffea canephora*, sendo a última dividida em *Coffea robusta* e *Coffea conillon*. Comercialmente, são chamadas de café arábica, a mais cultivada e vendida no mundo, por conta da sua qualidade e sabor, e café robusta (SFREDO, 2006).

Os frutos de café podem ser colhidos em vários estágios diferentes, a depender da sua umidade. O grão pode estar em forma de cereja (50 a 70% de umidade b. u.), passa (35 a 50% de umidade) ou seco (16 a 30% de umidade) (SFREDO, 2006). Reis *et al.* (2011) mostram que o café pode ser armazenado com segurança a 18% de umidade b. u.

Vários estudos têm sido feitos com relação às propriedades medicinais da bebida. Embora muitas pesquisas apontem ser prejudicial o consumo excessivo da cafeína, outras mostram que o café está ligado à redução do risco de contrair diabetes tipo 2, câncer colorretal e doenças cardiovasculares (DONG *et al.*, 2017).

O café possui mais de oitocentas substâncias que definem seu aroma, sua textura e seu sabor. A qualidade do café está associada à quantidade dessas substâncias e essas quantidades dependem de vários fatores, como a genética, a localização geográfica, o clima, o tipo de solo, além da prática de agricultura feita (fertilizantes utilizados, irrigação, dentre outros) e do processamento utilizado (BORÉM *et al.*, 2008; SUNARHARUM; WILLIAMS; SMYTH, 2014). Brando (1999) observou, em seu estudo, que cafês descascados, despulpados e desmucilados possuem características melhores em relação ao café com polpa. Dentre os compostos mais importantes que se encontram no café, o mais conhecido é a cafeína (1,3,7-trimetilxantina), cuja fórmula química estrutural é apresentada na Figura 2.3.

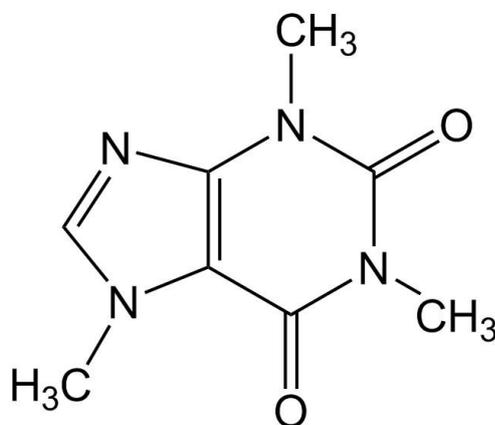


Figura 2.3 – Estrutura molecular da cafeína (MOREIRA, 2019).

A cafeína é encontrada em várias plantas, muitas delas bastante cultivadas no Brasil, como a erva mate (*Ilex paraguariensis*), o guaraná (*Paullinia cupana*) e o cacau (*Theobroma cacao*), além do grão de café. Por isso, pode ser encontrada em vários alimentos, como chás, refrigerantes, chocolates e o café (ABRAHÃO *et al.*, 2008; TELLO; VIGUERA; CALVO, 2008). Esse alcaloide presente na composição do café atua como estimulante do sistema nervoso central e tem ação diurética. Em pequenas quantidades, a cafeína aumenta a taxa metabólica do corpo, relaxa a musculatura lisa dos brônquios, do trato biliar, do sistema vascular, além de ser estimulante para a secreção de ácidos gástricos e trato intestinal. No entanto, se ingerida em excesso, a cafeína pode gerar irritabilidade, dores de cabeça, insônia, palpitação e diarreia (ABRAHÃO *et al.*, 2008). Além disso, de acordo com Sivetz (1963), a substância minimiza a sensação de fadiga, o que gerou sua alta popularidade no mundo.

A quantidade diária recomendada de cafeína para um adulto de 70 kg é de algo em torno de 400 a 450 mg. Para crianças de 4 a 6 anos, em torno de 45 mg/dia. Uma xícara de café possui de 70 a 100 mg de cafeína (KNIGHT *et al.*, 2004).

A cafeína é uma das estruturas celulares mais estáveis do café (ABRAHÃO *et al.*, 2008; DONG *et al.*, 2017). Se apresenta como um pó branco, se feito artificialmente, que sublima a temperaturas a partir de 176°C. O café do tipo Arábica possui em torno de 0,9% a 1,4% b. s. de cafeína. Por conta de sua estabilidade, a substância consegue resistir muito bem ao processo de torração. Além disso, é uma das substâncias que tem sido estudada como antioxidante (CLARKE; MACRAE, 1985). Abrahão *et al.* (2010) mostraram que há uma quantidade média de 1,4 g de cafeína para cada 100,0 g de café e que há pouca perda no processo de torração.

A trigonelina (C₇H₇NO₂), apresentada na Figura 2.4, é um composto nitrogenado do café, pertencente ao grupo dos alcaloides, cujos produtos da degradação térmica possuem bastante contribuição para características sensoriais e nutricionais do café. Trata-se de um cristal incolor, higroscópico e monoídrico de fusão a 130°C se hidratado e 230 °C se anidro. É bastante solúvel em água, mas pouco solúvel em compostos orgânicos. Possui menor atividade fisiológica que a cafeína, agindo no sistema nervoso central e na secreção de bile, além de ajudar na mobilidade intestinal. No entanto, precisa de uma quantidade de 20 a 40 mg de trigonelina para que haja significativo efeito, o que é muito mais do que um consumo normal de café (CLARKE; MACRAE, 1985; DONG *et al.*, 2017).

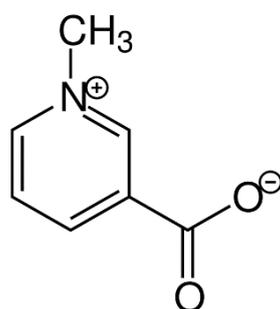


Figura 2.4 – Estrutura molecular da trigonelina.

A trigonelina é encontrada em 1,0% em café arábica e 0,7% em café robusta b. s. Em condições de torração, sua concentração pode cair para 60% a 15% do valor inicial, a depender da temperatura (CLARKE; MACRAE, 1985). No entanto, os principais

compostos da degradação térmica são o ácido nicotínico (niacina ou vitamina B3), a N-metil-nicotinamida, e o metil-nicotinato. Além disso, a trigonelina participa de reações de Maillard na torração, fazendo com que sejam formados vários compostos, dentre eles doze piridinas, quatro pirróis e nove compostos dicíclicos, dos quais nove destes compostos estão presentes na composição do aroma da bebida e também possuem importância nutricional (ARAI *et al.*, 2015; ARANDA SALDANA, 1997; CLARKE; MACRAE, 1985).

O grupo de ácidos clorogênicos é um dos mais importante do grão do café. Possui relevância no sistema imunológico de plantas. Consiste em vários isômeros, os mais conhecidos são o ácido 4-cafeoilquínico e o ácido 5-cafeoilquínico. Está associado à formação de ésteres por um ou mais ácidos aromáticos, importantes na composição do sabor e do aroma da infusão (AFONSO JÚNIOR, 2001; ARANDA SALDANA, 1997). Os ácidos clorogênicos também possuem propriedades antioxidantes, mas, ao contrário da cafeína, são bastante deteriorados na torração. O café arábica possui aproximadamente 5,5 g do ácido 5-cafeoilquínico numa porção de 100 g b. s. (ABRAHÃO *et al.*, 2010).

O sabor é tido como o fator mais importante para o café coado. A bebida possui várias classificações quanto as características de sabor. A Tabela 2.1 mostra as classificações das bebidas de café e suas qualidades sensoriais.

Tabela 2.1 – Tipos de bebidas de café e suas propriedades sensoriais (adaptada de Prete, 1992).

Classificação da bebida	Características sensoriais
Estritamente mole	Bebida de sabor bastante suave e adocicado
Mole	Bebida de sabor suave, acentuado e adocicado
Apenas mole	Bebida de sabor suave, apresentando leve adstringência
Dura	Bebida de sabor adstringente e de gosto áspero
Riada	Bebida com leve sabor iodofórmio ou de ácido fênico
Rio	Bebida de sabor forte e desagradável, semelhante ao iodofórmio ou ácido fênico

O café coado possui como características de sabor o odor (ou aroma), a adstringência, a textura, o amargor, o aroma de torrado, sabores residuais de torração e

ácidos cítricos. Cada espécie de café possui diferentes composições destes sabores, e dentro dessas espécies, há a diferença entre as variedades. Estas qualidades do café são avaliadas pela chamada prova da xícara, em que degustadores treinados fazem a degustação da bebida, avaliando as características supracitadas (SUNARHARUM; WILLIAMS; SMYTH, 2014). Dong *et al.* (2017) ressaltam que o café possui apelo comercial devido aos seus atributos para a saúde, bem como seu aroma específico e seu amargor característico.

Outra característica importante do café é a referente ao tato, ou seja, ao contato do café com os lábios, com a língua e com o interior da boca. Estas sensações estão relacionadas à crocância, à oleosidade, à viscosidade, à arenosidade, à dureza e outras diferentes sensações, mais complexas, ligadas à membrana mucosa da boca, como queimação, cócegas e refrescância (SUNARHARUM; WILLIAMS; SMYTH, 2014). Neste sentido, os lipídios ganham destaque devido à sua capacidade de textura e viscosidade da bebida, uma vez que carregam sabores e vitaminas solúveis em gordura (DONG *et al.*, 2017).

Reações químicas acontecem durante todo o processo, desde a secagem, passando pela torração e pela moagem, para que o produto final tenha sua característica definida. Durante os processos, reações de Maillard, degradações de Strecker, quebra de aminoácidos, degradação da trigonelina, ácido quínico, pigmentos, lipídios e interação entre os produtos intermediários são os mais comuns de acontecer, especialmente na torração, que atinge temperaturas entre 180 e 240°C (DONG *et al.*, 2017; SUNARHARUM; WILLIAMS; SMYTH, 2014).

Devido a estes tipos de reações, bem como algumas imperfeições do grão ou do processo, diferentes tipos de café podem ter diferentes qualidades. Para avaliar estas diferenças, alguns testes são feitos para avaliação do grão, que afetam diretamente o sabor e aroma da bebida.

2.2 Testes de qualidade do café

Vários testes podem ser feitos com o café, para avaliação de qualidade, como o Lercafé, o teste de Tetrázolito, análise sensorial, biospeckle laser, condutividade elétrica, lixiviado de potássio, dentre outros (BARBOSA, 2011).

2.2.1 Compostos fenólicos

Compostos fenólicos são substâncias sequestradoras de radicais livres, possuindo capacidade de doar hidrogênio ou compartilhar elétrons. O corpo humano não possui a capacidade de produzir estes compostos e sua origem vem de ingestão de vegetais. Nas plantas, os fenólicos são produtos de metabolismo secundário das plantas, como forma de defesa, impedindo a oxidação de certos compostos importantes. Possuem distribuição homogênea ao longo do corpo da planta, localizando-se no interior da célula e na parede celular. Além disso, alguns fenólicos são responsáveis pela pigmentação e aroma de alimentos. Os compostos fenólicos possuem propriedades antioxidantes, antimicrobianas, antialérgicas, anticarcinogênica, anti-inflamatória, vasodilatadora, entre outras (SILVA, 2017).

A estrutura química dos compostos fenólicos consiste em um ou mais anéis aromáticos com um ou mais grupos hidróxidos. Podem variar desde moléculas como o ácido fenólico até compostos polimerizados, como os taninos. São classificados de quatro formas diferentes: 1) ácidos fenólicos resultantes de ácidos hidroxibenzoicos; 2) flavonoides (polifenóis), incluindo flavonas, isoflavonas, flavanonas, antocianidinas e flavonóis; 3) estilbenos e 4) taninos. Existem mais de 8 mil substâncias conhecidas que são classificadas como fenólicos (SILVA, 2015b).

Os flavonoides ganham destaque nos fenólicos devido à sua alta capacidade de defesa, sendo um antimicrobiano, antiviral, antiulcerogênico, citotóxico, antineoplástico, antioxidante, anti-hepatotóxico, anti-hipertensivo, hipolipidêmico, anti-inflamatório e antiplaquetário (SILVA, 2015b). Consistem em anéis aromáticos múltiplos, em sua maioria com 15 átomos de carbono no núcleo, com duas fenilas, ligadas entre si por uma cadeia de três carbonos. Os flavonoides constituem em um esqueleto de difenil-propano

com dois anéis benzênicos ligados a um pirano, como mostra a Figura 2.5 a seguir (BEHLING *et al.*, 2004).

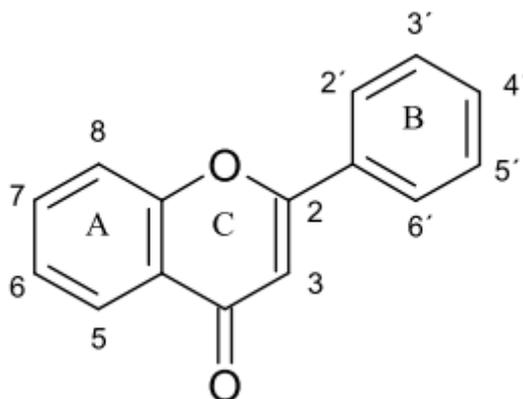


Figura 2.5 - Estrutura química básica dos flavonoides (BEHLING *et al.*, 2004).

A estrutura dos flavonoides facilita a ação antioxidante, devido à localização de vários dos seus grupos hidroxilas adjacentes (orto-difenóis) em vários locais dos anéis aromáticos, além da presença de grupos oxo ($-C=O$), permitindo a doação de elétrons ou de moléculas de hidrogênio. Assim, é importante que se identifique e quantifique a concentração de flavonoides nos alimentos. Apesar de a literatura apresentar dados sobre alguns alimentos, a concentração destes compostos em algumas plantas varia de acordo com a cultura, o tempo, o clima, o grau de maturação, o processamento e a armazenagem (SILVA, 2015b).

Para a identificação dos compostos fenólicos totais e flavonoides e outras substâncias orgânicas, existem vários métodos de extração. Uma alternativa interessante para a caracterização destes compostos bioativos é a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), processo que utiliza de separação de componentes presentes em uma fase móvel e em uma fase estacionária. Assim, ao adicionar a amostra no cromatógrafo, os componentes são distribuídos entre as duas fases. Os componentes terão um deslocamento maior ou menor de acordo com o efeito das fases sobre si. Sua velocidade pelo sistema é determinada pelo equilíbrio de distribuição. A cromatografia utiliza de pequenas colunas, com materiais específicos para o deslocamento e uma fase móvel que é utilizada em eluição a pressões altas. Além de compostos fenólicos, a técnica também

é utilizada em quantificação de açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, proteínas e outros compostos. A separação e quantificação de diversos tipos de amostras em análises demoram poucos minutos, com alta resolução, eficiência e sensibilidade (SKOOG *et al.*, 2002).

É importante que na CLAE a fase móvel seja líquida, com elevado grau de pureza e a capacidade de arrastar os componentes sem deteriorá-los, não dissolver ou reagir com a fase estacionária, além de ser compatível com a coluna e não ser tóxica. A fase móvel também precisa ter baixa viscosidade para não comprometer a transferência de massa com a fase estacionária e também ter a polaridade apropriada para o arraste dos componentes. É mais comum que a fase móvel seja uma composição única, embora algumas amostras exijam uma fase móvel variável, chamada gradiente (SKOOG *et al.*, 2002).

A fase estacionária deve ter como características a resolução na separação da mistura, ser de fácil introdução na coluna, produzir baixas quedas de pressão e ter baixo custo. As partículas na coluna não devem exceder 40 µm e possuir a maior uniformidade possível. Quanto menores as partículas, maior será a eficiência da leitura, já que as distâncias de contato entre a fase móvel e a fase estacionária são reduzidas. O material mais utilizado é a sílica, podendo ter vários grupos funcionais ou camadas poliméricas em sua superfície (SILVA, 2018).

No café, vários fenólicos são responsáveis por contribuir com o sabor e com o aroma da bebida. A atividade antioxidante também recebe destaque, no que diz respeito às propriedades fisiológicas e farmacológicas do café. Dentre os compostos mais importantes, destacam-se os ácidos clorogênicos, mais presentes no café verde (ABRAHÃO *et al.*, 2010).

Abrahão *et al.* (2010) notaram que o café verde possui mais compostos fenólicos, se comparado com a mesma bebida no café torrado. A bebida rio – tida como de menor qualidade – possui mais fenólicos que a bebida mole para todo tipo de processamento. No entanto, a bebida mole apresenta menor perda de fenólicos entre o processamento verde e o torrado. Operações unitárias com o café, portanto, podem interferir na quantidade destes compostos bioativos.

2.3 Secagem

A secagem é muito utilizada para que não haja deterioração no período de armazenamento do material, através da redução de atividade de água, reduzindo a atividade microbológica e química no material seco. A secagem também tem, em alguns casos, como objetivo a redução de volume, que desonera operações industriais como transporte, distribuição e embalagem (SILVA, 2015a). A secagem é a maneira mais antiga de preservar um alimento. Na antiguidade conservava-se materiais com a utilização de sal ou exposição ao sol e ao vento (SILVA, 2017).

A operação de secagem consiste em remover certa quantidade de água de um material através das transferências de massa e de calor, causadas pela presença de ar quente e insaturado, para atingir um valor desejável (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; NOGUEIRA, 2016). A taxa destes fenômenos depende de vários fatores, como a diferença de temperatura, diferença de umidade, fluxo e direção do ar, pressão, características de sorção, a forma e outras propriedades físicas do material. Para ocorrer a evaporação da água, é necessário que a pressão parcial do vapor d'água no material a ser seco seja maior que a pressão parcial de umidade no ar. A transferência de calor ocorre de fora para dentro do material (NOGUEIRA, 2016; REIS *et al.*, 2011). Já a transferência de massa ocorre de dentro para fora, devido ao gradiente de concentração de vapor d'água nos poros (MUJUMDAR, 2006).

A secagem natural de grãos a céu aberto possui certas desvantagens, como dificuldade no controle da operação, maior susceptibilidade de contaminação, como poeira, detritos e agentes patológicos, assim como a deterioração, caso haja precipitação sobre o material a ser seco. Além disso, a população mundial cresceu ao longo do tempo, exigindo maior volume de alimentos secos. Assim, ao longo da história foram desenvolvidas técnicas de secagem mais rápidas e eficientes, como secagem utilizando mecanismos condutivo ou convectivo, em que são empregados diferentes modelos de secadores, como secadores de bandeja, secadores rotatórios, secadores de esteira, secadores de leito fluidizado, *spray dryers*, secadores por liofilização, desidratação osmótica, dentre outros (SEADER; HENLEY, 2006).

Estes secadores, no entanto, possuem alto custo de operação, uma vez que empregam combustíveis fósseis ou eletricidade para seu funcionamento, onerando sua

implementação e utilização, impactando, assim, o custo do produto final. Em contrapartida, permitiu-se que menos alimentos fossem perdidos durante o processo de secagem, por contaminação, deterioração ou má conservação, incrementando o volume de alimentos disponíveis para a população (SILVA, 2017).

Quase todo processo industrial tem uma operação de secagem. Indústrias como a alimentícia, a farmacêutica, química e agrícola são bastante dependentes desta etapa, especialmente da tecnologia, já que muitos dos produtos destas indústrias são bastante sensíveis à temperatura, por isso a secagem deve manter as características sensoriais, medicinais e nutricionais dos produtos.

A taxa de secagem é a variação da perda de umidade de um material por unidade de tempo. Vários são os fatores que interferem na taxa de secagem, no tempo de secagem e na umidade final do produto. Características do material, como tamanho, geometria, disposição dos poros, propriedades físicas, bem como a disposição do material no secador (em bandejas, tubos ou camadas), propriedades físicas do ar (temperatura, umidade relativa, velocidade) e o modelo de secador são fatores que podem alterar a taxa de secagem de modo geral.

A taxa de secagem é dividida em três fases distintas: período de indução ou estabilização, período de taxa constante (caracterizada pela igualdade entre as transferências de calor e de massa) e período de taxa decrescente (equilíbrio da umidade com o ar e aumento da temperatura). Na Figura 2.7 a e b, é possível avaliar estes períodos em função da umidade reduzida e da taxa de secagem, respectivamente.

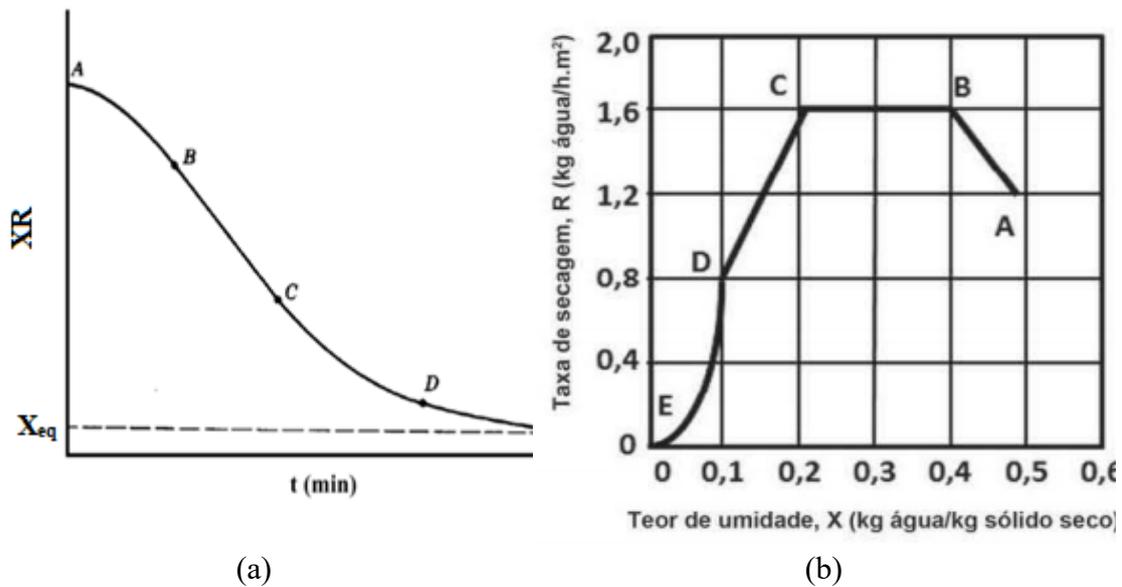


Figura 2.6 – (a) Curva característica da cinética de secagem (SILVA, 2017) e (b) curva de taxa de secagem (GEANKOPLIS, 1993).

Geralmente, o primeiro período (de A a B) é muito rápida, consistindo na adaptação da temperatura do grão com o ar de secagem. O segundo período (de B a C) ocorre quando a transferência de calor se iguala à transferência de massa, ou seja, a umidade retirada da superfície pela transferência de calor é repostada pela transferência de umidade do interior para a superfície até se atingir a umidade crítica do material, na qual a convecção do ar controla. No terceiro período, de C a D, impera a transferência de massa interna de água e vapor, removendo umidade do seu interior. No último período (de D a E), a taxa de secagem tende a zero, uma vez que o material se aproxima da umidade de equilíbrio (X_{eq}), igualando a pressão de vapor de água no ar com a pressão de vapor da água do material. Este período é puramente difusivo (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

Vários modelos têm sido propostos em pesquisas para descrição da cinética de secagem. Estes modelos possuem três naturezas. Eles podem ser empíricos, semi-empíricos e teóricos. No caso dos modelos empíricos há a possibilidade de bom ajuste, modelagem matemática simples, se comparado aos semi-empíricos ou teóricos. No entanto, são limitados à faixa experimental da pesquisa, além de possuir aplicações

específicas e não conterem informações relacionadas ao fenômeno de transporte (MOREIRA, 2000).

Os modelos semi-empíricos possuem certa fundamentação teórica e conseguem descrever a dependência da secagem com a temperatura, umidade relativa e pressão, podendo possuir até mesmo uma solução analítica. Todavia, não são indicados para materiais mais espessos e algumas das fundamentações teóricas são questionáveis (MOREIRA, 2000).

Alguns modelos semi-empíricos de secagem de grãos e sementes levam algumas hipóteses como simplificação: teor de umidade uniforme em todo o material, difusão radial simétrica, teor de umidade na superfície atinge o valor de equilíbrio de maneira instantânea, coeficiente de difusão convectivo constante, consideração de que os grãos são esféricos e idênticos de raio idêntico e que não há encolhimento da partícula ao longo do tempo (SILVA, 2014). Já os modelos teóricos possuem fundamentação mais rigorosa, além de permitirem extrapolações à faixa experimental, expressando a relação entre as variáveis de interesse. Contudo, possuem resolução muito complexa, exigindo alto esforço computacional, além de poderem depender de parâmetros desconhecidos ou de difícil medida (MOREIRA, 2000).

Vários modelos semi-empíricos foram propostos na literatura, como o modelo de Lewis *et al.* (1921), análogo à lei de resfriamento de Newton, ou os modelos de Brooker *et al.* (1974) e Henderson e Henderson (1968), que são simplificações da solução analítica do modelo difusivo, em que apenas o primeiro termo é considerado em Brooker *et al.* (1974) e o segundo em Henderson e Henderson (1968) (BARROZO, 1995).

Quanto a cinética de secagem em secadores de bandeja, Santos, Bonomo e Chaves (2010) notaram que o modelo de secagem de Page foi o mais adequado para a descrição da cinética de secagem da carambola (*Averrhoa carambola*). Perceberam, também, que maiores temperaturas levam a menores tempos de secagem, bem como maiores taxas de secagem para a carambola (*Averrhoa carambola*), conclusão semelhante à de Couto (2015) para o pequi (*Caryocar brasiliense*) e para o araticum (*Annona montana*). Duzzioni *et al.* (2013) mostram que o modelo cinético de Overhults melhor modelo para secagem de resíduo de acerola. Para a pimenta dedo-de-moça, Vêras (2010) notou que os modelos de Lewis, Brooker e Page representam de maneira adequada. Castillo Téllez *et*

al. (2018) mostram que o modelo exponencial de dois termos (Equação 2.6) está entre os melhores para a secagem de stevia. Para o café arábica (*Coffea arabica*), Alves *et al.* (2013) notaram que o modelo que melhor descreve a cinética de secagem é o de Page. A Tabela 2.2 mostra alguns modelos empregados pela Literatura.

Tabela 2.2 – Modelos semi-empíricos de secagem.

Referência	Modelo	Equação
Lewis <i>et al.</i> (1921)	$X_R = \exp(-kt); k = A_0 \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	(2.1)
Page (1949)	$X_R = \exp(-kt^n); k = A_0 \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	(2.2)
Henderson e Henderson (1968)	$X_R = A \left(\exp(-kt) + \frac{1}{9} \exp(-9kt) \right); k = A_0 \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	(2.3)
Overhults <i>et al.</i> (1973)	$X_R = \exp(-(kt)^n); k = \exp\left(A_0 + \frac{B}{T_f}\right)$	(2.4)
Brooker <i>et al.</i> (1974)	$X_R = A \exp(-kt); k = A_0 \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	(2.5)
Sharaf-Elden <i>et al.</i> (1980)	$X_R = A \exp(-kt) + (1-A)$	(2.6)

Algumas variáveis possuem grande importância na secagem, como a umidade relativa do ar, a umidade de equilíbrio do material e atividade de água, podendo interferir também no parâmetro k da equação cinética, que diz respeito à velocidade que a secagem ocorre e é afetado pela difusividade efetiva da umidade no grão (NOGUEIRA, 2016).

A umidade relativa do ar (U_R) é a razão da pressão de vapor de água encontrada na atmosfera ($P_{V,atm}$) e a pressão de vapor nas condições saturadas (P_S) a uma mesma temperatura e pressão, conforme a Equação 2.7.

$$U_R(\%) = \frac{P_{V,atm}}{P_S} \quad (2.7)$$

A umidade de equilíbrio é definida como a umidade que o material pode atingir em equilíbrio com a umidade relativa do ar, ou seja, a umidade de equilíbrio ocorre quando a pressão de vapor de água no sólido se iguala à pressão de vapor de água que o ar carrega (BARROZO, 1995). Também representa o valor mínimo de umidade que o

sólido pode ter nas condições de secagem, como temperatura e pressão (NOGUEIRA, 2016).

A atividade de água (a_w) é um parâmetro que relaciona a pressão de vapor da água em equilíbrio sobre o alimento (P_V) e a pressão de vapor da água no estado puro (P_S) à mesma temperatura, como mostra a Equação 2.8. Numericamente, a atividade de água, expressa em porcentagem, é igual à umidade relativa de equilíbrio do ar. O parâmetro é importante para avaliar a atividade biológica e as transformações físicas de um corpo (SILVA, 2017).

$$a_w = \frac{P_V}{P_S} \quad (2.8)$$

A água é uma substância presente, seja como solvente ou como reagente, na maioria das reações químicas e enzimáticas que são importantes para a preservação do alimento, mas também para sua deterioração. Na presença de certa concentração de água, reações internas ocorrem, com origem do próprio organismo ou microbiana, podendo deteriorar o produto. Assim, faz-se necessário um controle de qualidade do material, garantindo-lhe boas características sensoriais e vida útil longa (SILVA, 2014).

A água presente em um corpo é dividida em dois grupos: a água livre e a água combinada. A primeira é a água presente nos poros, passível de retirada ou reação com possíveis agentes. A segunda é a água presente nas próprias moléculas do material, como em macromoléculas (pectina, amido, celulose e proteínas), não podendo ser retirada ou contabilizada em métodos de determinação de umidade (SILVA, 2014).

As reações que podem acontecer na presença de água são reações de oxidação lipídica, escurecimento não enzimático, atividade enzimática, desenvolvimento microbiano, bem como mistura de alimentos com diferentes valores de atividades de água e sistemas de embalagem. A água participa de várias ações celulares, como o aumento da mobilidade enzimática, estabilização de estruturas e configuração enzimática, além de ser reagente em reações de hidrólise (SILVA, 2017).

Quanto ao comportamento microbiano, bactérias halófitas, leveduras e fungos xerofílicos possuem maior exigência de água, podendo crescer em ambientes com atividade de água acima de 0,75. Alguns microrganismos específicos crescem à atividade

de água de 0,65. Fungos conseguem se desenvolver com atividade de água acima de 0,6. Abaixo deste valor, dificilmente algum crescimento microbiano ocorre (AFONSO JÚNIOR *et al.*, 2003; SILVA, 2014).

2.4 Energia solar

Define-se energia solar como aquela energia proveniente da luz e do calor do Sol. É uma energia limpa, não poluente, renovável, tida inesgotável do ponto de vista humano, que pode ser utilizada em várias situações do cotidiano, como na produção de energia elétrica por placas fotovoltaicas, no preparo de alimentos como em fogões solares, na produção de combustíveis, através da pirólise solar, para aquecimento solar e arquitetura solar, dentre outras aplicações (PORTAL SOLAR, 2015). A irradiação emitida pelo Sol é de aproximadamente 63 MW/m^2 , no entanto, devido à curvatura da Terra, à interação dos raios solares com a atmosfera, nem toda irradiação solar atinge à superfície, que chega a receber até 1 kW/m^2 de insolação (ANDRADE; BARROZO; VIEIRA, 2016).

A transformação de energia solar em energia utilizável é dividida em duas categorias. A primeira é a transformação direta, na qual se necessita apenas de uma etapa para a captura e utilização da energia solar, como por exemplo as placas fotovoltaicas. A segunda é a transformação indireta, que necessita de mais de uma etapa de transformação para a utilização, a exemplo da energia heliotérmica, que possui espelhos parabólicos para a concentração dos raios solares em tubos com água, geração de vapor e posterior movimentação de turbinas (PORTAL SOLAR, 2015).

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é categorizada em dois tipos. A radiação solar direta não possui desvios nem interação com a atmosfera. A radiação solar difusa é a parcela que compreende os raios solares que são espalhados ou absorvidos por gases, nuvens, poeiras em suspensão e outros elementos contidos na atmosfera (ANDRADE, 2015).

A energia solar no Brasil é bastante promissora, uma vez que, devido à localização geográfica do país, próxima do Equador e dentro das chamadas *Sunbelts*, ou *sunny belts*, associada com seu tamanho territorial, possui uma das maiores recepções de energia solar do planeta, havendo um potencial solar de aproximadamente $1,13 \times 10^{10}$ GWh em média durante o ano (ANDRADE, 2015; BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

A Figura 2.6 mostra a distribuição de radiação solar no Brasil, e como comparação, a Europa. A região do Vale do Rio São Francisco é a região de maior insolação do país e possui bastante potencial para desenvolvimento de projetos solares. A região do Triângulo Mineiro também possui alta radiação solar anual e pode ser aproveitada para vários propósitos. Na Europa, apenas algumas regiões do mediterrâneo possuem insolação comparável com o Brasil.

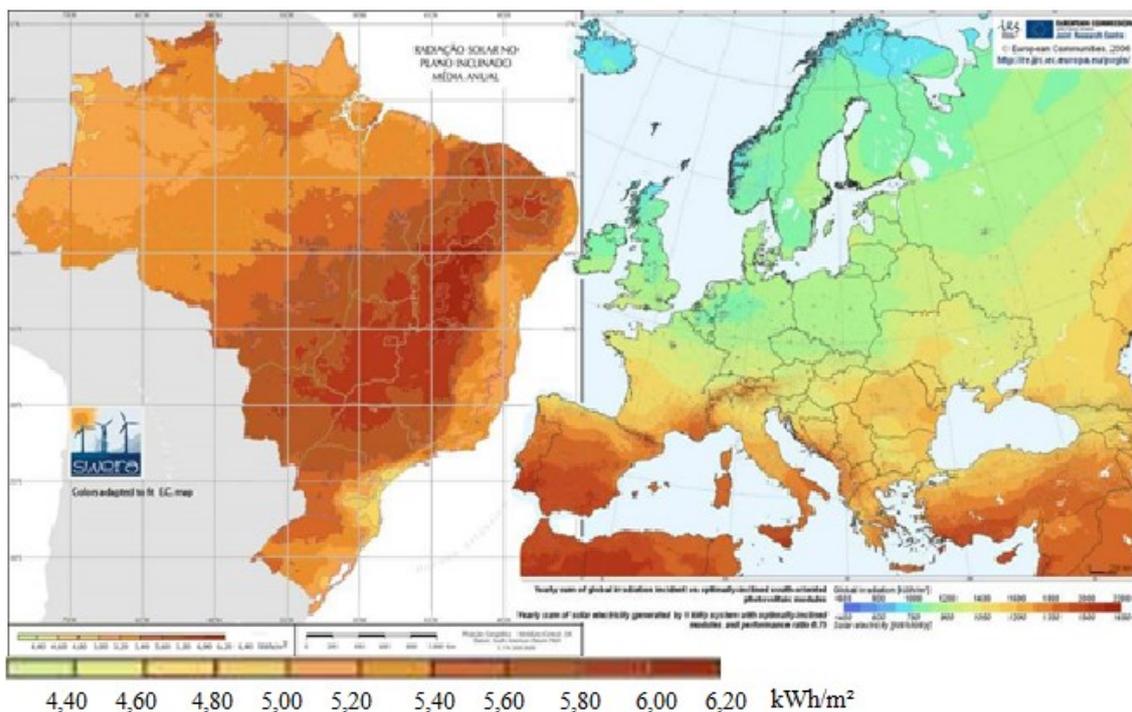


Figura 2.7 - Índice de emissão solar no Brasil e na Europa (PORTAL SOLAR, 2015).

2.5 Secagem solar

Embora possua bastantes intempéries, a secagem solar a céu aberto ainda é a mais utilizada no mundo para grãos, especialmente em países tropicais. No entanto, esta não é a única maneira de se secar utilizando a energia solar. Novas configurações de secadores solares têm sido desenvolvidas ao longo do tempo. Em geral, a secagem solar pode ser dividida em secagem solar de exposição direta e secagem solar de exposição indireta (MUSTAYEN; MEKHILEF; SAIDUR, 2014; SILVA, 2017).

A secagem solar é recomendada para produtos agrícolas que possuem volumes pequenos a médios de colheita, a fim de se preservar o excesso de produção por mais tempo. A secagem solar é limpa, não utiliza combustíveis fósseis nem polui o ar, além de ser menos dispendiosa que secagens mecânicas a combustíveis ou eletricidade. Em escala

comercial, em agricultura familiar, é bastante utilizada para frutos, vegetais, ervas aromáticas, madeira, entre outros produtos (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

Secadores solares com exposição direta, também chamados de secadores solares passivos são aqueles cuja configuração permite que o produto receba diretamente a radiação solar. São bastante utilizados em países com alta radiação solar. Geralmente feitos de metal ou madeira, são isolados termicamente e cobertos por uma superfície transparente, como vidro ou acrílico, a fim de gerar um efeito estufa. Possuem abertura para entrada e saída de ar (MUSTAYEN; MEKHILEF; SAIDUR, 2014; SILVA, 2017).

Esses secadores possuem simples funcionamento: a radiação solar incide sobre o coletor solar, que aquece o ar entrando em contato com o material, retirando parte de sua umidade. O ar pode se movimentar naturalmente devido ao gradiente de densidade pelo efeito térmico, ou por convecção forçada, utilizando sopradores ou ventiladores. Geralmente o ar entra por baixo e sai por cima do coletor. A radiação solar também é absorvida pelo material a ser seco e pelo coletor, na forma de energia térmica, sendo outra parte refletida. O material transparente, então, dificulta sua saída, formando um efeito estufa, aumentando ainda mais a temperatura na secagem (SILVA, 2017). Recomenda-se pintar o secador de preto fosco, para maior absorção de calor. Além disso, o secador deve ter uma inclinação igual à latitude do local de secagem (LIMA *et al.*, 2006; PINHO; GALDINO, 2014).

Os secadores de exposição direta, entretanto, geralmente possuem baixa capacidade e pode levar ao superaquecimento do produto, que pode ser prejudicial às características sensoriais e nutricionais do material (MUSTAYEN; MEKHILEF; SAIDUR, 2014).

Secadores solares de exposição indireta, ao contrário dos anteriores, não permitem que a radiação solar atinja diretamente o produto. Possuem duas partes: o coletor solar plano e a câmara de secagem. Podem vir acompanhados de um soprador ou não. Podem atingir altas temperaturas com vazões controladas de ar, se utilizado com convecção forçada. O coletor possui características semelhantes ao coletor de exposição direta, com os mesmos materiais, sendo pintado de preto fosco, possuindo isolamento térmico e cobertura transparente, além de abertura para entrada de ar e inclinação semelhante à latitude do local de secagem. Entretanto, ao contrário do secador de exposição direta, a

saída do coletor é acoplada a uma câmara de secagem, também feita de madeira ou metal com isolamento, onde o produto é depositado em bandejas perfuradas, fazendo com que haja um fluxo cruzado de ar com o material a ser seco. O ar úmido sai por uma abertura no alto da câmara de secagem, que é acoplada a um sistema de exaustão eólico, elétrico ou fotovoltaico (MACHADO, 2009).

Ainda é possível encontrar secadores solares de configuração mista e secadores solares híbridos. Os secadores mistos são aqueles em que há a utilização de ambas as configurações: secagem solar direta e indireta. A câmara de secagem permite a entrada de radiação solar para auxílio da secagem do material. Possuem a maior taxa de secagem e atingem a temperatura ideal mais rapidamente. No entanto, são mais caros e mais complexos. Os secadores híbridos são aqueles que usam a energia solar acoplada com outra fonte de energia, tal como a energia elétrica, biomassas ou combustíveis fósseis, para melhor aplicação do calor. Na ausência de energia solar, os secadores mantêm o funcionamento, reduzindo o risco de perda de qualidade e reumidificação do produto. Além disso, é menos dependente do clima. Entretanto, exigem outras fontes de combustível, o que pode onerar o processo, encarecendo o produto final (EL HAGE *et al.*, 2018).

Alguns tipos de secadores empregam aquecimento indireto do ar, utilizando um material intermediário, como a água, que pode ser inserida em tubos, localizados em focos de paraboloides concentradores de raios solares. A água aquecida, então, pode trocar calor com o ar através de um trocador de calor, e o ar é aquecido. Na sequência, o ar aquecido pode entrar em contato com o material a ser desidratado (CASTILLO TÉLLEZ *et al.*, 2018).

Castillo Téllez *et al.* (2018) avaliaram a diferença entre o secador solar de exposição direta e de exposição indireta para secagem de stevia (*Rebaudiana bertonii*) e chegaram à conclusão que a secagem é mais efetiva por exposição indireta, permitindo uma maior manutenção das propriedades iniciais do produto, porém, com maior uso de energia elétrica.

2.6 Secagem de café

A secagem do café é uma das mais importantes operações da pós-colheita deste produto, pois a diminuição do teor de água do grão reduz o risco de atividade de microrganismos e de reações enzimáticas e evita a perda de qualidade e de nutrientes do café (REIS *et al.*, 2011). A transferência de umidade é feita do interior do grão para fora. No café, a umidade no interior deve migrar pelo pergaminho, pela polpa e pela casca. Isso gera uma diferença de concentração entre o exterior da casca e o interior do pergaminho. Assim, o que limita o processo de secagem são as resistências do pergaminho e da casca (SFREDO, 2006).

Quando se avalia a secagem dos grãos de café, o encolhimento é um fator que pode ser considerado, uma vez que o grão, ao perder umidade, encolhe. Tal fenômeno é um dos maiores empecilhos para o desenvolvimento de modelos matemáticos para a secagem do grão. O formato de um grão de café se aproxima de um elipsoide. Assim, é de praxe que o grão seja medido em três eixos, o maior, o médio e o menor, utilizando um grão esférico de diâmetro equivalente para o cálculo do encolhimento. Este procedimento é bastante comum em vários produtos agrícolas (AFONSO JÚNIOR *et al.*, 2003; BURMESTER; EGGERS, 2010; SFREDO, 2006).

A secagem de café em terreiros emprega a ação dos raios solares sobre o grão. Entretanto, é uma técnica bastante difícil de se lidar, pois há o contato do café com animais, especialmente insetos, pássaros e roedores, além do contato com o vento, que carregam poeira e potenciais agentes patológicos ao grão e ao consumidor, reduzindo, portanto, a qualidade do produto final (DONG *et al.*, 2017; SFREDO, 2006; SILVA, 2017). Além disso, é altamente dependente do clima, pois se houver precipitação sobre o café, há grandes possibilidades de o grão ser lesado. Outros fatores negativos dos terreiros são a necessidade de grandes áreas nobres para espalhamento dos grãos e a grande quantidade de mão de obra necessária para sua manutenção (REIS *et al.*, 2011).

De acordo com Reis *et al.* (2011), o tempo médio para a secagem do café em terreiros é de 15 dias, nas regiões do Alto Paranaíba, Triângulo Mineiro e Sul de Minas, ao passo que dura 20 a 30 dias na região da Zona da Mata Mineira. Os autores também destacam que o café pode ser armazenado com segurança com aproximadamente 18% de

umidade em base úmida e que, em condições de alta umidade do ar, da falta de insolação e de arejamento, o café que passa muitos dias sem secar no terreiro tende a apodrecer.

A secagem com ventilação forçada ou mecânica possui classificações, de acordo com a temperatura de secagem, da seguinte maneira (REIS *et al.*, 2011):

- Secagem não-aquecida, com ar natural;
- Secagem à baixa temperatura, com o ar aquecido até 10°C acima da temperatura ambiente;
- Secagem a alta temperatura, com o ar aquecido acima de 10°C acima da temperatura ambiente;
- Secagem combinada, ou de sistema combinado, em que se utilizam os dois métodos de alta e baixa temperatura;
- Seca-aeração.

A secagem de café é a operação de preparo do café com maior importância, uma vez que ela pode influenciar a qualidade final da bebida, pois a elevada temperatura do grão pode deteriorar compostos importantes para as propriedades sensoriais: aroma, sabor, aspecto e cor (REIS *et al.*, 2011; SFREDO, 2006). Silva *et al.* (2000) relatam que a temperatura do ar de secagem pode ser mantida a 40°C por até dois dias, a 50°C por algumas horas e a 60°C em torno de 1 h sem que o grão se danifique. A temperatura recomendada para a secagem do café é de 45°C (SFREDO; FINZER; LIMAVERDE, 2005).

A secagem mecânica ainda é pouco utilizada, uma vez que exige maior conhecimento técnico, o que justifica o maior uso da técnica de secagem em terreiros (REIS *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2000). De acordo com Reis *et al.* (2011), levantamentos feitos no Estado de Minas Gerais, menos de 17% dos cafeicultores possuem secadores mecânicos em seu acervo. A maior parte do café costuma ir para cooperativas, que armazenam e revendem para consumo interno ou externo. Embora seja mais onerosa, em geral, do que a secagem em terreiros, a secagem mecânica possui algumas vantagens: ser processada de maneira independente do clima, possui maior capacidade de programação das operações e possui um tempo de secagem menor (REIS *et al.*, 2011; SFREDO, 2006).

O motivo de maior oneração à secagem de café em secadores mecânicos é o gasto com combustíveis e mão de obra mais qualificada. Neste sentido, muito tem se estudado sobre o consumo e racionamento de energia. O custo da energia é altamente dependente da temperatura de secagem, do fluxo de ar, do tempo de secagem e do preço do combustível (REIS *et al.*, 2011).

Alguns secadores mecânicos possuem destaque no que se refere à secagem de café. O secador de leito fixo utiliza lotes de 40 a 60 cm, para não haver grande gradiente de umidade dentro do secador. Além disso, é importante que haja revolvimento do secador a cada 3 h, o que pode ser um empecilho à operação. Ele permite uma secagem mais rápida, até 55°C sem comprometer a qualidade da bebida, sendo esta superior a qualquer produto seco em terreiro (REIS *et al.*, 2011).

Outro secador em destaque é o secador rotativo, que leva o café para a parte elevada com um transportador e a gravidade o leva para a parte mais baixa. O fluxo de ar em corrente ou contracorrente seca o lote de grãos. A secagem é bastante uniforme e serve como pré-limpeza. Todavia, a baixa eficiência energética é um lado negativo do secador rotativo (REIS *et al.*, 2011).

Uma técnica bastante utilizada na secagem é a chamada seca-aeração, feita após a secagem em secadores mecânicos. A seca-aeração consiste em resfriar o grão a temperatura ambiente, com aeração forçada, após secagem em altas temperaturas. O objetivo da técnica é fazer com que haja maior redistribuição da umidade no grão, ou seja, deslocamento da umidade do interior do grão para a superfície, fazendo com que haja maior desempenho energético na secagem. O período de descanso do grão varia de 6 a 10 horas e utiliza da energia residual no grão para retirar uma parte da umidade (SILVA *et al.*, 2000).

Dong *et al.* (2017) avaliaram diversas técnicas de secagem de café, para avaliar a manutenção de compostos bioativos, ácidos graxos, coloração e volatilidade. Notaram que a secagem produz um escurecimento por reações de Maillard, sendo maior em secagens por liofilização. Maiores lipídios também foram encontrados em secagens por liofilização e pela secagem solar, que também foi responsável pelos maiores teores de cafeína, trigonelina e proteínas. A secagem por liofilização também permitiu as maiores manutenções de ácidos orgânicos.

2.7 Secador de bandejas

Outro secador que possui significativa utilização é o secador de bandejas. Ele pode ser operado em várias configurações. A alimentação do ar quente pode ser feita de várias formas, seja por uma bomba de calor, um soprador eletrotérmico, por convecção natural ou forçada, utilizando energia solar, entre outras configurações. Pode ser feito em bandejas vibratórias, como modo de homogeneizar o material a ser seco e conseguir secar mais rapidamente, embora gaste mais energia ao se aplicar a vibração (SFREDO, 2006). Secadores de bandeja também podem ter configuração de fluxo cruzado ou paralelo, a depender da disposição do ar com o material (MUSTAYEN; MEKHILEF; SAIDUR, 2014).

Em geral, em fluxo cruzado, as bandejas dos secadores são perfuradas, para permitir a passagem de ar através do material. Bandejas também podem ser dispostas em camadas, a fim de se aproveitar o potencial de retirada de umidade do ar. Para tal, em algumas situações, é necessário alternar a posição dos materiais na câmara de secagem, para garantir uma secagem mais uniforme (SFREDO, 2006; SILVA, 2017). Além disso, a secagem em bandejas pode utilizar uma recirculação do ar de secagem, a fim de se aproveitar o máximo da energia disponível (DONG *et al.*, 2017; KUMAR; SANSANIWAL; KHATAK, 2016; SFREDO, 2006).

Há duas circunstâncias diferentes para serem utilizadas numa secagem de bandeja. A primeira se trata de iniciar a secagem com o material dentro do secador, possuindo uma parte transiente de aquecimento. A segunda consiste em esperar o secador entrar em condições ideais de temperatura e circulação de ar para então inserir o material a ser desidratado. Além do mais, algumas vezes a distribuição e temperatura do ar de secagem não são uniformes, fazendo com que a distribuição de umidade se afaste da uniformidade. Para isso, faz-se uso de alterar a posição da bandeja de tempos em tempos, o que pode ser trabalhoso e prejudicial à secagem (MACHADO, 2009).

2.8 Secagem solar utilizando secador de bandejas

A secagem solar de bandejas possui algumas vantagens em relação à secagem convencional de bandejas, especialmente ligadas ao aquecimento do ar de secagem, uma vez que a energia que a alimenta é bastante abundante e de baixo custo.

Secadores solares indiretos, como o secador solar de bandeja, permitem que haja maior uniformidade na umidade dos grãos, pois conseguem distribuir melhor o ar na câmara de secagem, se comparado com secadores solares diretos. Em consequência disso, permitem menor tempo de secagem, menor área superficial de secagem e também que o produto seja armazenado por maior tempo. Ademais, para recarregar a bandeja, não há necessidade de parar o processo de secagem, incrementando a produtividade do secador (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

Silva (2017) utilizou de um secador de bandejas acoplado a um coletor solar para avaliação da eficiência de secagem da pasta da microalga *Spirulina platensis*. Notou que a convecção forçada leva a tempos menores de secagem, além de notar que a convecção forçada que combinava a maior vazão com a menor carga mássica também levava a um menor tempo de processo. Notou que ao se aumentar a vazão volumétrica de ar de secagem determinou uma menor temperatura máxima de ar de secagem e que o modelo semi-empírico de cinética de secagem que mais se aproxima do observado para a microalga é o modelo de Page.

Silva (2017) também percebeu que os valores de fenólicos foram menores para a convecção forçada, se comparada com a convecção natural, devido à degradação térmica. Não houve diferença significativa entre os teores de flavonoides entre as convecções forçada e natural. No entanto, o autor observou que em alguns testes de secagem os valores de flavonoides após a secagem foram maiores que aqueles encontrados na *Spirulina in natura*. Isso se deve a reações de Maillard que podem ocorrer durante a secagem, além da inibição de enzimas que degradam os compostos bioativos. No entanto, alguns outros testes tiveram redução do valor de flavonoides, explicado pela degradação térmica do composto.

Dong *et al.* (2017) notaram que secadores solares indiretos de bandejas são os que garantem maior qualidade de lipídios e proteínas no café robusta, bem como para a cafeína e a trigonelina, se comparados a outras técnicas, como secagem a temperatura ambiente, secagem com bomba de calor, secagem a ar quente utilizando um soprador eletrotérmico e secagem congelada a vácuo, com pressão absoluta de 40 Pa. Baixos valores de alteração de cor foram vistos com o secador solar em comparação aos outros. A secagem solar, também, apresentou baixos valores de ácidos graxos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão relatados os materiais utilizados e os procedimentos utilizados para o estudo experimental.

3.1 Café

O café utilizado no trabalho foi doado pela Cooperativa Regional dos Cafeicultores de Guaxupé, na filial situada no município de Monte Carmelo (MG). O fruto é da espécie Arábica (*Coffea arabica*), variedade Novo Mundo. Após a colheita, fez-se uma separação de galhos, pedras, terras e folhas. Após essa separação, o café foi levado para uma catação, em que cafés verdes foram removidos, por serem de pior qualidade. O café, então, levado em sacas de juta para o Laboratório de Separação e Energias Renováveis da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (LASER/FEQUI/UFU), foi separado em lotes, selado e vedado, sendo armazenado em um *freezer* a -4°C . A umidade inicial do café foi aferida em estufa a 105°C , conforme descrito na *Association of Official Analytic Chemists* (AOAC, 1995).

3.2 Descrição do secador solar

O secador solar foi construído durante a pesquisa de Silva (2017) e está apresentado na Figura 3.1. Consiste em um secador solar com exposição indireta combinado, com convecção natural ou forçada, conforme a intenção do operador. O secador era composto por três partes distintas, um coletor solar, uma câmara de secagem e um exaustor eólico. O secador possuía quatro pés de 0,9 m de altura e rodízios nas extremidades, para facilitar sua movimentação.

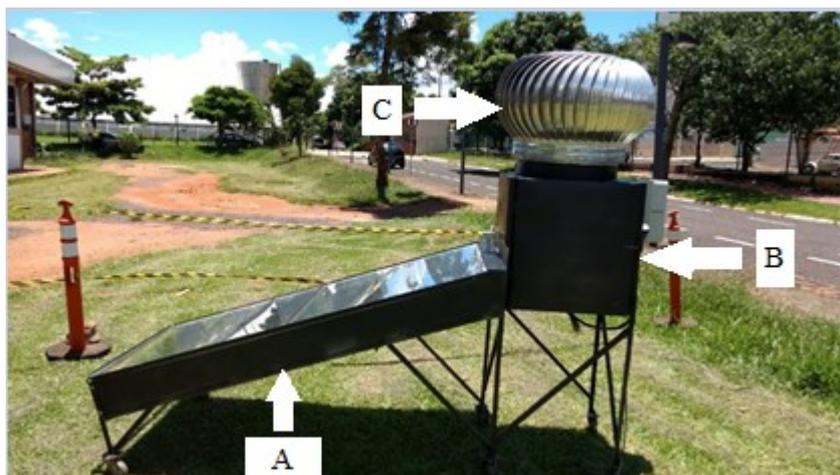


Figura 3.1 – Vista lateral do secador solar de exposição indireta: (A) coletor solar, (B), câmara de secagem e (C) exaustor eólico (SILVA, 2017).

O coletor solar (Figura 3.2) possuía 2 m de comprimento por 1 m de largura e 0,2 m de altura. Possuía uma inclinação de 18° em relação ao solo, equivalente à latitude de Uberlândia em relação à linha do Equador (PINHO; GALDINO, 2014). Para a base e laterais do coletor, foram utilizadas chapas de aço galvanizado 26 e cantoneiras de aço $1/8'' \times 1,5$ cm. A parte superior do coletor foi feita com vidro transparente de 4 mm de espessura. O isolamento térmico foi feito utilizando lã de vidro de 0,025 m de espessura na base e isopor de 0,025 m de espessura nos lados esquerdo e direito. A entrada de ar situa-se na face anterior do coletor, a 0,3 m do chão. Foram colocadas seis chapas de aço como divisórias transversais, com 0,63 m de comprimento e 0,2 m de altura dentro do coletor solar, igualmente espaçadas, para que se aumente o tempo de residência do ar dentro do secador, fazendo com que haja maior aquecimento, além de evitar a formação de canais preferenciais durante seu escoamento. A base, as laterais, o fundo e as chapas de aço foram pintadas de preto fosco para melhorar a absorção de radiação solar incidente.

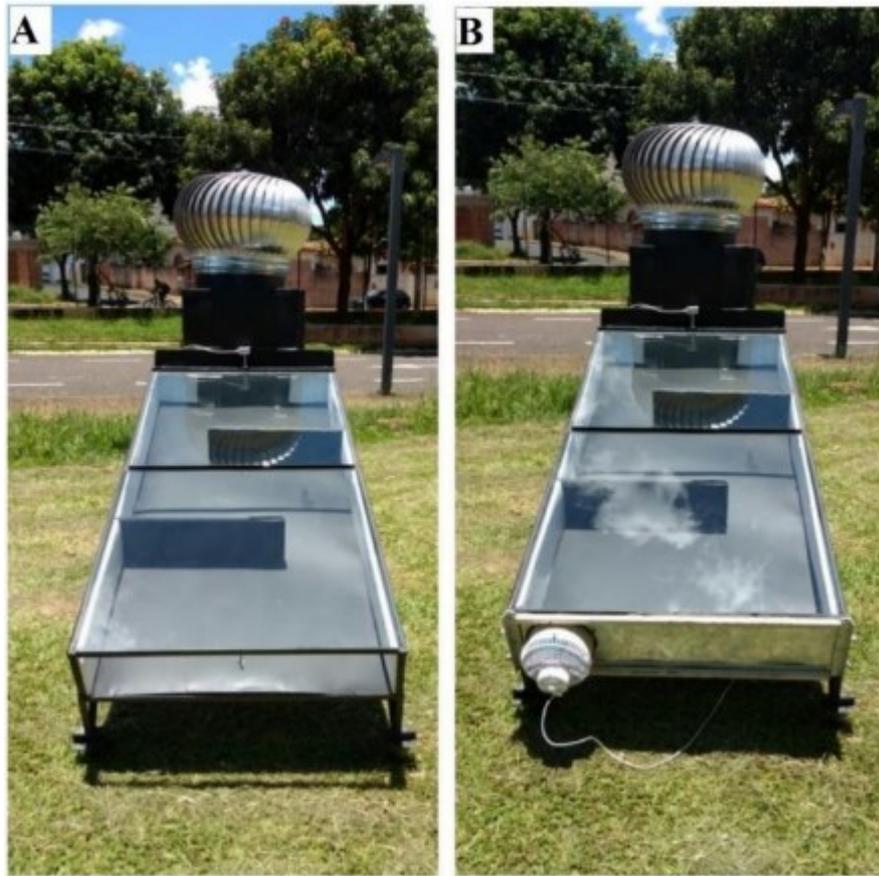


Figura 3.2 – Vista frontal do coletor solar com convecção natural (A) e com convecção forçada (B) (SILVA, 2017).

A câmara de secagem (Figura 3.3) foi montada utilizando cantoneiras de aço de 1/8” x 1,5 cm e chapa de aço galvanizado 26 em formato cúbico de dupla parede utilizando lã de vidro de 0,025 m de espessura como isolante nas paredes laterais e no fundo. No topo, havia uma abertura circular central de 0,52 m de diâmetro para o acoplamento de um exaustor eólico. Uma porta lateral da câmara auxiliava no manejo interno do secador. A câmara possuía dimensões internas de 0,6 m de largura por 0,6 m de comprimento e 0,63 m de altura. Seis suportes foram anexados em duas paredes opostas do secador, para que pudessem ser colocadas três bandejas de 0,56 m por 0,58 m. Nos testes, apenas uma bandeja foi utilizada. A bandeja era formada com armação de metalon quadrado de 0,05 m e uma tela de aço inox 304, com malha 30 e abertura de 0,55 mm. Os espaçamentos entre as bandejas eram de 0,15 m. Somente a parte externa da câmara de aço foi pintada de preto fosco.



Figura 3.3 – Vista interna da câmara de secagem (SILVA, 2017).

O exaustor eólico era feito de aço galvanizado, com abertura de 0,52 m, auxiliando a retirada do ar úmido, após o contato com os grãos. A cor original foi mantida.

A secagem foi auxiliada com a instrumentação apresentada na Figura 3.4. Quatro sensores de temperatura tipo PT100, dois sensores de umidade relativa e temperatura tipo RHT DM 150 mm e uma central de aquisição de dados FieldLogger foram utilizados. Um termo-higroanemômetro (VELOCICALC) e um solarímetro (INSTRUTHERM MES-200) foram utilizados para medir a umidade relativa do ar e a radiação solar local, respectivamente.

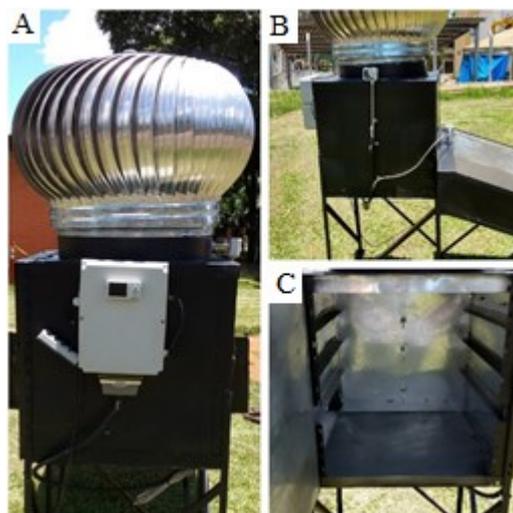


Figura 3.4 – Detalhe da instrumentação para medida de temperatura e umidade: (A) FieldLogger, (B) RHT DM 150mm e (C) PT100 (SILVA, 2017).

Os sensores PT100 estavam localizados nos seguintes pontos: o primeiro na parte externa do secador para avaliação da temperatura ambiente, o segundo entre a base da câmara e o suporte da primeira bandeja, o terceiro entre os suportes da primeira e da segunda bandejas e o quarto entre os suportes da segunda e da terceira bandejas. Os sensores de umidade RHT DM 150 mm e temperatura foram colocados nas extremidades da câmara de secagem: um em sua entrada e o outro na sua saída, bem próximo do exaustor. Todos os sensores eram ligados ao coletor de dados FieldLogger, que armazenava os dados a cada minuto. Além disso, o coletor FieldLogger possuía uma tela digital, onde se podia acompanhar as medidas ao longo do tempo.

A célula do solarímetro foi colocada sobre o vidro do coletor solar, garantindo a inclinação de 18° e medindo, assim, a radiação solar ao longo do experimento. O termo-higroanemômetro foi posicionado em um anteparo, para que se pudesse acompanhar a umidade relativa do ar ao longo da secagem.

Para a secagem utilizando convecção forçada, anexava-se à porção inferior do coletor uma chapa de aço com uma abertura circular em uma das extremidades, onde um ventilador de 18 cm de diâmetro foi anexado. O ventilador de 20 W tinha a possibilidade de variar a velocidade do ar por meio de um inversor de frequência acoplado ao motor.

3.2.1 Funcionamento do secador

O secador funcionava de maneira simples. A exposição era de maneira indireta, ou seja, o material a ser seco não estava em contato direto com a radiação solar. Assim, o café era posto dentro da câmara de secagem, protegida da radiação, para minimizar a degradação de cor, nutrientes ou compostos bioativos. O ar era succionado por convecção natural ou por convecção forçada pelo vão da parte inferior do coletor e entrava em contato com a estrutura metálica do coletor sobre o qual incidia a radiação solar. À medida que o ar aquecia, sua densidade era reduzida e ele escoava em direção à câmara de secagem, principalmente em convecção natural.

Assim que o ar entrava na câmara de secagem, quente e insaturado, percolava o café espalhado na bandeja, retirando umidade do fruto, através de um escoamento cruzado. A exaustão do ar de secagem era feita com o auxílio do exaustor eólico, colocado na parte superior da câmara de secagem.

3.2.2 Configurações relacionadas ao ar de secagem

O secador solar, neste trabalho, foi alimentado com ar em duas configurações distintas. Em uma configuração, o ar era alimentado por convecção natural em virtude da presença do exaustor eólico. Já na segunda configuração, em convecção forçada, o ar foi alimentado com o auxílio de um ventilador doméstico de 20 W, instalado na entrada do coletor solar com o auxílio de uma placa e quatro fechos rápidos. O ventilador tinha 18 cm de diâmetro, um inversor de frequência que permitia ao aparato atingir distintas vazões de ar distintas dentro de uma faixa de 98 m³/h e 306 m³/h.

A vazão de alimentação de ar empregando o ventilador foi previamente calculada utilizando um duto e anemômetro de fio quente. O ventilador foi acoplado a uma das extremidades de um duto de 3,0 m de comprimento por 18 cm de diâmetro. Na parede do duto, foi feito um orifício a 2,5 m da entrada de ar do ventilador, a fim de equalizar o escoamento, para instalar o anemômetro de fio quente (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2012). Foram medidas as velocidades médias para nove diferentes posições do inversor de frequência do ventilador. A velocidade média foi tomada como a integral de área compostas por 17 velocidades locais aferidas ao longo do diâmetro do duto. Tais informações encontram-se disponíveis no Apêndice A. Para cada velocidade

específica de rotação do ventilador, percebeu-se que o escoamento pouco variava com a posição radial do duto, apresentando, portanto, perfil plano devido às características do tipo *plug flow*.

Para a determinação da vazão do ar de secagem em convecção natural, foram feitas medidas na entrada da câmara de secagem. Sua abertura possui 50 cm de comprimento por 15 cm de altura. Essa abertura foi dividida em seções transversais de 5 cm x 5 cm ao longo da entrada da câmara de secagem. Notou-se, também, que a velocidade do ar foi a mesma para diferentes alturas da entrada da câmara. Assim, calculou-se a vazão de ar de secagem a convecção natural pela velocidade média local multiplicada pela área transversal de cada seção.

3.2.3 Testes de secagem

Todos os experimentos de secagem foram feitos no *campus* Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em Uberlândia (MG). Uma área próxima do bloco 1Z-B, ao lado do bloco 3L (Latitude: 18°55'10.6" – S; Longitude: 48°15'27.9" – W), foi utilizada para a secagem. A secagem iniciava no período da manhã, entre 09:00 e 09:30, a fim de se utilizar do período de maior incidência solar para a coleta de raios solares e a secagem. A secagem durava 6 h. Fora deste horário e para períodos maiores que 6 h, muito dificilmente se encontram radiações satisfatórias para garantir um razoável aquecimento do ar. Aferiram-se amostras de café para averiguar a umidade ao longo da secagem. Eram retiradas as amostras a 0, 5, 10, 20, 30 min, e a partir daí de 30 em 30 min até se completar as 6 h de secagem. A câmara de secagem era aberta e eram retirados seis grãos de café aleatoriamente para aferição da umidade.

A secagem foi feita entre os meses de maio e novembro. Embora o período de alta colheita e processamento do café seja entre maio e agosto, devido aos períodos de seca e chuva da região, as maiores incidências solares podem ser encontradas entre setembro e novembro (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018; SILVA, 2017).

As variáveis manipuladas na secagem com configuração de convecção forçada foram a vazão volumétrica de ar de entrada (Q) e a carga mássica do café (C) disposta sobre a bandeja. As variáveis monitoradas foram a umidade relativa do ar (U_R), a radiação solar incidente sobre o coletor (G) e a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem

(T_E). As variáveis de resposta utilizadas neste trabalho foram a umidade final do café após a operação (X_F), além de bioativos (fenólicos e flavonoides). As medidas das variáveis monitoradas eram aferidas sempre que se realizava uma amostragem do café, realizada nos tempos de 0, 5, 10, 20, 30 min, e, a partir daí, de 30 em 30 min até o término da secagem em seis horas. As variáveis resposta eram determinadas ao término do período de secagem de 6 h.

Na secagem com configuração de convecção natural, apenas uma variável foi manipulada: a carga mássica do café (C). Para tanto, fez-se um planejamento de cinco níveis para uma variável, a fim de se observar o comportamento da variável manipulada sobre as variáveis resposta, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Planejamento experimental para secagem com convecção natural.

Nomenclatura	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
C (kg/m ²)	1,99	2,31	3,08	3,85	4,17
x_2	-1,41	-1	0	1	1,41

É importante ressaltar que, embora não colocada como variável controlada, a vazão de ar de entrada foi calculada na convecção natural, e teve seu efeito comparado com a convecção forçada. A vazão de ar na secagem com convecção natural foi em torno de 2,44 m³ h⁻¹.

Na secagem com convecção forçada, para avaliar a influência das variáveis manipuladas nas variáveis resposta, foi elaborado um Planejamento do tipo Composto Central (PCC) ortogonal, variando-se a vazão de ar (Q) e a carga mássica do café (C). As variáveis codificadas e decodificadas do planejamento estão apresentadas na Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 – Planejamento composto central para secagem com convecção forçada.

Nomenclatura	Codificado		Decodificado	
	x_1	x_2	Q (m ³ /h)	C (kg/m ²)
CF1	-1	-1	128	2,31
CF2	-1	1	128	3,85
CF3	1	-1	276	2,31
CF4	1	1	276	3,85
CF5	-1,41	0	98	3,08
CF6	1,41	0	306	3,08
CF7	0	-1,41	202	1,99
CF8	0	1,41	202	4,17
CF9	0	0	202	3,08
CF10	0	0	202	3,08
CF11	0	0	202	3,08

Com as informações das variáveis monitoradas (G , U_R e T_E), fez-se uma média ponderada com o tempo, para se ter um valor representativo da secagem com as medidas aferidas em cada experimento. Com esses valores médios, também foi feita uma avaliação da influência dessas variáveis monitoradas na umidade final dos grãos, nos testes de qualidade e na cinética de secagem (que serão descritos no item 3.3). Foi feita, também, uma avaliação do secador com relação à sua temperatura de entrada. Como o ar era aquecido pela radiação solar, estudou-se a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem e sua dependência com a radiação solar.

A adimensionalização das variáveis manipuladas e monitoradas (Q , C , G , U_R e T_E) está apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Equações de adimensionalização.

Variável	Adimensionalização	Equação
Vazão de ar (Q)	$x_1 = \frac{Q \left[\frac{m^3}{h} \right] - 202}{73}$	(3.1)
Carga mássica (C)	$x_2 = \frac{C \left[\frac{kg}{m^2} \right] - 3,08}{0,76}$	(3.2)
Temperatura do ar na entrada da câmara (T_E)	$x_3 = \frac{T_E [^\circ C] - 53,5}{3,2}$	(3.3)
Radiação Solar (G)	$x_4 = \frac{G \left[\frac{W}{m^2} \right] - 742}{88}$	(3.4)
Umidade relativa do ar (U_R)	$x_5 = \frac{U_R [\%] - 32,0}{6,0}$	(3.5)

Foi proposto ainda um Número Adimensional (Ψ) que englobasse os dados de radiação solar (G), umidade relativa do ar (U_R) e temperatura do ar ambiente (T_∞), nos termos da Equação 3.6. Tal estratégia foi adotada porque não era possível manter as condições meteorológicas idênticas para todos os dias de experimento. Por mais que se procurasse fazer os ensaios de secagem dentro de uma estreita faixa experimental, sempre havia alguma flutuação inevitável nas condições meteorológicas no dia do experimento. A fim de harmonizar as dimensões envolvidas nas variáveis meteorológicas (monitoradas), a Umidade Relativa do ar (U_R) e a Temperatura Ambiente (T_∞) foram representadas como Concentração de Vapor de Água (C_A) e Pressão de Vapor de Água ($P_{V,atm}$), respectivamente. A concentração de vapor de água foi estimada com o auxílio de uma calculadora psicrométrica *online*, a partir dos dados de umidade relativa do ar. A pressão de vapor foi estimada pela Equação de Antoine aplicada à água na temperatura ambiente que se encontrava o ar. Maiores detalhes podem ser consultados no Apêndice B.

$$\Psi = \frac{G \left[\frac{W}{m^2} \right] C_A^2 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{P_{V,atm}^3 [Pa]} \quad (3.6)$$

Este Número Adimensional foi utilizado neste estudo para avaliar a interferência das variáveis meteorológicas sobre a umidade final e a redução de umidade, bem como nos compostos fenólicos totais e nos compostos flavonoides totais. Avaliou-se se havia uma tendência entre os dados de Redução de Umidade (*RX*) e de Redução de Fenólicos Totais (*RPT*) e Redução de Flavonoides Totais (*RFT*) e o Número Adimensional.

3.3 Umidade de equilíbrio e cinética de secagem

Para obter a umidade de equilíbrio (X_{eq}), utilizou-se de um método descrito em Silva (2017). Na Equação 3.7, utilizou-se da temperatura do ar na entrada da câmara de secagem (T_E), em K, para calcular a pressão de saturação de vapor de água ($P_{V,atm}$), obtida em Pa.

$$\ln P_{v,atm} = -\frac{5800,22}{T_E} + 1,39 - 4,86 \cdot 10^{-2} T_E + 4,18 \cdot 10^{-5} T_E^2 - 1,44 \cdot 10^{-8} T_E^3 + 6,55 \ln T_E \quad (3.7)$$

Assim, obtendo-se a pressão de saturação do vapor de água, determinava-se a umidade absoluta do ar (UA_{amb}) utilizando a Equação 3.8:

$$UA_{amb} = \frac{0,622 \frac{U_R}{100} P_{v,atm}}{P_{atm} - \frac{U_R}{100} P_{v,atm}} \quad (3.8)$$

A partir do valor de umidade absoluta do ar em base seca, pode-se converter este valor em atividade de água a partir da Equação 3.9.

$$a_w = UA_{amb} \quad (3.9)$$

No presente trabalho, foi utilizado o modelo de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB) para o cálculo da umidade de equilíbrio (X_{eq}), conforme mostra a Equação 3.10.

$$X_{eq} = \frac{X_m C_G k_G a_w}{(1 - k_G a_w)(1 - k_G a_w + C_G k_G a_w)} \quad (3.10)$$

em que X_m , C_G e k_G são parâmetros de ajuste da curva, dependente do material a ser avaliado. No presente trabalho, estes valores foram consultados no trabalho de Henao *et al.* (2009) a 50°C.

Para a obtenção das curvas de secagem (já apresentadas na Tabela 2.2), fez-se necessário o cálculo da variável razão de umidade, que consiste num Adimensional de Umidade, conforme a Equação 3.11.

$$X_R = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (3.11)$$

As variáveis X_{eq} e X_0 são as umidades de equilíbrio e inicial do grão, respectivamente, e X é uma umidade em um tempo qualquer.

A partir dos valores de X_R em cada tempo, com o auxílio do *software* STATISTICA®, foi feita uma estimativa dos parâmetros envolvidos nos modelos da Tabela 2.2, registrando os coeficientes quadráticos de correlação (R^2), avaliando, também, as distribuições de resíduos. A escolha do melhor modelo foi feita observando-se o melhor R^2 combinado com as respectivas distribuições de resíduos.

3.4 Testes de qualidade do café

3.4.1 Extrações convencionais

Em todas as amostras, o café foi triturado e passado em peneira de abertura de 0,5mm (mesh #32), sendo armazenado a -4°C até as extrações após cada teste e na caracterização do café *in natura*.

Para compostos fenólicos e flavonoides, foi feita uma extração com metanol, com a luz apagada para evitar a decomposição dos bioativos, utilizando um vórtex QL-901 da Biomixer por 3 min. Após agitação, a mistura foi deixada em repouso por 1 h, sendo filtrada com filtros de microporos. A fase líquida foi utilizada para análises.

Para a cafeína, trigonelina e ácido clorogênico, a extração foi feita com metanol (20 mL) adicionado à amostra triturada, com o auxílio de banho ultrassônico modelo LS-55DA-2X, 33 kHz e 1050 W por 15 minutos, à temperatura ambiente, após agitação

prévia (SILVA, 2018). Após a utilização do ultrassom, a fase líquida foi filtrada utilizando filtro de seringa de tipo membrana PVDF de 0,22 μm .

3.4.2 Compostos fenólicos totais

O método utilizado para a determinação de fenólicos totais é o método de Folin-Ciocalteu, conforme apresentado em Nogueira (2016), utilizando metanol como o solvente extrator. A curva padrão foi preparada com ácido gálico, a concentrações que variavam de 0,01 a 0,10 mg/mL, sendo lida em espectrofotômetro visível, com comprimento de onda de 622 nm. Foram feitas triplicatas de três massas distintas, totalizando nove leituras, com os resultados expressos em mg de ácido gálico equivalente (AGE) para cada 100 g de amostra em base seca. As análises foram feitas em triplicata.

3.4.3 Compostos flavonoides totais

O método utilizado para determinação de compostos flavonoides totais foi o de Zhishen *et al.* (1999), adaptado conforme descrito em Nogueira (2016). O solvente utilizado também foi o metanol, com a rutina como padrão utilizado. A leitura foi efetuada no comprimento de onda de 450 nm. Para cada amostra da secagem, foram feitas triplicatas de três massas diferentes, totalizando, também, nove leituras. Os resultados foram expressos em mg de rutina para cada 100 g de café em base seca. As análises foram feitas em triplicata.

3.4.4 Cafeína, trigonelina e ácido clorogênico

Os teores de cafeína, trigonelina e ácido clorogênico foram lidos, utilizando uma coluna Shim-pack VP-ODS 250mm x 4,6 mm x 5 μm e uma pré-coluna Shim-pack GVP-ODS 10mm x 4,6mm x 5 μm de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) da Shimadzu, constituído de bomba quaternária LC-20AT (n° de série: L20114811472), degaseificador DGU-20A5 (n° de série: L20244808404), injetor SIL-20A (n° de série: L20164503179), controladora CBM-20A (n° de série: L20234505269), forno CTO-20AC (n° de série: L20214503287), detector SPDM-20A (n° de série: L20154503047), detector RID-10A (n° de série: C20934806770) e coletor frações FRC-10A (n° de série: C20374504580). O tempo total de análise foi de 20 min. A eluição dos compostos foi

monitorada a 272 nm. O volume injetado para todas as amostras foi de 20 μL , vazão de 1 mL/min e temperatura de 30°C.

3.5 Análise estatística

Todas as análises estatísticas e superfícies de resposta foram realizadas utilizando o *software* STATISTICA[®]. Os efeitos das variáveis independentes foram calculados para cada resposta. Os parâmetros não significativos foram removidos, avaliando apenas os efeitos significativos ($p < 0,10$). A adequabilidade e qualidade dos ajustes foram efetuadas avaliando-se o coeficiente de determinação (R^2) e o valor de F, com resultados apresentando distribuição normal e desvios aleatoriamente distribuídos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do café natural

A umidade inicial do café estava em torno de $34,71 \pm 2,30\%$. O total de fenólicos encontrados no café natural foi de $542,6 \pm 12,2$ mg de AGE/100 g b.s. Os valores totais de flavonoides do café natural foram de $5,79 \pm 0,24$ mg de rutina/100 g b.s. O conteúdo destes compostos bioativos pode variar de acordo com a espécie do café e com o tempo de colheita. Neste trabalho, o café utilizado foi colhido na segunda metade do período de colheita, fato tal que pode ter proporcionado uma perda principalmente por exposição solar no campo e por um armazenamento não ideal (REIS *et al.*, 2011; KREICBERGS; DIMINS, 2011).

4.2 Considerações iniciais sobre o Secador Solar de Bandeja

Na Tabela 4.1 estão apresentados os testes com as respectivas variáveis manipuladas (Q e C), as variáveis monitoradas radiação solar (G) e a temperatura do ar de secagem (T_E), bem como a umidade inicial (X_0) e final (X_F) dos grãos de café.

Tabela 4.1 – Valores das variáveis manipuladas, valores médios das variáveis monitoradas e umidade inicial e final do material para um período de secagem de 6 h.

Testes	Q ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	C (kg m^{-2})	G (W m^{-2})	T_E ($^{\circ}\text{C}$)	X_0	X_F
CF1	128,00	2,31	745	51	35,0	18,1
CF2	275,00	2,31	705	49	34,9	18,2
CF3	128,00	3,85	866	57	35,0	14,0
CF4	275,00	3,85	826	54	34,0	15,6
CF5	306,00	3,08	743	52	32,7	15,7
CF6	98,00	3,08	852	58	33,9	12,4
CF7	202,00	4,17	846	56	31,0	12,4
CF8	202,00	1,99	617	49	39,2	14,4
CF9	202,00	3,08	749	50	32,4	16,0
CF10	202,00	3,08	823	53	33,1	15,3
CF11	202,00	3,08	624	50	36,4	19,4
CN1	2,44	1,99	772	57	34,9	15,1
CN2	2,44	2,31	800	58	39,1	17,8
CN3	2,44	3,08	748	53	33,3	17,6
CN4	2,44	3,85	814	57	36,1	17,3
CN5	2,44	4,17	763	54	34,4	19,1

Notou-se que a temperatura do ar de secagem (T_E) foi bastante dependente da vazão de ar ($2,44 \leq Q \text{ (m}^3/\text{h)} \leq 306$) e da radiação solar incidente sobre o coletor ($617 \leq G \text{ (W/m}^2) \leq 866$), apresentando valores entre 49°C e 58°C . Embora as informações experimentais tenham sido feitas em um período bastante específico do ano (estação seca), as radiações variaram, muito por conta de maiores presenças de nuvens no período da tarde ou outras situações relacionadas ao clima. Assim, a temperatura foi monitorada durante os experimentos para analisar os efeitos de vazão de ar e radiação solar sobre ela, bem como seu efeito sobre as respostas estudadas. Através de uma regressão múltipla, obteve-se a Equação 4.1, que apresenta a temperatura do ar de secagem como função de x_1 (vazão de ar de entrada codificada) e x_4 (radiação solar média codificada).

$$T_E \text{ (}^\circ\text{C)} = 49,72 + 2,61x_4 + 0,70x_1^2 + 1,76x_4^2 \quad (R^2 = 0,9471) \quad (4.1)$$

Nota-se, a partir desta equação, que a radiação solar é a variável que mais teve efeito na temperatura do ar de secagem. A Figura 4.1 apresenta a superfície de resposta da equação supracitada.

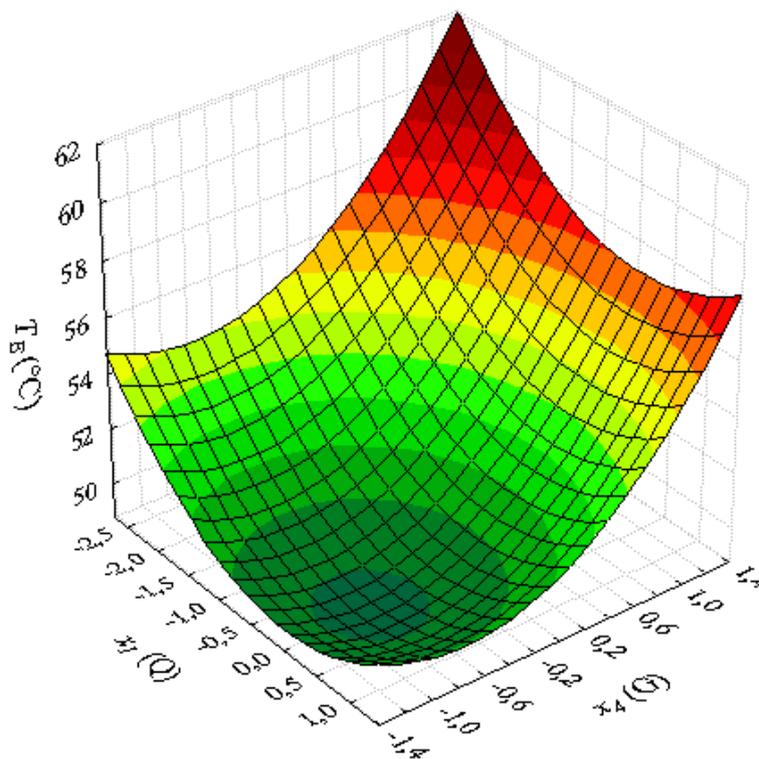


Figura 4.1 – Temperatura do ar de secagem em função da vazão do ar de secagem e da radiação solar.

As maiores temperaturas de ar de secagem foram observadas em maiores radiações solares, bem como em menores vazões de ar. Este comportamento é similar ao observado por Silva (2017), uma vez que quando há maiores vazões de ar, apesar de favorecerem fenomenologicamente os coeficientes convectivos de transferência de calor, representam termodinamicamente uma maior massa de fluido a ser aquecida para uma mesma potência solar adicionada. Contribui, portanto, para a verificação de menores temperaturas do ar na saída do coletor (ou entrada da câmara de secagem). Eis, então, o motivo pelo qual a variável quadrática da vazão volumétrica de ar apresentou um parâmetro relativamente menor (0,70) em comparação com o parâmetro que acompanha a variável quadrática da radiação solar (1,76).

A menor influência da vazão de ar pode ser ratificada comparando-se, por exemplo, os testes CF9 e CN3, que tiveram radiações praticamente idênticas (749 e 748 W/m², respectivamente), mas vazões de ar bastante distintas (202 m³/h e 2,44 m³/h, respectivamente). Apesar da vazão de ar do teste CF9 ser quase 83 vezes maior que a do teste CN3, a diferença entre as temperaturas de secagem foi de apenas 3°C (50°C e 53°C, respectivamente). Por sua vez, o maior efeito da radiação solar pode ser ratificado comparando-se, por exemplo, os ensaios CF7 e CF8, que tiveram idênticas vazões (202 m³/h) e radiações solares diferentes, porém relativamente próximas (846 W/m² e 617 W/m², respectivamente). Apesar da radiação do teste CF7 ter sido incrementada em apenas 37%, a diferença entre as temperaturas do ar de secagem (56°C e 49°C, respectivamente) foi relativamente considerável (7°C).

Ainda que a vazão de ar (Q) fosse influente nas respostas de redução de umidade e da cinética de secagem, doravante o seu efeito foi computado na temperatura do ar de secagem (T_E), junto com o efeito da radiação solar (G).

Além disso, pode-se classificar a secagem de café neste trabalho como de altas temperaturas, conforme sugerido por Reis *et al.* (2011), uma vez que o secador aquece o ar mais que dez graus celsius se comparado com a temperatura ambiente.

4.3 Secagem

Nesta seção, apresentam-se os dados referentes à cinética de secagem e à redução de umidade, bem como a investigação da interferência das variáveis meteorológicas sobre ela.

4.3.1 Cinética de secagem

De acordo com as principais informações experimentais, observou-se que a variação das umidades de equilíbrio do café foi pequena nas condições operacionais deste trabalho ($X_{eq} = 4,31 \pm 0,04\%$). Com os dados de umidade de equilíbrio de cada teste, calculou-se os Adimensionais de Umidade (X_R) de cada ensaio ao longo do tempo. A partir dos resultados do Adimensional de Umidade (X_R), as equações de cinética de secagem foram ajustadas, conforme as correlações quadráticas ajustadas para os modelos descritos na Tabela 4.2, cujos maiores detalhes acerca dos parâmetros podem ser obtidos no Apêndice E.

Tabela 4.2 – Valores de R^2 médios referentes aos ajustes de cada equação cinética de secagem.

Modelo	R^2
Lewis <i>et al.</i> (1921)	0,9437
Page (1949)	0,9663
Henderson e Henderson (1968)	0,9564
Overhults <i>et al.</i> (1973)	0,9663
Brooker <i>et al.</i> (1974)	0,9612
Sharaf-Elden <i>et al.</i> (1980)	0,7130

É possível notar que os modelos de Overhults *et al.* (1973) e de Page (1949) foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais de cinética de secagem, tomando como base o ajuste de R^2 . É importante ressaltar que as equações são bem similares, portanto, as curvas são coincidentes e os valores de R^2 são muito próximos. As distribuições de resíduos de ambas as equações foram também semelhantes, apresentando uma distribuição aleatória em torno de zero. Portanto, o modelo de Overhults *et al.* (1973)

foi o escolhido para a descrição da cinética de secagem do café arábica (*Coffea arabica*) neste trabalho.

Na Figura 4.2, é apresentado um resultado típico de cinética de secagem com os resultados preditos pela equação de cinética de secagem do Modelo de Overhults *et al.* (1973).

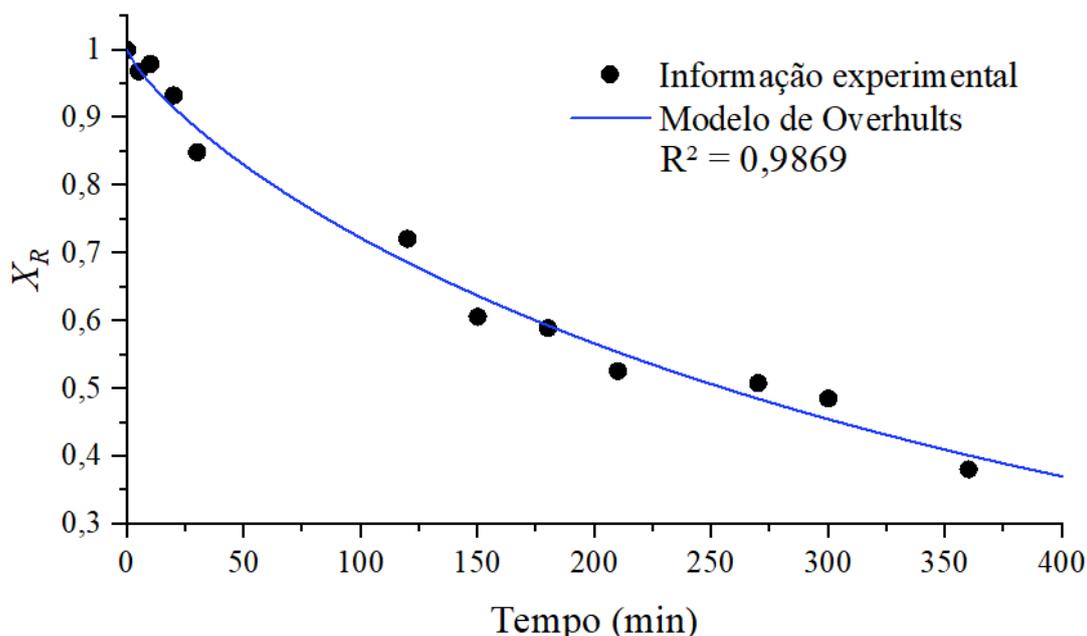


Figura 4.2 – Cinética de secagem para o ensaio CF4.

No início da secagem, pode-se observar que há um pequeno período de taxas de secagem constantes, indicando que a secagem, neste período, possui equilíbrio entre a remoção da umidade superficial e a reposição pela difusão interna de massa de água, evidenciando um domínio da convecção do ar nesta fase da secagem, indicando a importância da vazão de ar neste período. Entretanto, na maior parte da secagem, as taxas de secagem foram decrescentes, o que significa que a reposição de água à superfície do grão não era maior que a evaporação da umidade livre na superfície, indicando que a transferência de massa interna no processo de secagem do grão de café era o fenômeno predominante, também observado por Sfredo (2006). Este fenômeno predominante de transferência de massa interna para o café é justificado pela dificuldade de percolação da umidade do interior do grão para a superfície por causa de suas estruturas internas, como o pergaminho e a mucilagem.

Na Tabela 4.3, estão apresentados os valores do parâmetro cinético k estimados para a equação de Overhults *et al.* (1973) para cada ensaio experimental, junto com as variáveis monitoradas de cada teste analisado.

Tabela 4.3 – Valores do parâmetro cinético k encontrados para a equação de Overhults *et al.* (1973) em cada teste e as variáveis manipuladas e monitoradas.

Testes	Q (m ³ h ⁻¹)	C (kg m ⁻²)	G (W m ⁻²)	T_E (°C)	$k \cdot 10^4$
CF1	128	2,31	745	51	22,16
CF2	275	2,31	705	49	28,05
CF3	128	3,85	866	57	23,49
CF4	275	3,85	826	54	24,78
CF5	306	3,08	743	52	24,48
CF6	98	3,08	852	58	30,45
CF7	202	4,17	846	56	29,04
CF8	202	1,99	617	49	28,31
CF9	202	3,08	749	50	28,56
CF10	202	3,08	823	53	23,19
CF11	202	3,08	624	50	24,46
CN1	2,4408	1,99	772	57	28,21
CN2	2,4408	2,31	800	58	32,57
CN3	2,4408	3,08	748	53	17,88
CN4	2,4408	3,85	814	57	26,79
CN5	2,4408	4,17	763	54	16,07

O parâmetro k da equação cinética diz respeito à velocidade que a secagem ocorre, sendo afetado pela difusividade efetiva da umidade no grão (NOGUEIRA, 2016). A partir dos dados de k em cada condição operacional, foi realizado um ajuste por regressão múltipla, obtendo-se a Equação 4.2 a seguir, para previsão de k em função de x_2 (carga mássica de café codificada) e x_3 (temperatura do ar de secagem codificada).

$$10^4 k = 22,87 - 2,21x_2 + 1,15x_3 - 1,57x_2^2 + 3,29x_3^2 \quad (R^2 = 0,8853) \quad (4.2)$$

Observa-se nesta equação comportamentos lineares tanto da carga mássica de café (x_2) quanto da temperatura do ar de secagem (x_3), bem como também efeitos quadráticos de ambas sobre o parâmetro cinético. Para melhor visualização dos efeitos destas variáveis sobre o parâmetro cinético k foi construída uma superfície de resposta, apresentada na Figura 4.3.

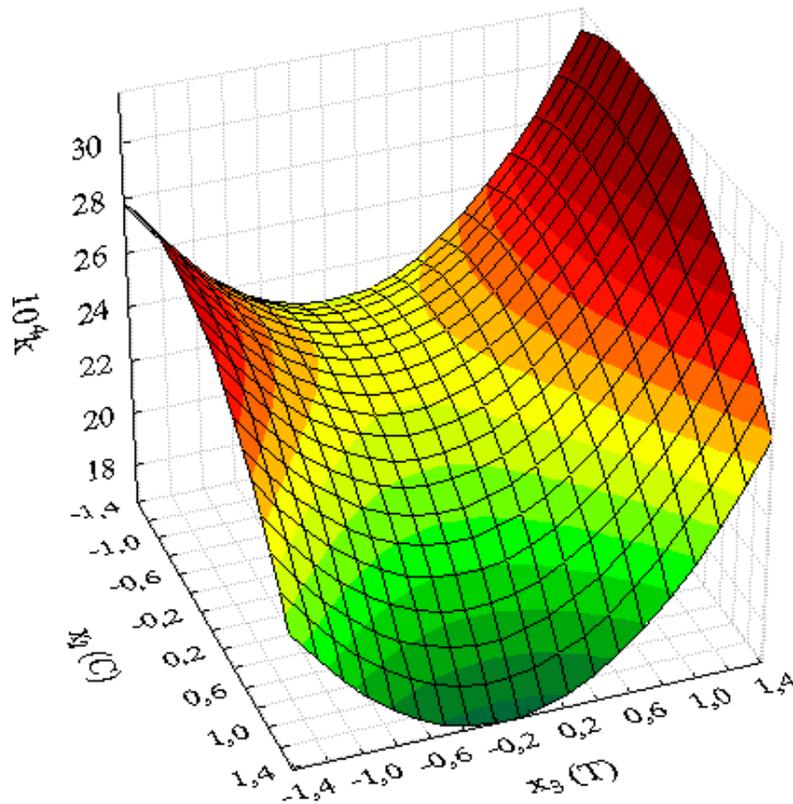


Figura 4.3 – Superfície de resposta do parâmetro k para as variáveis carga mássica de café (x_2) e temperatura do ar de secagem (x_3).

Nota-se na Figura 4.3 que, na configuração de maiores cargas mássicas de grãos (x_2), a secagem foi menos favorecida, haja vista os menores valores observados para k . Tal comportamento acontece porque maiores cargas mássicas demandam uma maior taxa mássica de água para uma mesma oferta de ar insaturado, dificultando, assim, a secagem. O valor do parâmetro k apresentou um comportamento mais favorecido da secagem em temperaturas mais extremas, que favorecem a evaporação da água superficial do grão e a difusão dela do interior do grão para a superfície. No entanto, mesmo em menores temperaturas, que são associadas a maiores vazões de ar, houve também um favorecimento da remoção da umidade dos grãos de café, certamente pelo incremento dos coeficientes convectivos locais de transferência de massa devido a maior convecção do fluido no interior da câmara de secagem.

4.3.2 Redução de umidade

Para se eliminar o efeito da heterogeneidade da umidade inicial do café, os dados de secagem foram tratados considerando a redução de umidade do grão ($RX=X_0-X_F$).

As reduções de umidade (RX) apresentaram valores entre 15% e 22%, conforme consta na Figura 4.4, na qual é possível notar, como esperado, que maiores temperaturas de ar de secagem estiveram ligadas a maiores reduções de umidade, como se observa nos testes CF3, CF6, CN1, CN2 e CN4. A maior redução de umidade foi observada em CF6, experimento realizado com configuração de convecção forçada, elevada vazão de ar e carga de grãos intermediária. De modo geral, observou-se uma proporcionalidade direta entre a redução de umidade e a temperatura do ar de secagem, salvo raras exceções ocorridas nos testes CF2, CF8, CF9 e CF11. Mesmo nesses casos excepcionais, as remoções de umidade ainda foram satisfatórias, apesar das temperaturas do ar de secagem terem permanecido nos menores patamares.

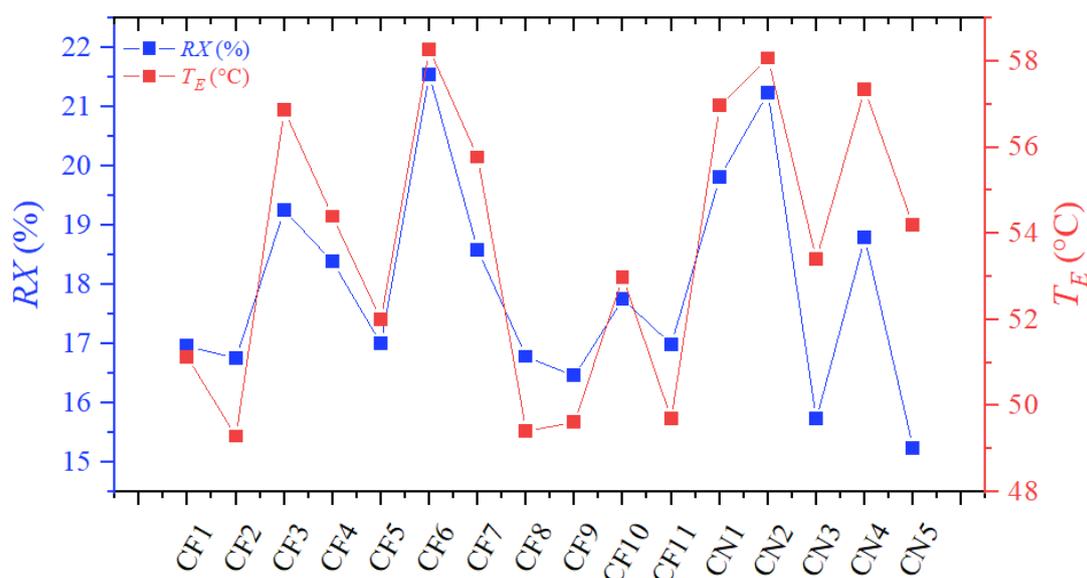


Figura 4.4 – Comportamento da redução de umidade com a temperatura de ar de secagem.

A título de exemplo, vale à pena ressaltar que o teste CF8 teve um baixo valor de temperatura devido a um período de intensas queimadas da Amazônia, no dia 20 de setembro de 2019, fazendo com que houvesse um bloqueio parcial da radiação solar no

centro-sul do Brasil por alguns dias. Portanto, acredita-se que mesmo em função das intercorrências climáticas mencionadas anteriormente, as Umidades Relativas do Ar ($24,8 \leq U_R (\%) \leq 41,7$) parecem ter sido características meteorológicas fundamentais para manter a maior parte das umidades finais abaixo de 18%.

De acordo com as principais informações sobre a redução de umidade (RX), foi proposta uma regressão múltipla para predição dessa resposta, em função da carga mássica de café codificada (x_2) e a temperatura do ar de secagem codificada (x_3). O resultado da regressão é apresentado na da Equação 4.3:

$$RX=17,93-0,53x_2+1,56x_3-0,49x_2^2+0,50x_3^2 \quad (R^2 = 0,8953) \quad (4.3)$$

Como esperado, a redução de umidade teve dependência intensa com a temperatura do ar de secagem (x_3). Estes efeitos podem ser vistos comparando os testes CF9 e CF10, em que, possuindo os mesmos níveis de carga mássica ($3,08 \text{ kg/m}^2$), mas com um aumento da temperatura em apenas 3°C (de 50°C para 53°C , respectivamente), houve um incremento de 12,4% da redução de umidade.

Apesar de significativo, foi possível notar que os efeitos da carga mássica de grão na diferença de umidade foram relativamente mais brandos em comparação ao efeito da variável térmica. Este efeito pode ser observado entre os ensaios de secagem CN1 e CN4, que apresentaram a mesma temperatura do ar de secagem (57°C), mas cargas mássicas distintas ($1,99$ e $3,85 \text{ kg/m}^2$). Após quase dobrar a carga mássica de café sobre a bandeja, a redução de umidade foi apenas 5,2% menor. Tais tendências ficam nitidamente mais perceptíveis na Superfície de Resposta (Figura 4.5).

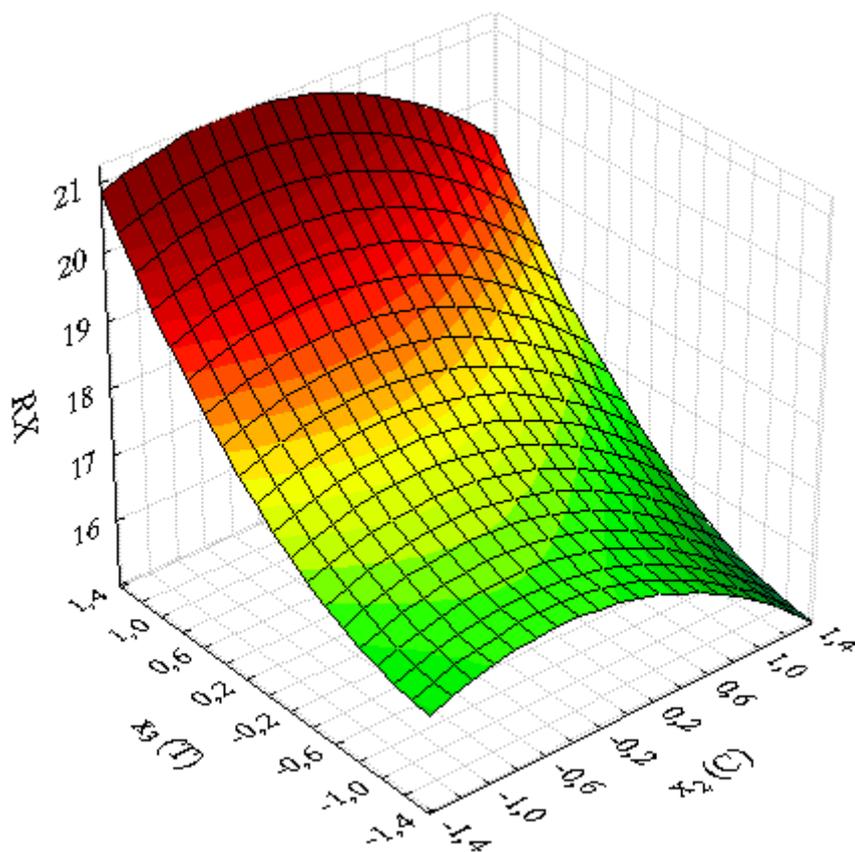


Figura 4.5 – Superfície de resposta do efeito da temperatura do ar de secagem (x_3) e carga mássica de café (x_2) na redução de umidade.

Observa-se na Figura 4.5 que as maiores reduções de umidade ocorreram nas condições de temperaturas de secagem mais altas, sendo possível, também, ratificar o menor efeito da carga mássica de café em comparação com a temperatura do ar de secagem. Este menor efeito está ligado à disposição em camadas finas de grãos de café sobre a bandeja, oferecendo pouca resistência para o ar e aumentando o contato de ar insaturado com os grãos. O incremento da temperatura do ar de secagem, ao contrário, favoreceu a evaporação da água presente na superfície do grão e a transferência de massa de água do interior do grão para sua superfície.

Assim, foi possível notar que as melhores condições para maximização da redução de umidade, nas condições feitas nesta dissertação, foram aquelas que apresentaram temperatura de secagem locada nos níveis mais elevados. A carga mássica, tendo pequeno efeito sobre a redução de umidade, pode ser configurada com maior valor, nos limites desta dissertação.

Apesar da redução da umidade ter sido satisfatoriamente correlacionada com a temperatura de secagem do ar (T_E) e carga mássica de café (C), a correlação quadrática ($R^2=0,8953$) deu indícios fortes de que havia uma ou algumas grandezas físicas que poderiam estar contribuindo com flutuação sobre a resposta avaliada. Por mais que os testes tenham sido planejados para execução em dias com condições meteorológicas parecidas, não havia qualquer possibilidade em mantê-las em um *set point*, seja de um dia para outro ou durante as 6 h diárias de secagem. Neste contexto, a partir das principais informações experimentais, foi proposto um Número Adimensional (Ψ) que englobasse as principais variáveis meteorológicas presentes na secagem do café em determinado dia: radiação solar (G), umidade relativa do ar (U_R) e temperatura ambiente (T_ω).

Como dito anteriormente, a radiação solar (G) possui grande influência nas temperaturas do ar de secagem (T_E) e até na própria temperatura ambiente (T_ω). A umidade relativa do ar é uma condição meteorológica importante, pois estabelece na secagem os gradientes de concentração entre as fases que impactam diretamente nos fluxos de água removidos dos grãos de café. Logo, o Número Adimensional proposto (Ψ) pode ser uma alternativa interessante para equalizar os ruídos de variáveis meteorológicas, que, apesar de monitoradas, não são controladas durante a execução dos testes de secagem.

O cálculo do Número Adimensional e suas variáveis estão apresentados no Apêndice B. Na Tabela 4.4 são apresentados os Números Adimensionais (Ψ) atrelados às respectivas Reduções de Umidade (R_X) dos ensaios de secagem.

Tabela 4.4 – Valores do Número Adimensional encontrados para cada ensaio de secagem de café e a redução de umidade.

Teste	G ($W\ m^{-2}$)	U_R (%)	T_∞ ($^{\circ}C$)	$\Psi \cdot 10^{13}$	RX (%)
CF1	745	32,5	31,5	8,844	16,9619
CF2	705	38,4	29,9	11,902	16,7549
CF3	866	28,3	30,2	7,726	20,9854
CF4	826	30,1	31,5	7,699	18,3851
CF5	743	29,1	31,1	7,387	16,9964
CF6	852	30,3	31,5	8,050	21,5403
CF7	846	28,5	30,7	7,419	18,5777
CF8	617	25,7	33,6	3,668	16,7825
CF9	749	41,7	28,8	16,020	16,4558
CF10	823	35,1	30,8	10,944	17,7543
CF11	624	40,4	30,2	11,464	16,9893
CN1	772	28,2	31,3	6,383	19,8075
CN2	800	24,8	32,3	4,794	21,2377
CN3	748	29,2	28,9	8,150	15,7259
CN4	814	28,5	29,9	7,506	18,7871
CN5	763	40,4	27,8	16,297	15,2364

A partir das informações experimentais contidas na Tabela 4.4, observou-se que testes com menores valores de adimensional apresentaram maiores remoções de umidade, conforme visto em CN1 e CN2. Contrariamente, os testes com maiores valores de adimensional (CN5 e CF9), conduziram às menores remoções de umidade. Outra constatação interessante foi no sentido de que as remoções de umidade (RX) parecem estar correlacionadas com o Número Adimensional (Ψ). Essa dependência de RX com Ψ pode ser um indicativo de que, mesmo havendo algumas flutuações das variáveis meteorológicas de um dia de secagem para outro, elas podem influenciar o processo de secagem, inclusive gerando flutuações sobre as principais variáveis respostas. Dessa forma, a dependência da Redução de Umidade (RX) com o Número Adimensional (Ψ) pode ser representada na Figura 4.6.

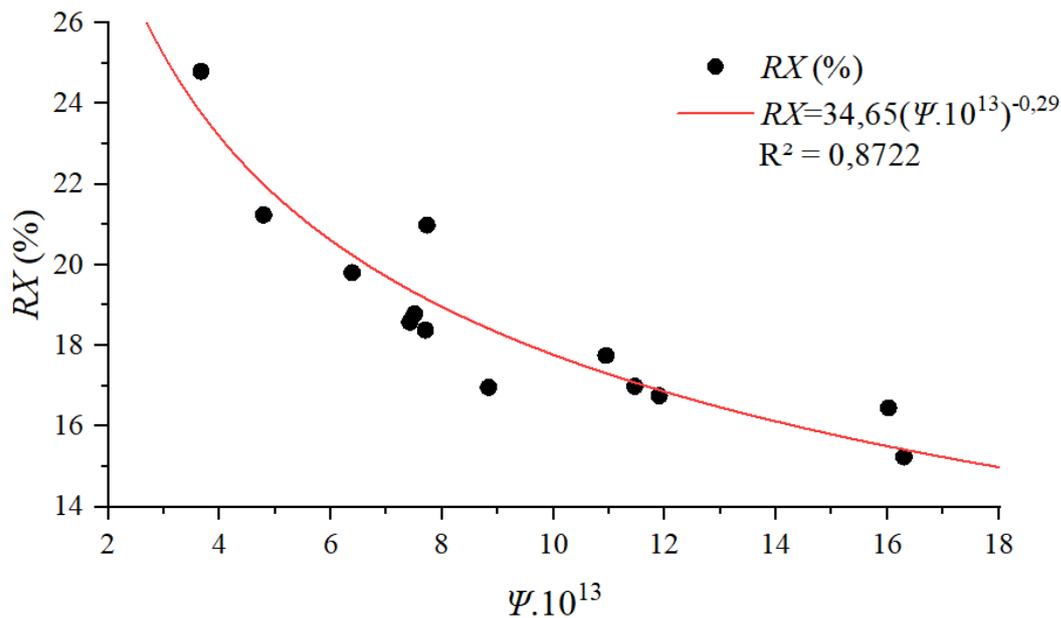


Figura 4.6 – Dependência da redução de umidade com o Número Adimensional.

A existência de uma relação entre o Número Adimensional (Ψ) e a redução de umidade (RX) pode ser uma das justificativas para que uma resposta dessa natureza não tenha apresentado uma correlação quadrática tão expressiva ($R^2 \rightarrow 1$) durante a regressão com as variáveis principais (T_E , C). De modo geral, a constatação de ruídos meteorológicos, substanciados pelo Número Adimensional aqui proposto, retratar e justificar a heterogeneidade das características dos grãos após o processo de secagem de um dia para o outro.

Apesar de importante, apenas a análise da Redução de Umidade (RX) não é suficiente para que um produto de qualidade chegue às xícaras dos consumidores. É necessário, também, avaliar o efeito destas variáveis no teor dos compostos bioativos presentes no fruto.

4.4 Qualidade do café

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos para o teor total e redução de fenólicos e flavonoides.

4.4.1 Compostos fenólicos totais

Na Figura 4.7 são mostrados os resultados de fenólicos totais dos grãos de café *in natura* e após os testes de secagem solar. Na Figura 4.8 são mostradas as Reduções de Fenólicos Totais (*RPT*) em comparação com a temperatura do ar de secagem. Os compostos fenólicos do café *in natura* foram de $542,6 \pm 12,2$ mg de ácido gálico/100 g de amostra seca, enquanto os compostos fenólicos após a secagem apresentaram valores entre $327,3 \pm 14,6$ e $483,8 \pm 11,7$ mg de ácido gálico/100 g de amostra seca. Nessas condições, as reduções de fenólicos permaneceram entre 10,8 e 39,7%. Abrahão *et al.* (2010) comentam de teores de fenólicos totais em torno de 4,5 e 5,4 g de ácido gálico/100 g de café arábica seco. Silva (2015b) relata valores de fenólicos totais do maracujá (*Passiflora edulis*) de 217,03 mg de ácido gálico/100 g de amostra seca. Silva (2014) apresenta valores de 446,4 mg de ácido gálico/100 g de amostra seca para a acerola (*Malpighia emarginata D. C.*), enquanto Silva (2017) encontrou um teor de fenólicos totais para a Spirulina (*Spirulina platensis*) de 252,4 mg de ácido gálico/100 g de amostra seca. Silva (2017) também relata que com o secador solar de bandeja, houve uma redução média de 27,24% do teor de fenólicos totais.

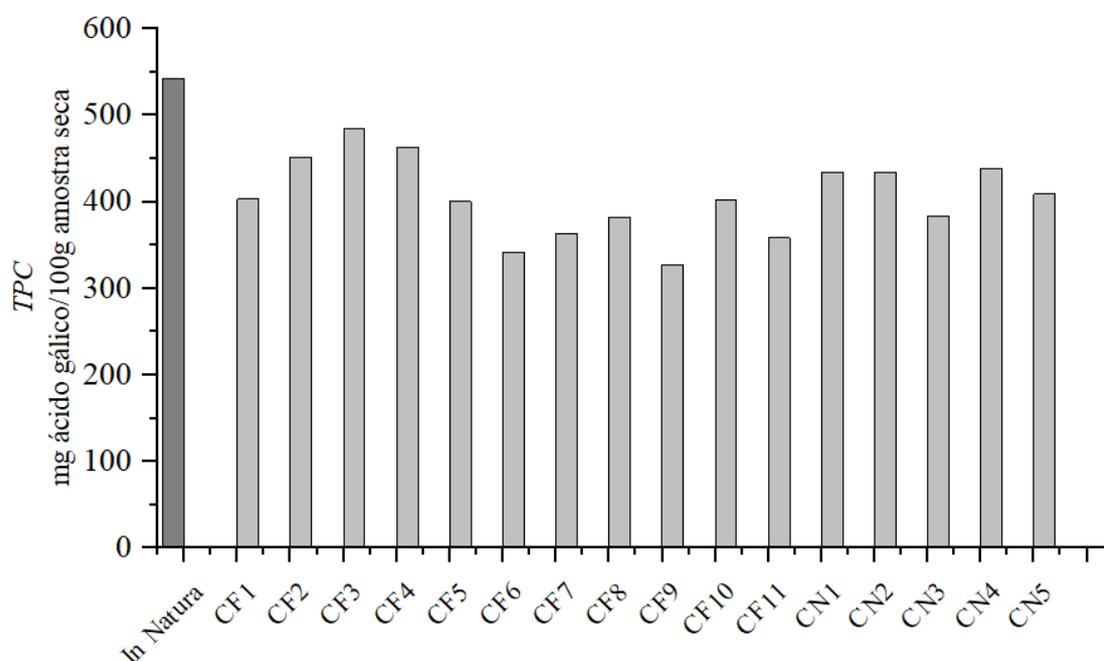


Figura 4.7 – Teor de fenólicos totais *in natura* e após os testes de secagem do café.

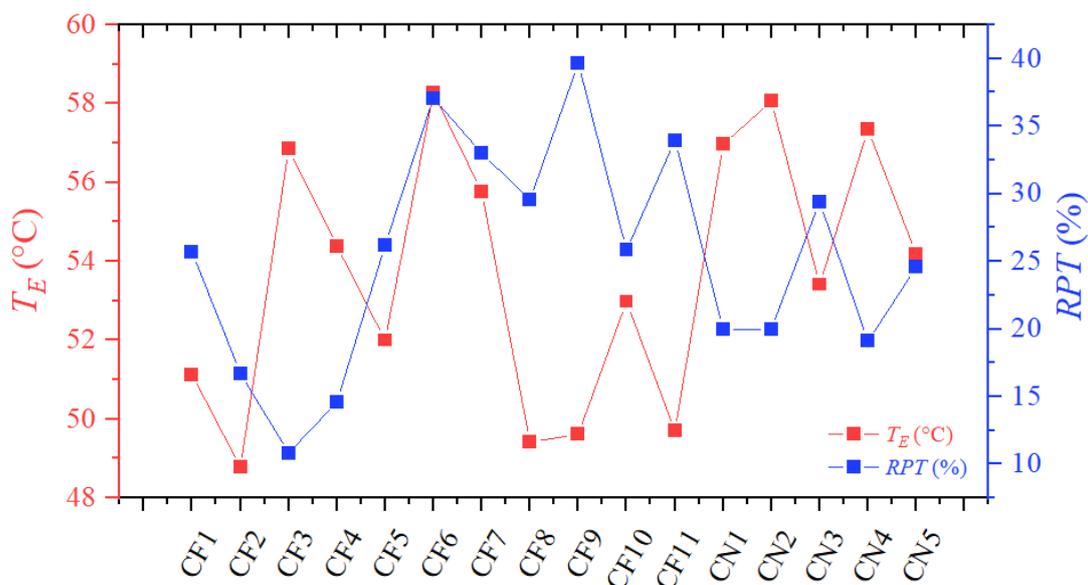


Figura 4.8 – Comparação entre a redução de fenólicos totais e a temperatura de ar de secagem.

Observa-se na Figura 4.8 que houve sempre uma redução de compostos fenólicos totais. É possível notar um comportamento invertido entre a temperatura de secagem (T_E) e a Redução de Fenólicos Totais (RPT), no qual um decréscimo da temperatura de secagem é acompanhada por um aumento da redução de fenólicos totais e vice-versa, com a exceção de poucos testes, como os ensaios CF2, CF6 e CF7.

Com o auxílio do software STATISTICA[®] 7, foi feita uma regressão múltipla para quantificar os efeitos das variáveis carga mássica de café (x_2) e temperatura de ar de secagem (x_3) na Redução de Fenólicos Totais (RPT). A Equação 4.7 a seguir apresenta a relação dessas variáveis com a redução de fenólicos.

$$RPT (\%) = 25,80 - 7,23x_3 - 2,65x_2x_3 \quad (R^2 = 0,8163) \quad (4.5)$$

Com a regressão múltipla das variáveis, confirma-se o importante efeito da temperatura para a redução de fenólicos após a secagem, assim como a sua interação com a carga mássica. Estes comportamentos podem ser melhor observados com a superfície de resposta da Figura 4.9.

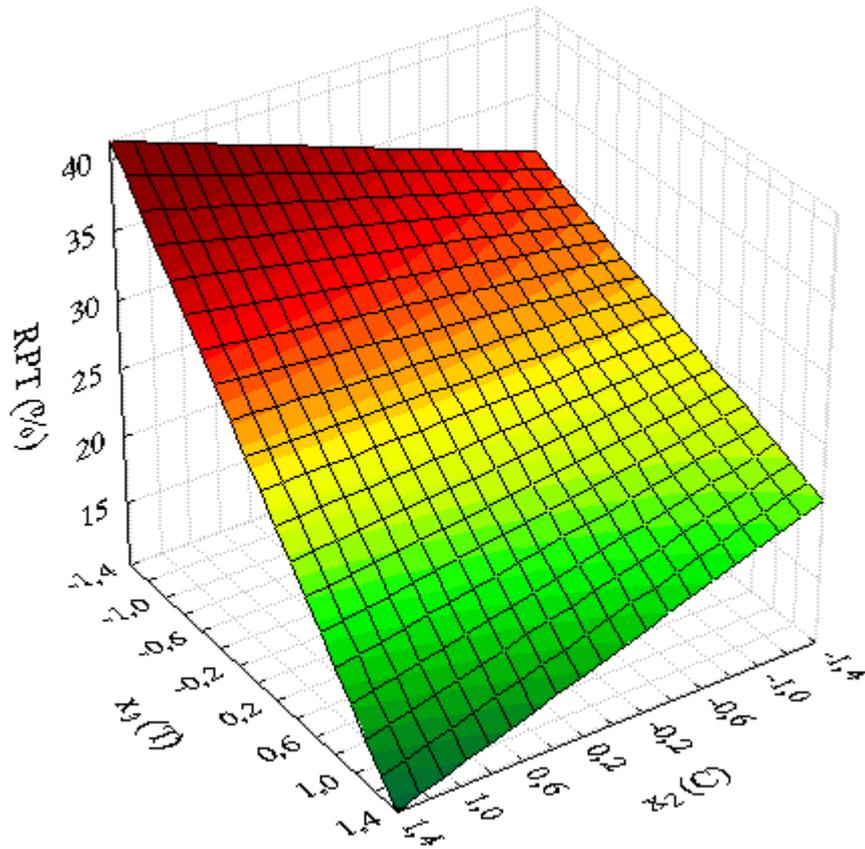


Figura 4.9 – Superfície de resposta de x_2 (carga mássica de café) e x_3 (temperatura do ar de secagem) na redução dos compostos fenólicos.

Observa-se que maiores temperaturas levaram a menores reduções dos compostos fenólicos, apresentando-se, portanto, como um aspecto favorável. O efeito negativo da temperatura do ar de secagem ($-7,23$) está de acordo com Silva (2015b), que mostrava um aumento dos fenólicos totais com o incremento da temperatura, devido a um rompimento de paredes celulares que liberam no meio uma quantidade de compostos fenólicos. A desnaturação de algumas enzimas que interferem na composição dos fenólicos também pode ser uma justificativa da menor redução nos casos de temperatura mais elevada (NOGUEIRA, 2016). Da Superfície de Resposta, ainda se vislumbra uma menor influência da carga mássica na redução do conteúdo destes compostos após a secagem, a dependência da faixa de temperatura do ar de secagem, conforme efeito combinado ($-2,65$) existente entre as variáveis x_2 e x_3 .

Assim como na Redução de Umidade (RX), avaliou-se a possibilidade de o Número Adimensional estar interferindo nos resultados de Teor de Fenólicos Totais (TPC) e Redução de Fenólicos Totais (RPT). Na Figura 4.10 está apresentada a distribuição de pontos entre a Redução de Fenólicos Totais (RPT) e os Números Adimensionais (Ψ) encontrados em cada ensaio.

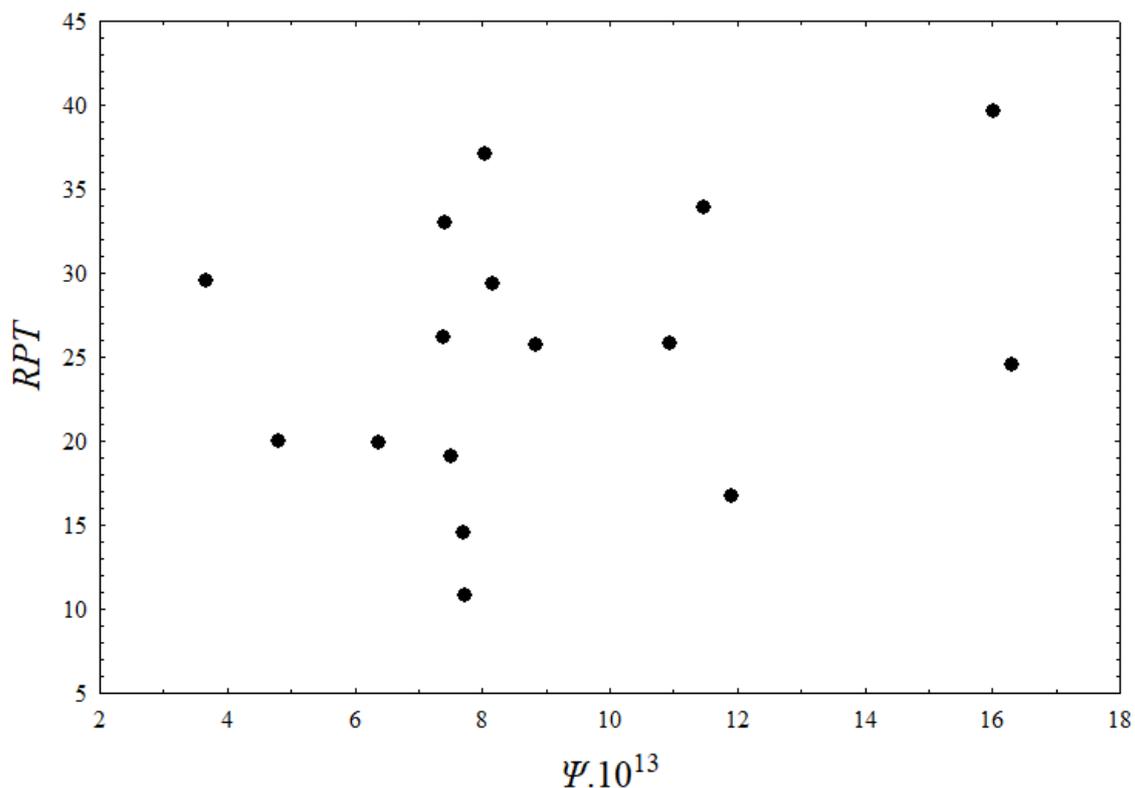


Figura 4.10 – Redução de Fenólicos Totais (RPT) em função do valor do Número Adimensional (Ψ).

Diferente da Redução de Umidade (RX), não foi observada uma correlação das condições meteorológicas englobadas no Número Adimensional (Ψ) com as variáveis respostas de Redução de Fenólicos Totais (RPT). Logo, concluiu-se que as variáveis meteorológicas do Número Adimensional (Ψ) não interferiram nos compostos fenólicos totais.

Vale lembrar que nas secagens feitas em terreiros, é difícil o controle da temperatura e, portanto, da qualidade final do café. Reis *et al.* (2011) mencionaram que a secagem em terreiro pode durar até 15 dias, sob a exposição indesejada à luz solar que é rica em radiação ultravioleta e pode ser prejudicial aos compostos bioativos.

Assim, as melhores condições de secagem para preservação dos compostos são aquelas com maiores temperaturas, dentro dos limites desta dissertação. A carga mássica de grãos pode ser configurada com maiores níveis, haja vista que a variável pouco interfere na degradação dos fenólicos.

4.4.2 Compostos flavonoides totais

Na Figura 4.11 são mostrados os resultados do Teor de Flavonoides Totais (*TFC*) para o café estudado. Na Figura 4.12 são apresentadas as Reduções de Flavonoides Totais (*RFT*) com a temperatura de ar de secagem de cada teste. De acordo com os testes experimentais, o Teor de Flavonoides Totais (*TFC*) *in natura* apresentou o valor de $5,78 \pm 0,24$ mg de rutina/100 g de amostra seca, enquanto os Teores de Flavonoides Totais (*TFC*) após a secagem apresentaram valores entre $3,48 \pm 0,17$ e $5,09 \pm 0,13$ mg de rutina/100 g de amostra seca. As reduções de flavonoides totais permaneceram entre 11,9% e 40,0%. Silva (2015b) encontrou valores de flavonoides totais do resíduo de maracujá (*Passiflora edulis*) de 2,87 mg de rutina/100 g de amostra seca. Silva (2014) apresenta valores de 1,00 mg de rutina/100 g de amostra seca para o resíduo da acerola (*Malpighia emarginata D. C.*), enquanto Silva (2017) encontrou um teor de fenólicos totais para a Spirulina (*Spirulina platensis*) de 4,83 mg de rutina/100 g de amostra seca.

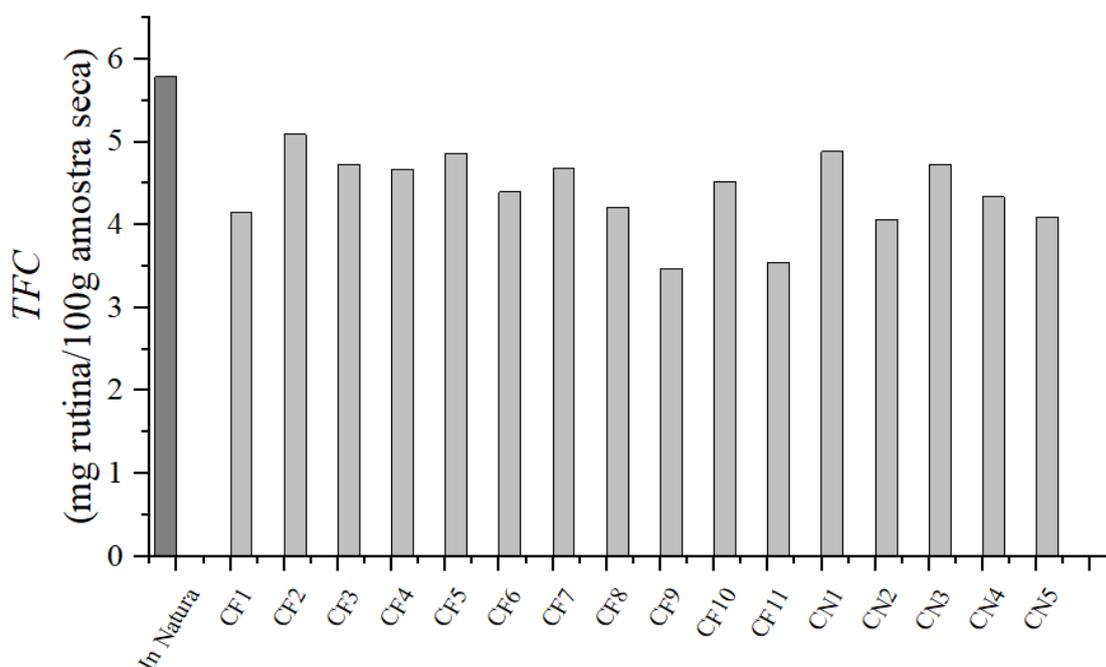


Figura 4.11 – Teor de flavonoides totais *in natura* e após os testes com o café.

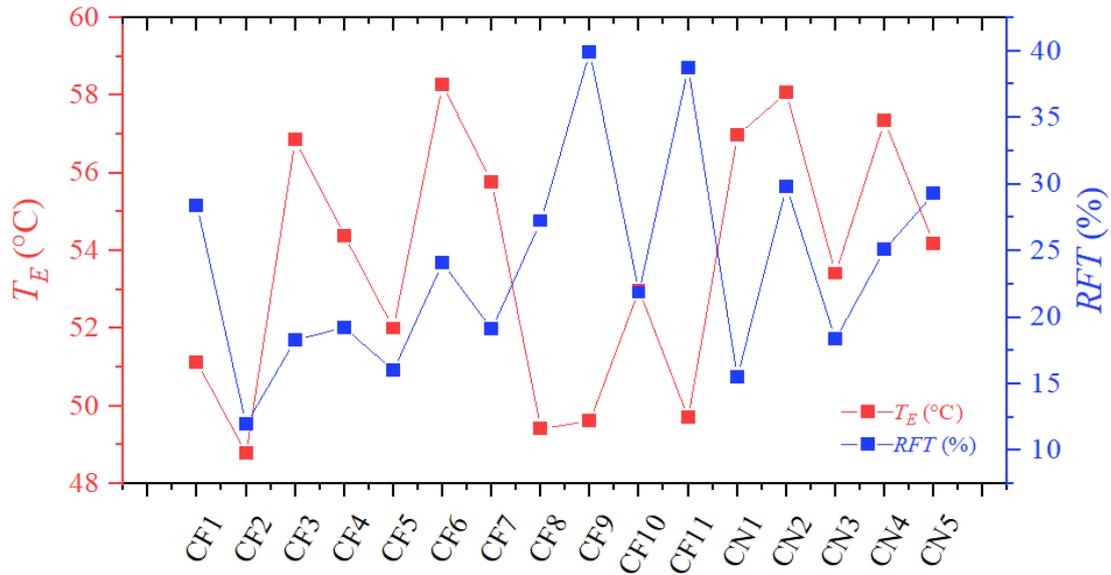


Figura 4.12 – Comparação entre a redução de flavonoides totais e a temperatura de ar de secagem.

Foi realizada uma regressão múltipla, utilizando o software STATISTICA® 7, para quantificar os efeitos da carga mássica de café (x_2) e temperatura do ar de secagem (x_3) na redução de flavonoides totais. A equação obtida na regressão está representada abaixo pela Equação 4.6:

$$RFT(\%) = 18,61 + 5,92x_2 - 7,74x_3 + 8,47x_3^2 - 4,47x_2x_3 \quad (R^2 = 0,8712) \quad (4.6)$$

A Figura 4.13 é a superfície de resposta da Equação 4.6 e mostra o efeito das variáveis carga mássica de grãos (x_2) e temperatura do ar de secagem (x_3) sobre a redução total de flavonoides.

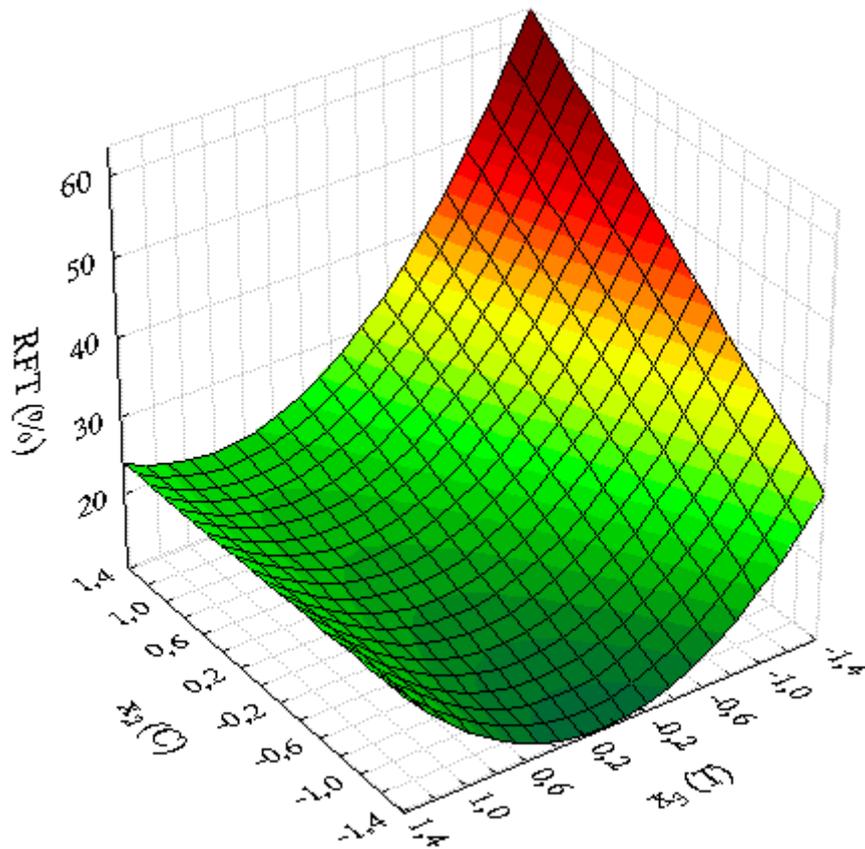


Figura 4.13 – Superfície de resposta de x_2 (carga mássica de café) e x_3 (temperatura do ar de secagem) para a redução de flavonoides.

Observa-se claramente na Figura 4.13 que, analogamente ao que aconteceu com os fenólicos, as maiores temperaturas levam a menores degradações de flavonoides. Altas temperaturas podem provocar estresse térmico nos bioativos, fazendo com que o café seja mais degradado, justificando o parâmetro da variável quadrática (8,47) da temperatura do ar de secagem (x_3). Com menores temperaturas de secagem, a redução de flavonoides é maior, devido à presença de enzimas inibidoras de alguns flavonoides e o favorecimento de reações de Maillard (SILVA, 2015b; SILVA, 2017). As temperaturas mais intermediárias de secagem fazem com que haja desnaturação das enzimas e rompimento das membranas celulares do fruto, liberando para o meio compostos intracelulares, entre eles, flavonoides (SILVA, 2015b; SILVA, 2014). Porém, a Figura também mostra que é possível se obter baixas Reduções de Flavonoides Totais (*RFT*) com altas temperaturas e altas cargas mássicas de café.

Como realizado com a Redução de Fenólicos Totais (*RPT*) e a Redução de Umidade (*RX*), investigou-se, também, a influência do Número Adimensional sobre os valores de Teor de Flavonoides Totais (*TFC*) e da Redução de Flavonoides Totais (*RFT*). Na Figura 4.14 está apresentada a distribuição de pontos da Redução de Flavonoides Totais (*RFT*) com o Número Adimensional (Ψ) de cada ensaio realizado.

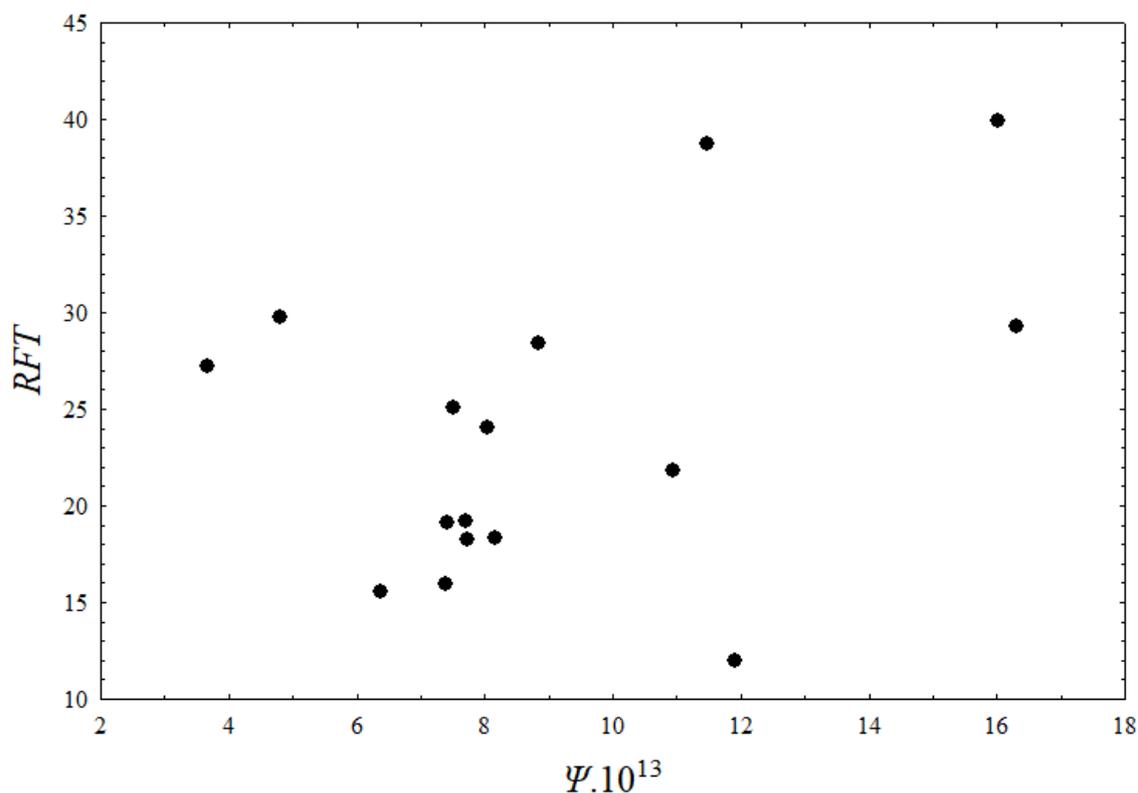


Figura 4.14 – Redução de Flavonoides Totais (*RFT*) em função do Número Adimensional (Ψ).

Assim como nos compostos fenólicos, não se observou uma correlação das condições meteorológicas envolvidas no Número Adimensional (Ψ) com as variáveis respostas de Redução de Flavonoides Totais (*RFT*). Assim, foi possível avaliar que as variáveis meteorológicas do Número Adimensional (Ψ) não interferiram nos compostos flavonoides.

Silva (2014), Silva (2015b) e Silva (2017) notaram que o comportamento de altas temperaturas reduzirem menos os compostos flavonoides também pode estar associado a reações de Maillard que promovem a presença de melanoidinas. No entanto, a redução dos flavonoides ainda ocorre, se comparado com o valor *in natura*, comportamento

relatado por Nogueira (2016). No caso da Figura 4.13, nota-se que as mais altas degradações estão em baixas temperaturas e altas cargas mássicas. Assim, é possível observar que as melhores configurações para manutenção de flavonoides são a temperatura mais alta e cargas mássicas maiores.

4.4.3 Cafeína

Na Figura 4.15, é apresentado um gráfico com os Teores de Cafeína (*TC*) de cada teste. De acordo com os testes experimentais, a cafeína *in natura* apresentou um valor inicial de 1,52 g/100 g de amostra seca. Após as secagens, os teores de cafeína apresentaram valor médio de $1,39 \pm 0,13$ g/100 g de café seco. Abrahão *et al.* (2010) colocam como um valor médio de cafeína do café arábica em 1,4 g/100 g de café seco, onde podem ser encontrados cafés que variam de 0,5 a 2,0 g/100 g de café.

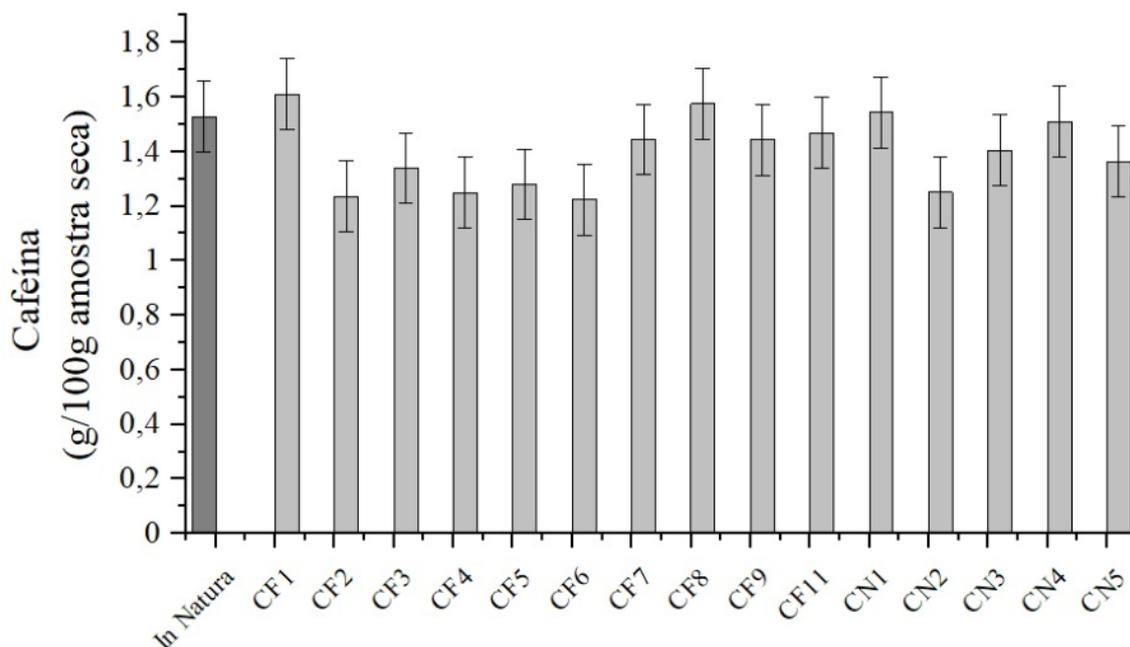


Figura 4.15 – Teor de cafeína *in natura* e após os testes de secagem.

A Figura 4.15 mostra que os valores de Teor de Cafeína (*TC*) são iguais estatisticamente, como se pode ver através das barras de erros. Este comportamento da cafeína foi evidenciado por Clarke e Macrae (1985), que comentam que a cafeína é um composto bastante estável química e termicamente, uma vez que sua temperatura de sublimação é de aproximadamente 180°C. Como a secagem deste trabalho não atinge temperaturas tão intensas, dificilmente ocorre uma degradação, reação ou sublimação da

substância. Portanto, estes valores próximos de cafeína entre os testes e com o valor *in natura* era esperado, bem como uma independência do teor de cafeína com as variáveis temperatura de secagem (x_3) e a carga mássica de café (x_2). Uma regressão múltipla foi avaliada entre o Teor de Cafeína (TC) com a temperatura de secagem (x_3) e a carga mássica de café (x_2) confirmando o não estabelecimento de uma correlação entre as variáveis.

4.4.4 Trigonelina

É apresentada na Figura 4.16 o Teor de Trigonelina (TT) *in natura* e após cada ensaio de secagem. O café *in natura* atingiu um teor de trigonelina de 556,2 mg/100 g de café seco e obteve um valor médio de $327,5 \pm 32,3$ mg/100 g de amostra seca. Clarke e Macrae (1985) apresentam teores de trigonelina para o café arábica de 1% em base seca, podendo variar de 0,6% a 1,2%.

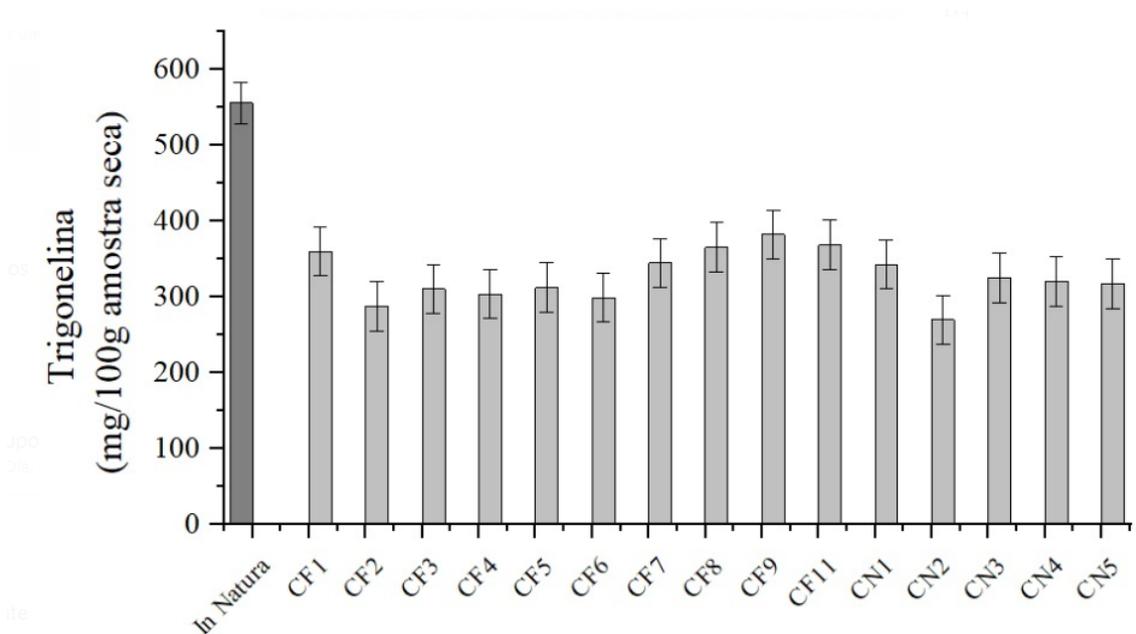


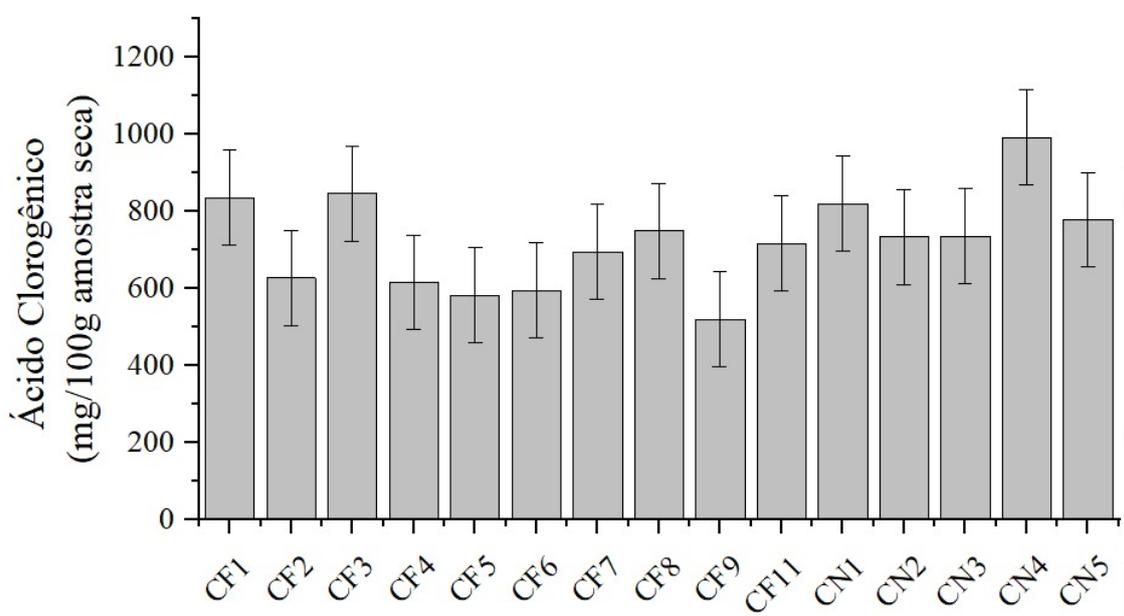
Figura 4.16 – Teor de trigonelina *in natura* e após os testes de secagem.

É possível notar que o café sofreu degradações com relação à trigonelina. Seu valor *in natura* é consideravelmente maior que os valores após os testes. Esta degradação esteve entre 28,7% e 49,7%. A trigonelina é uma molécula que possui certa capacidade de degradação, sendo extremamente solúvel em água e pouco solúvel em compostos orgânicos. A sua degradação é benéfica, uma vez que os produtos da degradação são de valor nutricional (CLARKE; MACRAE, 1985). Assim como na cafeína, avaliou-se uma

regressão do Teor de Trigonelina (*TT*) com a temperatura de secagem (x_3) e a carga mássica de café (x_2). No entanto, não foi possível encontrar uma equação que correlacionasse a trigonelina com as variáveis do secador. Essa degradação pode ter causa em reações de Maillard que podem ocorrer durante a secagem do café.

4.4.5 Ácido Clorogênico

Na Figura 4.17 estão apresentados os Teores de Ácido Clorogênico (*TAC*) *in natura* e também os teores pós-secagem. O Teor de Ácido Clorogênico (*TAC*) encontrado após os testes foi de $723,2 \pm 123,2$ mg/100 g de café seco. São encontrados no café teores de ácido 5-cafeoilquínico de 5,5 g para cada 100 g de café em base seca e 0,32 a 0,73 g/100 g de café seco para o ácido 3-cafeoilquínico.(ABRAHÃO et al., 2010).



O valor de ácido clorogênico *in natura* não foi apurado devido a um erro de operação. Devido à pandemia do Covid-19, não foi possível refazer a extração e a releitura de ácido clorogênico *in natura*. No entanto, é possível notar que os valores de ácido clorogênico após os testes variaram, diferentemente da cafeína.

Assim como na cafeína e na trigonelina, foi feita uma regressão múltipla entre o Teor de Ácido Clorogênico (*TAC*) e a temperatura de secagem (x_3) e a carga mássica de café (x_2), mas não foi encontrada uma correlação entre as variáveis do secador com o composto bioativo do café.

4.5 Melhores condições de trabalho

As maiores reduções de umidade (RX) foram encontradas em temperaturas de secagem (T_E) mais alta e cargas mássicas de café (C) mais baixas. Porém, como o efeito da carga mássica do café é bem pequeno, é possível se ter altas reduções de umidade para altos valores de carga mássica de grãos. Assim, pode-se secar mais café em um mesmo processo, permitindo reduções de umidade que favorecem a durabilidade do café durante seu armazenamento ($X_F \leq 18\%$).

As reduções de fenólicos totais (RPT) mais baixas foram encontradas em temperaturas de secagem (T_E) mais altas e também em cargas mássicas de grãos (C) mais altas. Em concordância com as condições melhores para a redução de umidade (RX), as melhores condições para se manter maior teor de fenólicos totais (TPC) são a altas temperaturas de secagem e também altas cargas mássicas de café, condições também boas para a manutenção de um teor de flavonoides totais (TFC) mais alto, haja vista que baixas reduções de flavonoides totais (RFT) também foram encontradas nestas configurações.

Como as variáveis do Secador Solar de Bandeja não interferiram na manutenção ou na degradação da cafeína, da trigonelina e do ácido clorogênico, é possível executar a secagem de café com as configurações de maiores temperaturas e de cargas mássicas mais altas.

Assim, é possível confirmar que as melhores condições para se operar o Secador Solar de Bandejas são nos níveis mais altos de temperatura (a aproximadamente 58°C) e cargas mássicas de café mais altas ($4,17 \text{ kg/m}^2$).

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho pôde mostrar que a temperatura do ar de secagem é uma variável de suma importância tanto na secagem quanto na manutenção da qualidade do café a ser seco. Altas temperaturas, além de favorecerem a desidratação do grão, levaram a menores degradações de café. Para isso, é importante se observar com mais atenção a vazão de ar de secagem e a radiação solar durante a operação de um secador solar de bandejas e monitorar a temperatura que é afetada por estas variáveis. O secador atingiu, neste trabalho, temperaturas de secagem altas ($T_E > 45^\circ\text{C}$) para a secagem de café (49 a 58°C).

A radiação solar encontrada nos testes variou entre 617 e 866 W/m^2 e, embora não seja controlável, influencia bastante no aquecimento do ar que é adicionado ao sistema. A vazão de ar, embora menos influente que a radiação solar, possui contribuição nestes valores, afinal, com maiores vazões, mais ar deve ser aquecido pela mesma potência solar, fazendo com que as temperaturas sejam menores. As vazões de ar que o ventilador fornece estão dentro da faixa de 98 e $306 \text{ m}^3/\text{h}$, enquanto foi visto que a vazão de ar em convecção natural no secador foi de $2,44 \text{ m}^3/\text{h}$.

Foi possível concluir, também, que o modelo de Overhults foi o mais adequado para descrever a cinética de secagem. Foram analisados, também, os efeitos das variáveis operacionais no parâmetro k (constante cinética) do modelo de Overhults. Este parâmetro está diretamente relacionado com a difusividade efetiva do material. Seus valores dependeram bastante da temperatura do ar de secagem, nas quais a temperatura mais baixa, associada a vazões de ar mais altas, forneceram altos valores do parâmetro k devido ao início da secagem, que possui uma reposição interna da água na superfície e remoção da água superficial iguais, enquanto que as altas temperaturas fornecem altos valores do parâmetro k devido a fase de secagem que a difusão interna governa. A carga mássica também possui influência sobre o parâmetro k .

Foram quantificadas as reduções de umidade do café nos experimentos com convecção natural e convecção forçada no secador solar de bandejas. Observou-se que a

temperatura de ar de secagem possui grande importância no valor final da umidade. Também foi possível aferir que a carga mássica de grãos, todavia, possui efeito significativo e negativo sobre sua redução. Porém, como a temperatura de secagem influencia nesta resposta muito mais que da carga mássica de café, maiores temperaturas e altas cargas mássicas levam a um resultado satisfatório da operação unitária.

O secador solar de bandejas foi capaz de secar o café arábica a níveis aceitáveis de umidade para armazenamento, visto que foi capaz de reduzir a umidade do café a níveis inferiores a 18% em umidade na maioria dos testes. É possível alcançar umidades ainda mais baixas se o tempo de secagem for expandido, mas para averiguação serão necessários testes futuros.

Tendo como foco os fenólicos e flavonoides, notou-se comportamentos vistos anteriormente na literatura, baixas temperaturas sendo causas de degradação de bioativos, por causa de inibição pelas enzimas não desnaturadas. À medida que a temperatura aumenta, mais as enzimas são desnaturadas, menores são as degradações de fenólicos e flavonoides. Por outro lado, a degradação destes bioativos foi vista. A carga mássica pode ser mais alta para se processar mais massa para cada teste.

O Número Adimensional calculado mostrou-se uma importante ferramenta para avaliar os ruídos meteorológicos dos ensaios. Além de justificar os valores de variância não muito expressivas, viu-se, inclusive, uma influência destes ruídos sobre a redução de umidade. O menor valor de adimensional sugere uma temperatura ambiente mais alta e uma umidade relativa do ar mais baixa, favorecendo, assim, a desidratação do material. Por outro lado, o maior valor de adimensional indica uma temperatura ambiente menor, com umidade relativa do ar mais alta, reduzindo o potencial de remoção da umidade do grão. Além disso, não foi notada uma correlação entre o Número Adimensional e os compostos bioativos, levando à conclusão que as variáveis meteorológicas do Número Adimensional não possuem interferência nas suas reduções.

Foi possível notar que a cafeína não teve significativas variações no seu teor antes ou após a secagem, uma vez que a molécula é bastante estável térmica e quimicamente, permitindo a manutenção do seu valor médio de 1,4 g/100 g de café seco. A trigonelina foi degradada do seu valor inicial, possuindo um valor médio de $327,5 \pm 32,3$ mg/100 g de amostra seca. Já o ácido clorogênico possuiu um valor médio de $723,2 \pm 123,2$ mg/100 g

de café seco. No entanto, nenhum destes três teores sofreu influência das variáveis estudadas carga mássica de café (x_2) e temperatura do ar de secagem (x_3) do Secador Solar de Bandejas.

Portanto, é possível que se use o secador de bandejas com coleta solar para secar o café arábica como uma alternativa viável, visto que há uma taxa razoável de secagem, sendo capaz de reduzir sua umidade até um ponto satisfatório de armazenamento ($X_F \leq 18\%$), mantendo as reduções de compostos bioativos em níveis baixos para se manter um grão com boa qualidade. A umidade de 18%, adequada para armazenamento, foi atingida com seis horas em quase todos os testes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, S. A. et al. Compostos bioativos em café integral e descafeinado e qualidade sensorial da bebida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p. 1799–1804, 2008.

ABRAHÃO, S. A. A. et al. Compostos bioativos e atividade antioxidante do café (*Coffea arabica* L.). **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 414–420, 2010.

AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2001.

AFONSO JÚNIOR, P. C. et al. Atividade de água, crescimento microbiológico e perda de matéria seca dos grãos de café (*Coffea arabica* L.) em diferentes condições de armazenamento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 5, n. 31, p. 17–24, 2003.

ALVES, G. E.; ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F. M.; SIQUEIRA, V. C.; OLIVEIRA, P. D.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 238–247, 2013.

ANDRADE, L. A. **Aproveitamento Do Caroço De Manga: Um Estudo De Viabilidade Da Pirólise Usando Energia Solar**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

ANDRADE, L. A.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. A study on dynamic heating in solar dish concentrators. **Renewable Energy**, v. 87, p. 501–508, 2016.

ARAI, K. et al. Simultaneous Determination of Trigonelline, Caffeine, Chlorogenic Acid and Their Related Compounds in Instant Coffee Samples by HPLC Using an Acidic Mobile Phase Containing Octanesulfonate. **Anal Sci**, v. 31, n. 8, p. 831–835, 2015.

ARANDA SALDANA, M. D. **Extração de Cafeína, Trigonelina e Acido Clorogenico dos Graos de Café com CO2 Supercrítico**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1997.

BARBOSA, F. D. **Avaliação De Métodos Para O Monitoramento da Qualidade do Café**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2011.

BARROS, S. **Coffee Annual**. São Paulo: [s.n.].

BEHLING, E. B. et al. Flavonóide quercetina: aspectos gerais e ações biológicas. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 15, n. 3, p. 285–292, 2004.

BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1665–1691, 2011.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena, second edition**. [s.l.: s.n.]. v. 1

BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1609–1615, 2008.

BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 99, n. 4, p. 430–436, 2010.

- CASTILLO TÉLLEZ, M. et al. Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. **Solar Energy**, v. 159, n. June 2017, p. 898–907, 2018.
- CLARKE, R. J.; MACRAE, R. **Coffee**. 1. ed. Nova Iorque: Elsevier Ltd, 1985. v. 1
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. Brasília: [s.n.].
- DONG, W. et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. **Food Chemistry**, v. 234, p. 121–130, 2017.
- DUZZIONI, A. G. et al. Effect of drying kinetics on main bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) residue. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 1041–1047, 2013.
- EL HAGE, H. et al. An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment. **Energy**, v. 157, p. 815–829, 2018.
- GRIGG, D. The worlds of tea and coffee: Patterns of consumption. **GeoJournal**, v. 57, n. 4, p. 283–294, 2002.
- GUIMARÃES, A. C.; BERBERT, P. A.; SILVA, J. S. Ambient-Air Drying of Pre-Treated Coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 69, p. 53–62, 1998.
- IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Unit Operations in Food Engineering**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- KNIGHT, C. A. et al. Beverage caffeine intake in US consumers and subpopulations of interest: Estimates from the Share of Intake Panel survey. **Food and Chemical Toxicology**, v. 42, n. 12, p. 1923–1930, 2004.
- KREICBERGS, V.; DIMINS, F. Biologically active compounds in roasted coffee. ... **Proceedings of the 6th ...**, n. January, p. 110–115, 2011.
- KUMAR, M.; SANSANIWAL, S. K.; KHATAK, P. Progress in solar dryers for drying various commodities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, n. 1, p. 346–360, 2016.
- LIMA, A. C. B. et al. **Manual de Desidratação Solar de Frutas, Ervas e Hortaliças**. 1. ed. Piracicaba: [s.n.].
- MACHADO, A. V. **Estudo Da Secagem Do Pedúnculo Do Caju Em Sistemas Convencional E Solar : Modelagem E Simulação Do Processo**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7. ed. [s.l.: s.n.].
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: [s.n.]. v. 1
- MUSTAYEN, A. G. M. B.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. Performance study of different solar dryers: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 463–470, 2014.

- NOGUEIRA, G. D. R. **Estudo de técnicas híbridas de desidratação de resíduos de acerola.** [s.l: s.n.].
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 1
- PRADO JÚNIOR, C. **História Econômica do Brasil.** 1. ed. São Paulo: Portal do Criador, 2006.
- SFREDO, M. A. **Estudo da Dispersão na Secagem de Frutos de Café em Secador de Bandejas Vibradas.** [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- SFREDO, M. A.; FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R. Heat and mass transfer in coffee fruits drying. **Journal of Food Engineering**, v. 70, n. 1, p. 15–25, 2005.
- SILVA, D. Í. S. DA. **Estudo da transferência de calor e massa na secagem em leito fixo visando o aproveitamento de resíduo de acerola (Malpighia emarginata DC).** [s.l: s.n.].
- SILVA, N. C. DA. **Desidratação De Resíduos Do Processamento De Maracujá-Amarelo Por Diferentes Metodologias.** [s.l: s.n.].
- SILVA, J. P. S. **Utilização de energia solar para secagem de microalgas.** [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- SILVA, P. B. **Secagem De Resíduos De Frutas Em Secador Roto-Aerado.** [s.l: s.n.].
- SILVA, P. B. **Secagem híbrida do resíduo de acerola em secador roto-aerado com infravermelho e extração de compostos bioativos.** [s.l: s.n.].
- SUNARHARUM, W. B.; WILLIAMS, D. J.; SMYTH, H. E. Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. **Food Research International**, v. 62, p. 315–325, 2014.
- TELLO, J.; VIGUERA, M.; CALVO, L. Extraction of caffeine from Robusta coffee (*Coffea canephora* var. Robusta) husks using supercritical carbon dioxide. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 39, n. 5, p. 561–563, 2008.
- VÉRAS, A. O. M. **Secagem de pimenta dedo-de-moça (*Capsicum baccatum* var. *pendulum*) em secador convectivo horizontal.** [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2010.

APÊNDICE A

RESULTADOS DE MEDIDA DE VAZÃO VOLUMÉTRICA DE AR

Nesta seção, encontra-se os dados de vazão volumétrica de ar para cada uma das nove posições que foram aferidas no ventilador acoplado ao tubo. Os valores estão apresentados na Tabela A1 deste apêndice. As velocidades apresentadas na tabela estão todas em metros por segundo.

Tabela A1 - Velocidades do ar em cada posição da resistência do ventilador.

Altura (m)	Posição da resistência do ventilador								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0,02	0,95	1,09	1,36	1,47	1,70	1,80	2,18	3,23	3,43
0,03	0,96	1,03	1,19	1,44	1,60	1,73	2,17	3,06	3,36
0,04	0,93	1,08	1,28	1,42	1,64	1,75	2,15	3,20	3,39
0,05	0,97	1,12	1,32	1,46	1,66	1,77	2,13	3,17	3,50
0,06	0,95	1,10	1,28	1,45	1,65	1,76	2,18	3,15	3,48
0,07	0,92	1,05	1,23	1,41	1,52	1,67	2,08	2,96	3,26
0,08	0,96	1,03	1,15	1,38	1,49	1,55	1,87	2,85	3,23
0,09	0,95	0,97	1,08	1,34	1,36	1,49	1,97	2,63	3,16
0,10	0,91	1,06	1,18	1,34	1,51	1,60	2,28	2,89	3,18
0,11	0,92	1,02	1,33	1,39	1,60	1,73	2,25	2,94	3,18
0,12	0,95	1,09	1,40	1,58	1,60	1,92	2,40	3,03	3,38
0,13	0,94	1,06	1,42	1,61	1,69	1,92	2,50	3,13	3,59
0,14	0,98	1,12	1,48	1,60	1,71	1,91	2,48	3,13	3,44
0,15	0,99	1,11	1,42	1,62	1,72	1,90	2,45	3,15	3,30
0,16	1,00	1,12	1,45	1,57	1,77	1,95	2,35	3,12	3,53
0,17	0,99	1,10	1,33	1,44	1,63	1,78	2,03	2,70	3,22
0,18	1,00	1,09	1,24	1,38	1,54	1,71	1,98	2,71	3,17

APÊNDICE B

RESULTADOS DO CÁLCULO DO ADIMENSIONAL

Nesta seção estão apresentados os parâmetros, as variáveis e os respectivos valores que compõem o valor do adimensional. Os dados estão apresentados na Tabela B1 abaixo.

Tabela B1 - Dados e valores das variáveis e parâmetros do adimensional

Teste	G	UR	T_{∞}	ρ_{∞}	UA_{amb}	C_A	$\ln P_{sat}$	P_{sat}	$\Psi \cdot 10^{13}$
CF1	745	32,5	31,5	1,154	0,00954	0,0110	8,478	4807,506	8,114
CF2	705	38,4	29,9	1,160	0,01029	0,0119	8,386	4387,093	11,902
CF3	866	28,3	30,2	1,159	0,00769	0,0089	8,404	4463,391	7,726
CF4	826	30,1	31,5	1,154	0,00882	0,0102	8,478	4807,506	7,699
CF5	743	29,1	31,1	1,155	0,00833	0,0096	8,455	4699,25	6,629
CF6	852	30,3	31,5	1,154	0,00888	0,0102	8,478	4807,506	8,050
CF7	846	28,5	30,7	1,157	0,00797	0,0092	8,432	4593,119	7,419
CF8	617	25,7	33,6	1,146	0,00847	0,0097	8,596	5412,139	3,668
CF9	749	41,7	28,8	1,164	0,01050	0,0122	8,323	4116,957	16,020
CF10	823	35,1	30,8	1,156	0,00990	0,0114	8,438	4619,454	10,944
CF11	624	40,4	30,2	1,159	0,01103	0,0128	8,404	4463,391	11,464
CN1	772	28,2	31,3	1,154	0,00816	0,0094	8,467	4753,110	6,383
CN2	800	24,8	32,3	1,151	0,00759	0,0087	8,523	5030,535	4,794
CN3	748	29,2	28,9	1,164	0,00736	0,0086	8,329	4140,901	7,717
CN4	814	28,5	29,9	1,160	0,00761	0,0088	8,386	4387,093	7,506
CN5	763	40,4	27,8	1,168	0,00958	0,0112	8,265	3884,063	16,297

APÊNDICE C

RESULTADOS DO CÁLCULO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Neste apêndice encontram-se os valores de parâmetros utilizados para o modelo de GAB de umidade de equilíbrio do café arábica (*Coffea arabica*) a 50°C e com mucilagem a 16,1% de umidade, assim como os valores de umidade de equilíbrio pelo modelo GAB.

Tabela C1 - Parâmetros do modelo de GAB a 50°C e mucilagem de 16,1% de umidade.

Parâmetro	Valor
X_m	0,0434
C	1000,1
k	0,8867

Tabela C2 - Umidade de equilíbrio calculada pelo modelo GAB

Teste	U_R (%)	T_E (°C)	T_E (K)	P_{sat} (Pa)	U_A	a_w	X_{eq}
CF1	32,5	51,1	324,3	13598,2	0,0284	0,0284	0,0429
CF2	38,4	48,8	321,9	12095,8	0,0299	0,0299	0,0430
CF3	28,3	56,9	330,0	17932,3	0,0328	0,0328	0,0433
CF4	30,1	54,4	327,5	15938,9	0,0309	0,0309	0,0431
CF5	29,1	52,0	325,2	14191,3	0,0264	0,0264	0,0427
CF6	30,3	58,3	331,4	19171,3	0,0378	0,0378	0,0436
CF7	28,5	55,8	328,9	17025,9	0,0313	0,0313	0,0431
CF8	25,7	49,4	322,6	12484,4	0,0203	0,0203	0,0419
CF9	41,7	49,6	322,8	12612,0	0,0341	0,0341	0,0434
CF10	35,1	53,0	326,1	14886,6	0,0338	0,0338	0,0433
CF11	40,4	49,7	322,8	12662,9	0,0331	0,0331	0,0433
CN1	28,2	57,0	330,1	18026,9	0,0329	0,0329	0,0433
CN2	24,8	58,1	331,2	18984,6	0,0303	0,0303	0,0430
CN3	29,2	53,0	326,2	14901,7	0,0279	0,0279	0,0428
CN4	28,5	57,3	330,5	18349,5	0,0338	0,0338	0,0433
CN5	40,4	54,2	327,3	15779,4	0,0418	0,0418	0,0439

APÊNDICE D – RESULTADOS DO ADIMENSIONAL DE SECAGEM

Tabela D1 - Dados de umidade reduzida de convecção forçada.

<i>t</i> (min)	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7	CF8	CF9	CF10	CF11
0	1,0000	1,0000	-	1,0000	-	-	-	-	1,0000	-	-
5	0,8902	-	1,0000	0,9684	-	-	1,0000	1,0000	-	-	-
10	-	0,9177	-	0,9793	1,0000	1,0000	0,9583	-	1,0169	1,0000	1,0000
20	0,8909	-	0,8175	0,9327	-	0,8876	-	0,8002	-	0,9666	-
30	0,8310	-	-	0,8492	0,8449	0,9253	0,9478	-	-	-	-
60	0,7851	0,8285	0,7554	-	0,8504	0,7264	0,8639	-	0,9298	0,7752	-
90	-	-	0,7375	-	0,7900	-	0,8261	0,7364	0,8584	0,7252	0,8918
120	-	-	-	0,7211	-	-	-	-	-	0,7074	0,8449
150	0,6364	0,7225	-	0,6062	0,6303	0,6429	-	0,5797	-	-	0,8399
180	-	-	0,6557	0,5892	-	0,6353	-	-	0,6645	0,6532	0,7803
210	0,5349	0,5293	0,6169	0,5260	0,6052	-	0,6664	-	0,6156	0,6395	-
240	-	0,5026	0,5243	-	0,5535	0,5350	0,5648	-	0,5957	-	0,6756
270	-	0,4430	0,4660	0,5081	0,4859	0,5043	-	0,4927	0,4544	0,5162	0,5973
300	0,4485	-	0,4286	0,4854	0,4764	0,3169	0,4492	-	-	-	0,5035
330	-	0,4062	0,4273	-	0,4123	-	-	-	0,4144	0,3818	-
360	-	-	0,3390	0,3809	0,4014	0,2713	0,2936	0,2920	-	-	0,4697

Tabela D2 - Dados de umidade reduzida de convecção natural.

t (min)	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
0	1,0000	-	1,0000	-	1,0000
5	-	-	-	1,0000	0,8768
10	-	1,0000	-	-	-
20	-	-	0,9513	0,9352	0,8721
30	0,8220	-	-	-	-
60	0,8028	0,8804	-	-	-
90	0,6798	-	-	-	-
120	-	-	-	-	0,7672
150	0,6878	-	-	-	0,7265
180	-	-	0,6841	0,6477	-
210	0,5357	0,6855	-	-	0,5623
240	0,4467	0,4678	-	-	-
270	0,4320	-	-	-	0,5144
300	-	0,3888	-	-	-
330	-	0,3413	-	0,4087	-
360	0,3521	-	0,5102	-	0,4920

APÊNDICE E

RESULTADOS DO CÁLCULO DA CINÉTICA DE SECAGEM

Nesta seção, apresenta-se os valores de R^2 para cada curva de cada modelo visto, assim como os valores médios dos parâmetros apresentados em cada modelo. A Tabela E1 mostra os valores de ajuste quadráticos, enquanto a Tabela E2 mostra os valores ajustados dos parâmetros de cada curva.

Tabela E1 – Resultados de R^2 das curvas dos ajustes dos modelos.

Teste	Modelo de cinética de secagem					
	Lewis <i>et al.</i>	Page	Henderson & Henderson	Overhults <i>et al.</i>	Brooker <i>et al.</i>	Sharaf-Elden <i>et al.</i>
CF1	0,9125	0,9808	0,9802	0,9808	0,9726	0,9516
CF2	0,9753	0,9753	0,9693	0,9753	0,9778	0,9756
CF3	0,9032	0,9310	0,9383	0,9310	0,9397	0,9052
CF4	0,9750	0,9869	0,9866	0,9869	0,9797	0,9848
CF5	0,9613	0,9766	0,9773	0,9766	0,9765	0,9683
CF6	0,9225	0,9285	0,9333	0,9285	0,9347	0,9241
CF7	0,9615	0,9739	0,9443	0,9739	0,9618	0,0000
CF8	0,9003	0,9384	0,9415	0,9384	0,9375	0,9078
CF9	0,9616	0,9888	0,9531	0,9888	0,9749	0,0000
CF10	0,9265	0,9513	0,9525	0,9513	0,9406	0,9340
CF11	0,9284	0,9820	0,9055	0,9820	0,9452	0,0000
CN1	0,9464	0,9655	0,9666	0,9655	0,9614	0,9548
CN2	0,9388	0,9590	0,9255	0,9590	0,9407	0,0000
CN3	0,9981	0,9999	0,9995	0,9999	0,9987	0,9997
CN4	0,9946	0,9946	0,9906	0,9946	0,9954	0,9959
CN5	0,8936	0,9288	0,9382	0,9288	0,9416	0,9064

Tabela E2 - Ajuste médio das curvas cinéticas.

Modelo de cinética de secagem	R^2	k	n	A
Lewis <i>et al.</i>	0,9437	0,00271	-	-
Page	0,9663	0,00768	0,9553	-
Henderson & Henderson	0,9564	0,00222	-	0,8953
Overhults <i>et al.</i>	0,9663	0,00255	0,9553	-
Brooker <i>et al.</i>	0,9612	0,00257	-	0,9751
Sharaf-Elden <i>et al.</i>	0,7130	0,00308	-	0,8583

APÊNDICE F

ANÁLISE DE RESÍDUOS DE MODELOS DE CINÉTICA DE SECAGEM

Neste apêndice estão apresentados os gráficos de resíduos dos modelos de cinética de secagem. Os modelos que foram vistos neste trabalho foram os de Lewis *et al.*, Page, Henderson e Henderson, Overhults *et al.*, Brooker *et al.*, e Sharaf-Elden *et al.* As Figuras F1, F2, F3, F4, F5 e F6 mostram os gráficos referentes aos resíduos das respectivas equações de cinética de secagem.

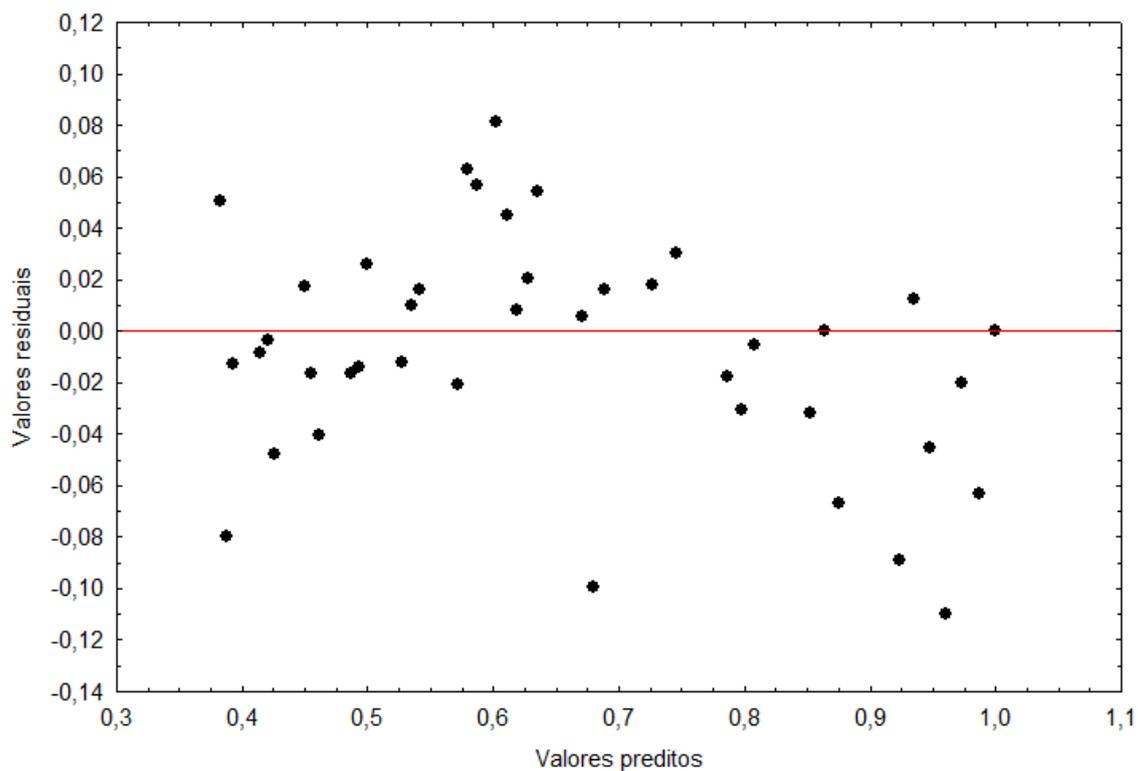


Figura F1 – Distribuição de resíduos para o modelo de Lewis *et al.*

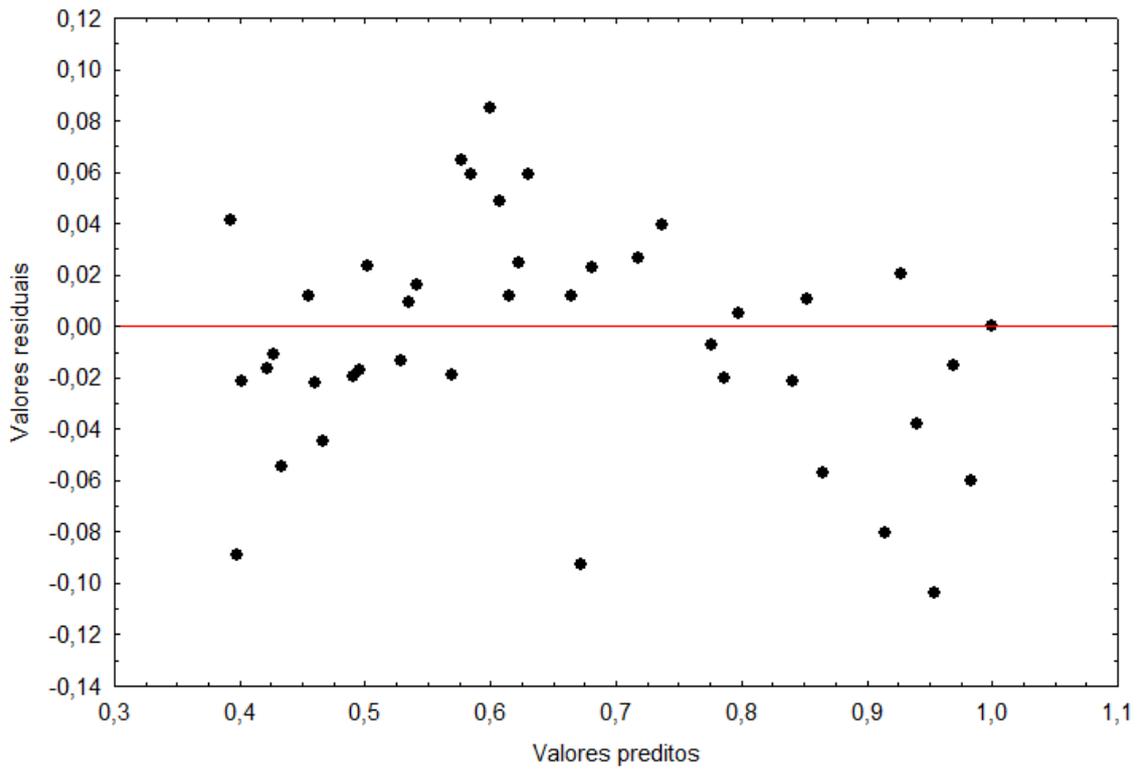


Figura F2 – Distribuição de resíduos para o modelo de Page.

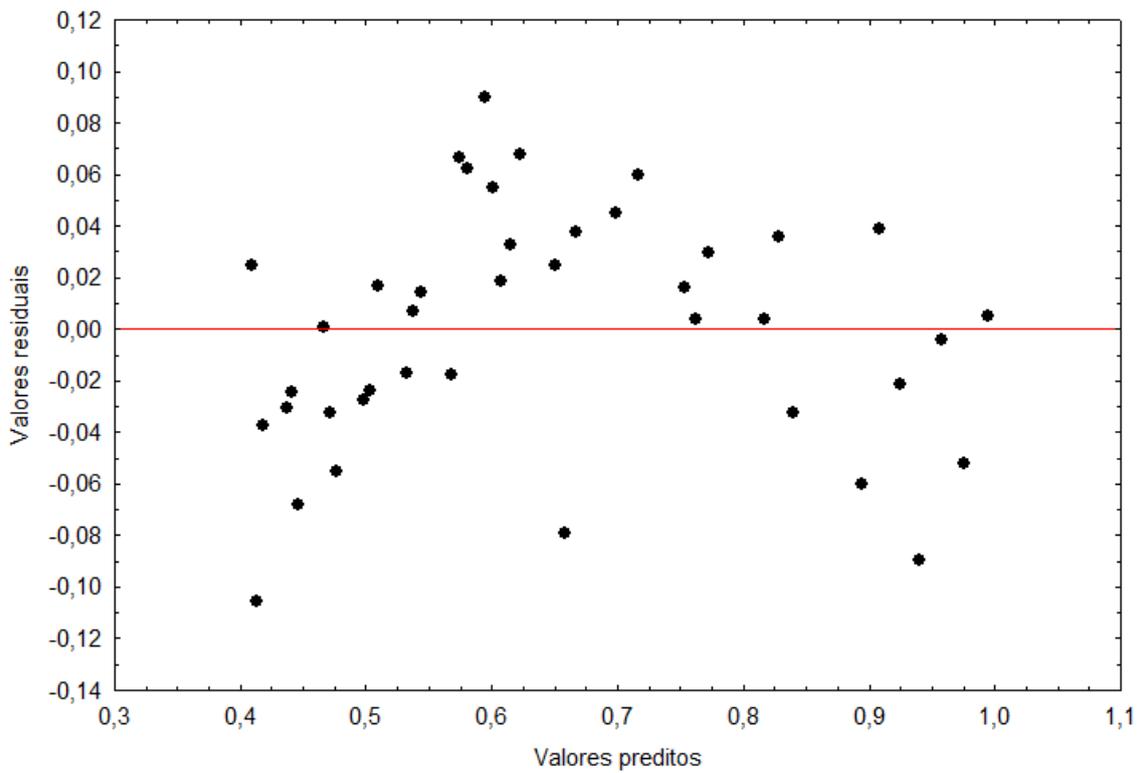


Figura F3 – Distribuição de resíduos para o modelo de Henderson e Henderson.

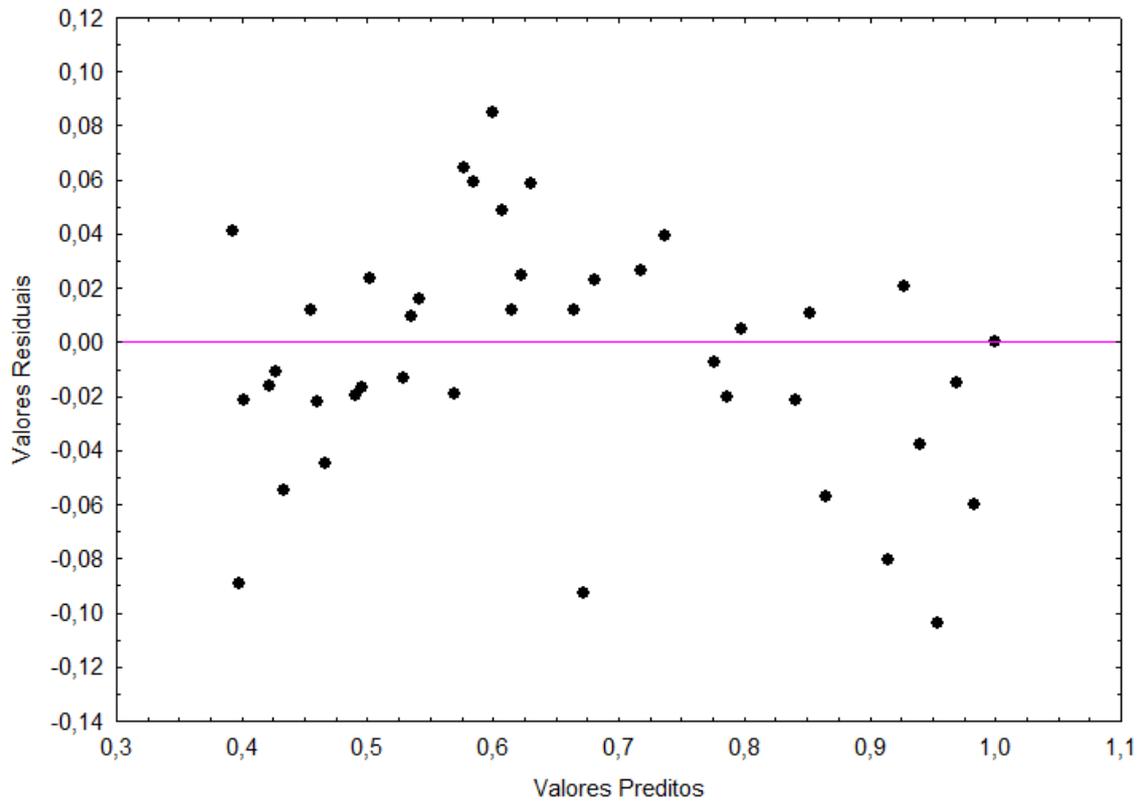


Figura F4 – Distribuição de resíduos para o modelo de Overhults *et al.*

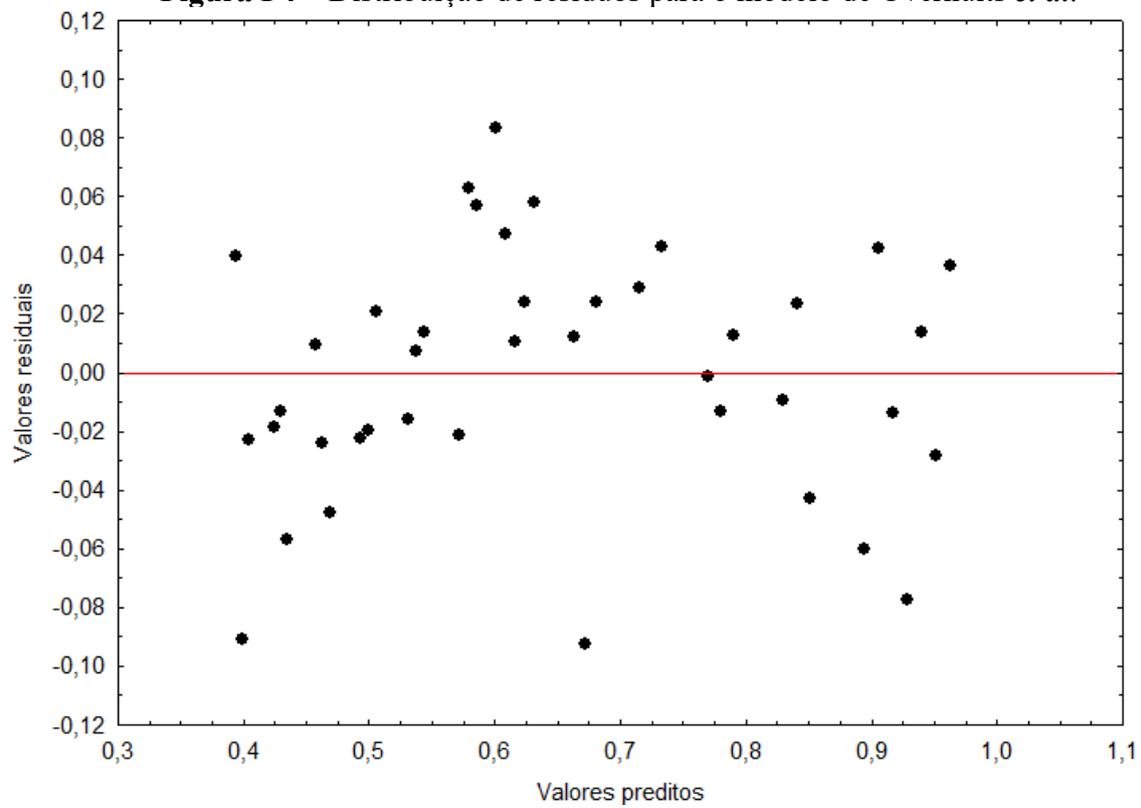


Figura F5 – Distribuição de resíduos para o modelo de Brooker *et al.*

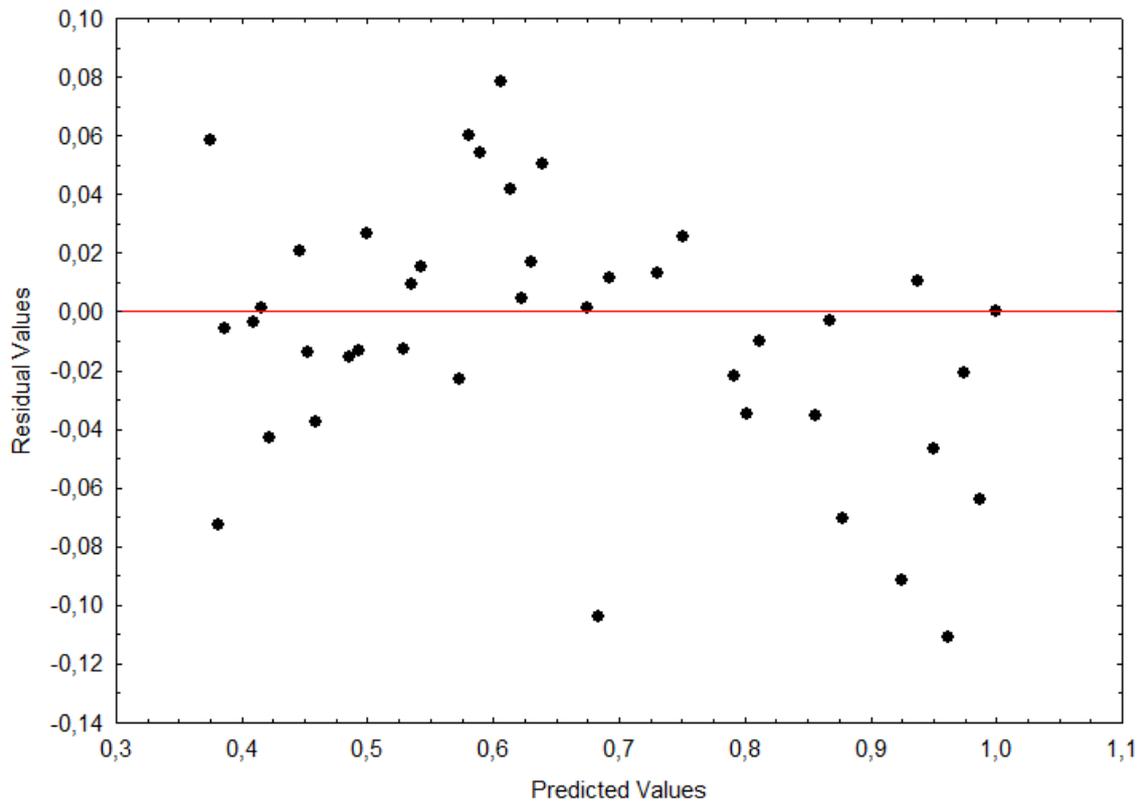


Figura F6 – Distribuição de resíduos para o modelo de Sharaf-Elden *et al.*

APÊNDICE G

VARIÁVEIS MONITORADAS DURANTE A SECAGEM SOLAR

Apresentados aqui os valores médios das variáveis monitoradas durante os testes experimentais da secagem, na Tabela G1.

Tabela G1 - Variáveis monitoradas durante a secagem do café.

Testes	G (W/m ²)	U_R (%)	T_∞ (°C)	T_E (°C)
CF1	745	32,5	31,5	51,1
CF2	705	38,4	29,9	48,8
CF3	866	28,3	30,2	56,9
CF4	826	30,1	31,5	54,4
CF5	743	29,1	31,1	52,0
CF6	852	30,3	31,5	58,3
CF7	846	28,5	30,7	55,8
CF8	617	25,7	33,6	49,4
CF9	749	41,7	28,8	49,6
CF10	823	35,1	30,8	53,0
CF11	624	40,4	30,2	49,7
CN1	772	28,2	31,3	57,0
CN2	800	24,8	32,3	58,1
CN3	748	29,2	28,9	53,4
CN4	814	28,5	29,9	57,3
CN5	763	40,4	27,8	54,2

APÊNDICE H

RESULTADOS DAS ANÁLISES DE COMPOSTOS BIOATIVOS

Neste apêndice encontram-se os resultados para os testes de compostos bioativos (fenólicos, flavonoides, cafeína, trigonelina e ácido clorogênico) para cada teste feito com o café. Os resultados estão apresentados na Tabela H1.

Tabela H1 - Valores de compostos bioativos de cada teste de secagem.

Teste	TPC*	TFC**	TC***	TT***	TAC***
<i>In natura</i>	542,5691 (±12,2339)	5,7883 (±0,2449)	1527,9	556,2	117,4
CF1	403,0899 (±11,7852)	4,1448 (±0,1540)	1610,4	360,1	836,5
CF2	451,9078 (±11,7022)	4,5305 (±0,1259)	1235,5	287,9	627,4
CF3	471,3487 (±11,6597)	4,7287 (±0,2098)	1338,9	310,6	846,0
CF4	463,5027 (±6,8989)	4,6757 (±0,1072)	1249,7	304,1	616,2
CF5	400,2744 (±20,9060)	4,688 (±0,2126)	1280,1	312,6	582,3
CF6	341,3822 (±11,6528)	4,3946 (±0,1910)	1224,5	299,4	595,0
CF7	363,5237 (±15,1762)	4,5573 (±0,1953)	1444,3	344,9	695,7
CF8	382,3222 (±11,1395)	4,2115 (±0,1766)	1574,7	365,6	750,0
CF9	327,3021 (±14,6277)	3,6691 (±0,1678)	1444,0	382,4	520,7
CF10	402,5008 (±19,5092)	4,5228 (±0,1789)	-	-	-
CF11	358,3262 (±11,0844)	3,7885 (±0,1480)	1468,6	368,7	717,1

Continua...

Continuação da Tabela H1

CN1	434,3375 (±14,1795)	4,7154 (±0,1360)	1542,7	343,1	819,8
CN2	434,0827 (±10,9847)	4,2164 (±0,1094)	1250,5	269,8	733,4
CN3	382,9928 (±18,0251)	4,3672 (±0,1864)	1403,9	325,2	736,1
CN4	438,9837 (±13,6825)	4,3371 (±0,1897)	1508,7	320,6	992,5
CN5	409,2399 (±10,0076)	4,4247 (±0,1717)	1364,3	317,3	778,7

* Medidas em mg AGE/100g de café seco

** Medidas em mg rutina/100g de café seco

*** Medidas em mg/100g de café seco

APÊNDICE I

REGRESSÃO MÚLTIPLA E QUADRO DE ANOVA

Nesta seção apresentam-se os quadros de ANOVA e de regressão múltipla que foram calculados ao longo de todo o trabalho. A Tabela I1 é referente à temperatura em função da vazão de ar e da radiação solar, enquanto as tabelas seguintes (Tabelas I2, I3 e I4) são referentes à secagem, aos bioativos e dependência do Número Adimensional na Redução de Umidade. A Tabela I5 refere-se ao parâmetro k de cinética de secagem.

Tabela I1 - Regressão múltipla da temperatura média do ar de secagem com a vazão do ar de secagem e a radiação solar média.

Regressão múltipla ($R^2=0,9471$)		
	Coeficiente de regressão	p
Média	49,74727	0,000000
Q	-0,03455	0,927214
G	2,60386	0,000008
QQ	0,68496	0,003797
GG	1,74652	0,002235
QG	0,00314	0,994282

Tabela I2 - Regressão múltipla da vazão de ar de secagem, carga mássica e temperatura do ar de entrada com a redução de umidade.

Regressão múltipla ($R^2=0,9730$)		
	Coeficiente de regressão	p
Média	18,21836	0,000000
Q	-0,05511	0,862726
C	-0,17942	0,687242
T	1,69706	0,014954
QQ	-0,34069	0,095631
CC	-0,15928	0,533682
TT	0,37719	0,473368
QC	0,20905	0,396848
QT	-0,39870	0,406061
CT	0,12504	0,738949

Tabela I3 - Regressão múltipla da vazão de ar de secagem, carga mássica e temperatura do ar de entrada com o teor de fenólicos totais.

Regressão múltipla ($R^2=0,9631$)		
	Coefficiente de regressão	p
Média	27,50086	0,010502
Q	1,47928	0,542001
C	1,21883	0,669463
T	8,05090	0,113080
QQ	2,66226	0,197615
CC	-3,89184	0,090284
TT	11,22197	0,077900
QC	1,83624	0,304488
QT	13,85056	0,054896
CT	1,99753	0,426622

Tabela I4 - Regressão múltipla da vazão de ar de secagem, carga mássica e temperatura do ar de entrada com o teor de flavonoides totais.

Regressão múltipla ($R^2=0,9689$)		
	Coefficiente de regressão	p
Média	23,5612	0,028696
Q	2,2911	0,289010
C	-11,5739	0,129775
T	13,7390	0,130463
QQ	1,2234	0,239427
CC	1,9760	0,186780
TT	2,1099	0,507647
QC	-5,0101	0,099261
QT	11,1725	0,080271
CT	-1,9682	0,432583

Tabela I5 - Regressão múltipla da vazão de ar de secagem, carga mássica e temperatura do ar de entrada com o parâmetro k do modelo de Overhults.

Regressão múltipla ($R^2=0,9426$)		
	Coefficiente de regressão	p
Média	0,00229696	0,000028
Q	-0,00000258	0,980396
C	0,00018077	0,228050
T	-0,00001474	0,925162
QQ	-0,00006550	0,256551
CC	0,00001520	0,845548
TT	0,00022621	0,188745
QC	0,00016884	0,076318
QT	-0,00020312	0,184832
CT	0,00013120	0,316534

