



FABIANO VICENTE FIGUEIRA

**SECAGEM DE PEQUI (*Caryocar brasiliensis*
Camb.) PRECEDIDA DE DESIDRATAÇÃO
OSMÓTICA**

LAVRAS – MG

2014

FABIANO VICENTE FIGUEIRA

**SECAGEM DE PEQUI (*Caryocar brasiliensis* Camb.) PRECEDIDA DE
DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Coorientadora

Dra. Thais Hernandez

LAVRAS – MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Figueira, Fabiano Vicente.

Secagem de pequi (*Caryocar brasiliensis cambess*) precedida de desidratação osmótica / Fabiano Vicente Figueira. – Lavras : UFLA, 2014.

66 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Bibliografia.

1. Cerrado. 2. Perecibilidade. 3. Convecção. 4. Modelagem matemática. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 660.28426

FABIANO VICENTE FIGUEIRA

**SECAGEM DE PEQUI (*Caryocar brasiliensis* Camb.) PRECEDIDA DE
DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2014.

Dr. Eder Pedrosa Isquierdo UFLA

Dr. Eduardo Valério de Barros Vilas Boas UFLA

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Orientador

Dra. Thais Hernandes

Coorientadora

LAVRAS – MG

2014

A meus pais, Alvaro e Maria de Fátima;

A meu irmão, Leonardo;

À minha namorada, Gisele.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela saúde física e mental, por ter me dado as oportunidades que tive e pelas pessoas maravilhosas que participaram desta jornada.

A meus pais, Alvaro e Maria de Fátima, pelo seu empenho e dedicação na busca de meios de me proporcionar uma educação de alto nível.

A meu irmão, Leonardo, e a minha namorada, Gisele, pelo amor, compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo.

À Universidade Federal de Lavras, em especial aos departamentos de Engenharia Agrícola e Ciência de Alimentos, pela oportunidade de cursar o mestrado.

À FAPEMIG, pelo suporte financeiro na forma da concessão de bolsa de estudos.

A meu orientador, professor Jefferson, pelo direcionamento, dedicação e enorme paciência durante o período do curso.

A meu grande amigo de laboratório, Bruno, pelo importante auxílio na condução dos experimentos.

Aos membros da banca, doutor Eder e professor Eduardo, que contribuíram enormemente para a finalização do trabalho.

A todos os meus professores que contribuíram de forma significativa na agregação de valor à minha carreira.

A todos os meus companheiros de faculdade que fizeram parte deste ciclo na minha vida.

RESUMO

O pequi é uma fruta típica do cerrado brasileiro de grande importância nutricional, gastronômica e econômica para a região. Sua utilização não é generalizada em território nacional, devido, sobretudo, à sua alta perecibilidade. Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar a secagem da polpa do pequi por dois métodos: secagem convectiva natural e secagem a vácuo, ambos em estufa, precedidas ou não de desidratação osmótica (DO) em solução de sacarose. Foram feitas análises de cinética de secagem, atividade de água (a_w) e encolhimento. Primeiramente, realizaram-se ensaios de DO em duas concentrações de sacarose, 40 °Brix e 60 °Brix, acompanhando-se teor de água e teor de sólidos em tempos de imersão até 120 minutos. A difusividade efetiva da água e de sólidos foi calculada de acordo com a segunda lei de Fick. Na caracterização após o processo osmótico, concluiu-se, de acordo com um teste de Tukey, que ambas as concentrações imprimem resultados semelhantes à matéria-prima *in natura*, em termos de teor de água final, perda de água, ganho de sólidos, a_w e encolhimento, sendo escolhida a concentração de 40 °Brix no tempo de 120 minutos para o pré-tratamento à secagem. As amostras *in natura* e desidratadas osmoticamente, que apresentavam teor de água inicial (b.u.) de 51,49% e 31,86%, respectivamente, foram secas até 13% (b.u.). As secagens foram realizadas de duas maneiras: convectiva natural e a vácuo, a duas temperaturas: 40 °C e 60 °C. A cinética de secagem foi ajustada de acordo com os modelos de Fick, Newton, Page, Henderson e Pabis. Os ajustes de todos os modelos foram satisfatórios, tendo o de Page apresentado maiores valores de R^2 . Tanto a utilização da DO quanto o aumento da temperatura diminuíram o tempo final de secagem. A utilização de vácuo não alterou de forma significativa o tempo do processo. As diferenças de a_w e encolhimento entre os tratamentos foram analisadas utilizando-se o teste de Tukey, não tendo havido diferença significativa entre os tratamentos para a_w e o encolhimento foi maior quanto maior o tempo e a temperatura de secagem.

Palavras-chave: Cerrado. Perecibilidade. Convecção. Modelagem matemática.

ABSTRACT

Pequi is a typical fruit of the Brazilian cerrado of great nutritional, gastronomic and economic importance to the region. Its use is not widespread around the country mainly to its high perishability. The aim of this study was to evaluate the drying of pulp pequis by two methods: natural convective drying and vacuum drying, both in an oven, preceded or not by osmotic dehydration (OD) in sucrose solution. Analysis of drying kinetic, water activity (a_w) and shrinkage were made. First tests were performed at two sucrose concentrations of OD: 40 °Brix and 60 °Brix, with moisture and solids content in immersion measured up to 120 minutes. The effective diffusivity of water and solids was calculated according to Fick's second law. At characterization after the osmotic process was concluded that, according to Tukey's test, both concentrations have similar results to raw material, in terms of final water content, water loss, solids gain, a_w and shrinkage, being chosen concentration of 40 °Brix in time of 120 minutes for the pre-treatment to drying. Fresh and osmotically dehydrated samples, which had an initial moisture content (wb) of 51.49% and 31.86%, respectively, were dried to 13% (wb). The drying was done at two ways: natural convection and vacuum, at two temperatures: 40 °C and 60 °C. The kinetics of drying was adjusted according to the model of Fick, Newton, Page, Henderson and Pabis. The settings of all models were satisfactory, and the Page had a higher R^2 . Both the use of OD as increasing the temperature decreased the final drying time. The use of vacuum did not significantly alter the process time. Differences in a_w and shrinkage between treatments were analyzed using the Tukey's test, with no significant difference between treatments for a_w , and shrinkage was greater at higher temperature and time of process.

Keywords: Cerrado. Perishability. Convective drying. Mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fruto e caroço do pequizeiro.....	15
Figura 2	Estufa a vácuo experimental	32
Figura 3	Cinética do teor de água para pedaços de polpa de pequi osmoticamente desidratados em solução de sacarose. DO 40 e DO 60: Valores experimentais a 40 °Brix e 60 °Brix, respectivamente. DO 40 calc e DO 60 calc: Valores calculados (modelo de Fick) a 40 °Brix e 60 °Brix, respectivamente	39
Figura 4	Cinética de teor de sólidos para pedaços de polpa de pequi osmoticamente desidratados em solução de sacarose.....	40
Figura 5	Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi a 40 °C. T40 e T40 vácuo: Valores experimentais para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C, respectivamente. T40 calc e T40 vácuo calc: Valores calculados (modelo de Fick) para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C, respectivamente.....	45
Figura 6	Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi a 60 °C. T60 e T60 vácuo: Valores experimentais para secagem convectiva natural e a vácuo a 60 °C, respectivamente. T60 calc e T60 vácuo calc: Valores calculados (modelo de Fick) para secagem convectiva natural e a vácuo a 60 °C, respectivamente.....	45
Figura 7	Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi após desidratação osmótica a 40 °C. T40/60 e T40/60 vácuo: valores experimentais para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C e a 60 °C, respectivamente. T40/60 calc e T40/60 vácuo calc: Valores calculados (modelo de Fick) para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C e a 60 °C, respectivamente.....	47
Figura 8	Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi, após desidratação osmótica a 60 °C.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Modelos matemáticos utilizados para ajuste dos testes de secagem.....	24
Tabela 2	Condições experimentais.....	36
Tabela 3	Valores para pedaços de pequi <i>in natura</i>	37
Tabela 4	Difusividade efetiva calculada.....	41
Tabela 5	Valores médios para pedaços de pequi pré-tratados osmoticamente	43
Tabela 6	Tempos finais de secagem e dados de ajuste do modelo de Fick	48
Tabela 7	Dados de ajuste da equação de Newton	50
Tabela 8	Dados de ajuste da equação de Page	51
Tabela 9	Dados de ajuste da equação de Henderson e Pabis	52
Tabela 10	A_w e encolhimento para os diferentes métodos de secagem.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	A cultura do pequi no Brasil	13
2.2	Secagem de alimentos	17
2.3	Secagem convectiva e secagem a vácuo	21
2.4	Desidratação osmótica	22
2.5	Cinética de secagem	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Material	27
3.2	Preparo da matéria-prima	28
3.3	Caracterização do material vegetal	28
3.3.1	Teor de água e teor de sólidos	28
3.3.2	Atividade de água	29
3.3.3	Volume	29
3.4	Desidratação osmótica	30
3.5	Secagem do pequi	31
3.5.1	Sistema experimental de secagem	31
3.5.2	Secagem por convecção natural	32
3.5.3	Secagem a vácuo	33
3.5.4	Cinética de secagem	33
3.6	Planejamento experimental	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Caracterização da polpa do pequi	37
4.2	Desidratação osmótica	38
4.2.1	Teor de água e teor de sólidos	38
4.2.2	Difusividade efetiva da água e dos sólidos	41
4.2.3	Caracterização após desidratação osmótica	42
4.3	Secagem convectiva natural e secagem a vácuo do pequi	43
4.3.1	Cinética de secagem	44
4.3.2	Atividade de água e encolhimento	53
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) é uma árvore típica do cerrado brasileiro. O fruto desta árvore, o pequi, é economicamente explorado pela população regional circundante, que costuma consumi-lo em sua forma *in natura*, bem como utilizá-lo para preparo de pratos tradicionais, sucos, sorvetes, licores e geleias (MAIA; ANDRADE; SILVA, 2008; SOUZA JÚNIOR; ALBUQUERQUE; PERONI, 2013).

Além dessa importância regional, o pequi é também rico em antioxidantes naturais, como compostos fenólicos e carotenoides. O fruto pode, até mesmo, ser utilizado como substituto de antioxidantes sintéticos, no enriquecimento funcional ou na suplementação alimentar.

A exploração econômica desta fruta pode agregar mais valor ao produto brasileiro e gerar renda à população local (MIRANDA-VILELA et al., 2009; MACHADO; MELLO; HUBINGER, 2013; ROESLER et al., 2008). No entanto, apesar de todos estes aspectos positivos relacionados ao pequi, a utilização da fruta não é generalizada no Brasil. Boa parcela disso ocorre devido à alta perecibilidade do fruto, que torna inviável e impraticável o consumo do produto em regiões distantes das áreas produtoras (MACHADO; MELLO; HUBINGER, 2013).

A secagem, como método de conservação, surgiu, no passado, como solução para equacionar o problema da alta perecibilidade dos produtos agrícolas. Esta operação de transferência simultânea de calor e massa promove uma diminuição da atividade de água do alimento, atributo este estritamente relacionado com a conservação dos produtos agrícolas (ANDRADE; METRI; BARROS NETO, 2003).

O número de métodos distintos de secagem utilizados na indústria de alimentos nos dias de hoje é extenso. O processo de desidratação mais utilizado

atualmente é a secagem convectiva, devido ao fato de ser a mais fácil de implementar, por um nível tecnológico mais acessível. Porém, a exposição prolongada de alimentos a altas temperaturas em uma secagem convectiva costuma provocar degradação de nutrientes e alteração de propriedades sensoriais, como cor e textura (ARGYROPOULOS; MÜLLER, 2011). Métodos de secagem menos agressivos, como a secagem a vácuo, apresentam menores alterações no produto alimentício, apesar de requererem um capital de investimento mais elevado (AGHBASHLO et al., 2013).

Além do uso de métodos mais brandos de secagem, o uso de pré-tratamentos, como a desidratação osmótica, pode proporcionar maior conservação da qualidade do produto seco (CORRÊA et al., 2011). A desidratação osmótica é um processo no qual o alimento é imerso em solução hipertônica, com perda de água e ganho de sólidos. Não há necessidade de aquecimento da solução, pois as trocas de massa entre a solução osmótica e o alimento podem ocorrer em temperatura ambiente. O processo conduz a alimentos de atividade de água intermediária, fato que delega ao mesmo apenas a função de pré-tratamento a outros métodos de conservação, como a secagem (FALADE; IGBEKA, 2007; CORRÊA et al., 2010; CORRÊA et al., 2011; FANTE et al., 2011; FERNANDES et al., 2006).

Dessa forma, este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a secagem de pequi por diferentes métodos (secagem convectiva e a vácuo), precedidos ou não de desidratação osmótica, com avaliação da cinética de secagem e parâmetros de atividade de água e encolhimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um fato muito importante, quando se estuda a secagem de alimentos, é o conhecimento do produto agrícola em si, suas características e importância, bem como os fatores envolvidos no processo de desidratação. E, para este fim, a revisão de literatura torna-se necessária.

2.1 A cultura do pequi no Brasil

O pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) é uma árvore típica do cerrado brasileiro, sendo uma das de maior valor econômico na região, pertencente à família Caryocaraceae (ARAÚJO, 1995). Seu alto grau de aproveitamento não se dá só pelos seus frutos, mas pela árvore como um todo. O fruto é conhecido, de acordo com a região de ocorrência, por pequi, piqui, piquiá-bravo, amêndoa-de-espinho, grão-de-cavalo, pequiá, pequiá-pedra, pequerim, suari e piquiá. O nome pequi se originou da palavra tupi “pyqui”, em que “py” significa casca e “qui” espinhos, ou seja, “casca espinhosa”, denominação naturalmente alusiva aos pequenos espinhos característicos do endocarpo (ALMEIDA; SILVA, 1994; BRANDÃO; LACA-BUENDÍA; MACEDO, 2002).

Com uma vida útil estimada de, aproximadamente, 50 anos, o pequi atinge até 10 m de altura. Sua fase reprodutiva inicia-se a partir do oitavo ano, com floração ocorrendo, normalmente, entre os meses de setembro a novembro (SILVA; LOPES; GERALDINE, 2008). A frutificação acontece de outubro a fevereiro, produzindo frutos por 20 a 40 dias, em média, com produção variável, podendo chegar a 1.000 frutos por pé (MARIANO-DA-SILVA et al., 2009).

Símbolo da cultura do estado brasileiro de Goiás, o pequi pode também ser encontrado em toda a região centro-oeste (considerada a capital da fruta) e nos estados de Rondônia (ao leste), Minas Gerais (norte e oeste), Pará (sudoeste), Tocantins, Maranhão (extremo sul), Piauí (extremo sul), Bahia (oeste), Ceará (sul) e nos cerrados de São Paulo e Paraná. Está na lista de espécies ameaçadas do estado de São Paulo (FORZZA, 2010; MELO JUNIOR et al., 2012).

Seu consumo é, atualmente, apreciado de variadas maneiras: cozido, no arroz, no frango, com macarrão, com peixe, com carnes, no leite e na forma de um dos mais apreciados licores de Goiás, além de doces e sorvetes. Dele pode ser extraído também um óleo, denominado azeite de pequi, que apresenta, além de valores nutricionais, propriedades medicinais. Os frutos contêm vitamina A e C, tiamina, proteínas e sais minerais, sendo o óleo de pequi utilizado na medicina popular para sanar problemas oftalmológicos relacionados à deficiência de vitamina A, uma vez que a planta apresenta altíssimo teor de carotenoides (GONÇALVES et al., 2011; LEITE et al., 2006; GEÓCZE et al., 2013; RIBEIRO et al., 2012).

Os frutos de pequi são constituídos pelo exocarpo e têm coloração esverdeada ou marrom-esverdeada, mesocarpo externo, polpa com coloração pardo-acinzentada e mesocarpo interno, que constitui a porção comestível do fruto, tendo coloração amarelada, e separa-se facilmente do mesocarpo externo, quando maduro. O endocarpo, que é espinhoso, protege a semente ou amêndoa, que é revestida por um tegumento fino e marrom, sendo também uma porção comestível. A fruta contém, normalmente, entre um a quatro caroços, cientificamente chamados de putâmens. No norte de Minas Gerais já foram encontrados frutos contendo até sete caroços (MELO JUNIOR et al., 2004).



Figura 1 Fruto e caroço do pequi

Em muitas regiões, como o Norte de Minas, sua exploração extrativa constitui importante ocupação para inúmeras famílias, que têm essa cultura como fonte de renda e de emprego por meio da colheita, do processamento e da comercialização do pequi, pelo menos durante quatro meses no ano (SOUZA; SALVIANO, 2002).

A espécie está entre os sete produtos oleaginosos mais importantes da extração vegetal brasileira, tanto em quantidade quanto em receita. Em 2011, a atividade movimentou, aproximadamente, 11,11 milhões de reais, na quantidade de pouco mais de 7 mil toneladas de frutos (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011). Os frutos de *C. brasiliense* dão sabor acentuado e característico à cozinha regional do cerrado, aspecto que os tornam uma especiaria valorizada.

Além de sua importância nutricional, cultural e econômica, a fruta pode ser considerada também um alimento funcional. O consumo de frutas e vegetais, de maneira geral, tem sido associado a menor incidência e mortalidade por diversas doenças crônicas não transmissíveis. A proteção que esses alimentos oferecem contra as enfermidades degenerativas, como câncer, doenças cardiovasculares e cerebrovasculares, tem relação com seu alto conteúdo de

compostos antioxidantes (vitaminas C e E, carotenoides e polifenóis) (HINNEBURG; DAMIEN; RAIMO, 2006).

Em estudo realizado por Lima et al. (2007) foi constatado que a polpa do pequi tem 209 mg/100 g de fenólicos totais, valores superiores aos encontrados na maioria das polpas de frutas consumidas no Brasil, como açaí (*Euterpe oleracea*), com 136,8 mg/100 g; goiaba (*Psidium guayava*), com 83,1 mg/100 g; morango (*Gingo biloba*), com 132,1 mg/100 g; abacaxi (*Ananas sativa*), com 21,7 mg/100 g; graviola (*Anona muricato*), com 84,3 mg/100 g e maracujá (*Passiflora edulis*), com 20,2 mg/100 g, sendo inferior apenas à acerola (*Malpighia glabra*), com 580,1 mg/100 g e à manga (*Mangifera indica*), com 544 mg/100 g. Esses resultados indicam que a polpa do pequi é um alimento com elevada capacidade antioxidante, tendo em vista a correlação existente entre a quantidade de fenólicos totais e a proteção antioxidante.

O consumo e o uso do pequi ainda estão restritos à população local do cerrado, onde é explorado de forma extrativista. Na época da safra, o pequi se torna a principal fonte de renda das populações da região produtora, entretanto, há grande perda do produto, devido à sua perecibilidade e, principalmente, à falta de métodos adequados de conservação (VILAS BOAS et al., 2012). Estes autores estudaram o congelamento como método de conservação e concluíram, de modo geral, que a qualidade de pequis fatiados e inteiros, entendida sob os aspectos nutricionais e microbiológicos, pode ser preservada à temperatura de -18 ± 2 °C, por 12 meses, desde que obedecidas à cadeia de frio e às boas práticas de fabricação. O congelamento é, sabidamente, um bom método de conservação, apesar de ser mais oneroso, de maneira geral, que a secagem.

2.2 Secagem de alimentos

As frutas e as hortaliças proporcionam sabor e variedade para a dieta humana. Elas constituem fontes indispensáveis de vitaminas e minerais. Estes alimentos desempenham papel importante na nutrição de pessoas, no fornecimento de certos constituintes que são deficientes em outros tipos, bem como adicionam sabor, cor e variedade ao cardápio (SALUNKHE; DESAI, 1985).

Os carboidratos são os nutrientes constituintes mais abundantes em frutas e legumes, e estão presentes como açúcares de baixo peso molecular ou polímeros de alto peso molecular, como o amido. As celuloses, as hemiceluloses, as substâncias pécnicas e a lignina, juntas, formam a fibra alimentar, cujo valor nutricional vem sendo cada vez mais valorizado nos últimos anos. Praticamente toda vitamina C na dieta do ser humano é obtida a partir de frutas e hortaliças, algumas das quais são ricas em provitamina A (β -caroteno) (p.ex., manga, cenoura, tomate, etc.). Elas também são importantes fontes de cálcio, fósforo e ferro (JAYARAMAN; GUPTA, 2006).

A maioria das frutas e vegetais contém mais de 80% de água e, portanto, elas são altamente perecíveis. A necessidade de se reduzir as perdas pós-colheita de produtos agrícolas é de suma importância para sua disponibilidade, especialmente no atual contexto de crescentes restrições sobre a produção de alimentos (terra, água, e energia). É preciso, então, utilizar técnicas de conservação pós-colheita adequadas para mitigar as perdas, aumentando, assim, o fornecimento e a disponibilidade de nutrientes, além de dar o incentivo econômico para se produzir mais (SALUNKHE; DESAI, 1984).

A atividade de água, a_w , é um parâmetro utilizado em conservação e em processamento de alimentos. Ela é definida como a razão entre a pressão de

vapor de água P nos alimentos sobre a pressão de vapor da água pura P_0 à mesma temperatura ($a_w = P/P_0$). O efeito de atividade de água é estudado não só para definir a estabilidade microbiana do produto, mas também das reações bioquímicas dos alimentos e sua relação com a estabilidade, tendo se tornado uma ferramenta muito útil para lidar com relações hídricas de alimentos durante o processamento (JAYARAMAN; GUPTA, 2006).

A a_w da água pura é 1. Alimentos com valores de a_w altos (acima de 0,90) têm grande chance de sofrer contaminação microbiológica, uma vez que as soluções diluídas dos alimentos servem de substrato para o crescimento de microrganismos. Para valores menores, entre 0,40 e 0,80, as reações químicas e enzimáticas ficam favorecidas, pois ocorre aumento da concentração dos reagentes. A partir de 0,6, tem-se pequeno crescimento microbiano. Quando a atividade de água alcança valores inferiores a 0,30, atinge-se a zona de adsorção primária, na qual não há dissolução dos componentes do alimento na água, o que reduz a velocidade das reações, com exceção da oxidação lipídica, pois esta pode ocorrer níveis baixos ou elevados de a_w (VAN DEN BERG; BRUIN, 1981).

Um dos objetivos principais do processamento de produtos agrícolas é a conversão de alimentos perecíveis, tais como frutas e produtos vegetais, de maneira geral, em formas estabilizadas que permitam o armazenamento por períodos prolongados, de forma a reduzir as perdas pós-colheita. O processamento estende, assim, a disponibilidade de produtos sazonais, acrescentando certa comodidade aos produtores e consumidores (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; McMINN; MAGEE, 1999).

A técnica da secagem é, provavelmente, o mais antigo método de conservação de alimentos praticado pela humanidade. A remoção de água impede o crescimento e a proliferação de microrganismos e minimiza muitas das reações deteriorantes causadas pela alta umidade. O processo proporciona

também redução substancial em peso e volume, minimizando a utilização de embalagens, o espaço de armazenamento e os custos de transporte, e também permite o armazenamento do produto em temperatura ambiente. Estas características são especialmente importantes para o desenvolvimento de países, na alimentação militar e em formulações de “comida espacial” (JAYARAMAN; GUPTA, 2006; MAYOR; SERENO, 2004).

A secagem é um processo que consiste, basicamente, na aplicação de calor para vaporizar a água, e na utilização de meios para a remoção deste vapor, após a separação do mesmo do tecido vegetal do alimento, reduzindo, assim, a a_w . Por isso, o processo é uma transferência combinada e simultânea de calor e massa, procedimento para o qual energia deve ser fornecida (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

A evaporação da água de um produto submetido à secagem pode ser baseada em três mecanismos: condução, convecção ou radiação (ou ainda uma combinação entre eles). A transferência de calor depende de temperatura, da umidade, do fluxo e da direção do ar. Já a transferência de massa, movimento da água do interior para a superfície do produto, é influenciada pela natureza física e a porosidade do alimento, bem como a sua composição química (ANTÔNIO, 2002).

Vários tipos de secadores e métodos de secagem são empregados comercialmente para a remoção de água de uma vasta variedade de frutas e legumes, cada qual mais adequado para uma situação particular. Os fatores que governam a seleção de um determinado secador ou método incluem a forma e a propriedade do material, a forma física e as características desejadas do produto, bem como as condições de operação necessárias e os custos (SOKHANSANJ; JAYAS, 2006).

Atualmente, a maioria das frutas e vegetais desidratados é produzida por meio da técnica de secagem por ar quente, a qual é mais simples e mais

econômica que os vários outros métodos existentes. Neste método, o ar aquecido é posto em contato com o material úmido a ser seco, para facilitar as transferências de calor e massa, sendo a convecção vitalmente envolvida. É necessário que o teor de água do produto esteja acima da umidade de equilíbrio, para as condições de temperatura e de umidade estabelecidas (McMINN; MAGEE, 1999).

Existe também a secagem solar, que é de mais simples implementação e de menor custo que a secagem convectiva. A grande desvantagem desse método é que a safra de muitos produtos agrícolas se dá nos períodos mais chuvosos do ano, particularidade que impede a utilização da energia solar em seu potencial ótimo. A dependência climática deste processo o torna inviável, em alguns casos.

Dois aspectos importantes da transferência de massa são a migração de água do interior para a superfície do alimento sendo seco e a remoção desta mesma água, na forma de vapor, da superfície. Em outras palavras, a água superficial é removida por meio do calor latente de evaporação, cedido por uma fonte de calor, criando, dessa forma, um gradiente de concentração do interior do alimento para a superfície (PARK; BIN; BROD, 2001).

A atual demanda por alta qualidade no mercado de alimentos requer algo perto de os produtos desidratados manterem o nível nutricional e as propriedades organolépticas dos alimentos *in natura*. Torna-se, dessa forma, relevante o conhecimento dos fatores responsáveis por quedas de qualidade do produto, durante o processo de secagem.

Para se obter produtos desidratados de alta qualidade a um custo razoável, a secagem deve ser realizada de maneira rápida. De acordo com Holdsworth (1971), são quatro os fatores principais que afetam a taxa e o tempo total de secagem, como descrito a seguir:

- a) propriedades físicas do alimento, especialmente tamanho de partícula e da geometria;
- b) seu arranjo geométrico em relação ao ar;
- c) propriedades físicas do ar (temperatura, umidade, velocidade);
- d) *design* e características do equipamento de secagem.

Uma das mudanças físicas mais importantes que o alimento sofre, durante o processo de secagem, é a redução de seu volume. A perda de água e o aquecimento causam estresse na estrutura celular dos alimentos, que conduz a alterações em sua forma e diminui sua dimensão. O encolhimento pode ter consequência negativa sobre a qualidade de alguns alimentos desidratados, pois alterações na forma, perda de volume e maior dureza podem provocar uma impressão negativa no consumidor. Por outro lado, alguns produtos secos têm aspecto encolhido desejável, como é o caso de passas e ameixas secas (MAYOR; SERENO, 2004).

2.3 Secagem convectiva e secagem a vácuo

Na secagem convectiva, o calor é inserido no sistema por meio de ar aquecido, ou gás, que flui sobre a superfície do sólido. O calor para a evaporação é fornecido por convecção para a superfície exposta do material e a água evaporada é levada pelo meio de secagem. Tanto ar (mais comum), como gás inerte (como N₂ para secagem de sólidos molhados com solvente orgânico), gases da combustão direta ou vapor superaquecido (ou solvente vapor) podem ser utilizados em sistemas de secagem convectiva (MUJUMDAR, 2006).

Na secagem a vácuo, o ponto de ebulição da água, nas condições de pressão ambiente, é reduzido por redução da pressão. O uso do vácuo proporciona, então, secagem em temperaturas menores que as utilizadas em

pressão ambiente. Costuma-se utilizar temperaturas entre 35 °C e 70 °C (AGHBASHLO et al., 2013; ORIKASA et al., 2014; SOKHANSANJ; JAYAS, 2006; REIS; MASSON; WASZCZYNSKYJ, 2006). Pelo uso de temperaturas e pressões mais baixas, a secagem a vácuo é indicada quando o produto possui nutrientes termossensíveis ou voláteis.

2.4 Desidratação osmótica

A desidratação osmótica é um método amplamente utilizado para a redução parcial da atividade de água de alimentos. A osmose é um fenômeno característico de tecidos vegetais que permite esta desidratação quando o alimento é condicionado em uma solução hipertônica que permita o fluxo de solutos e solventes. Como a permeabilidade do tecido vegetal dos alimentos é mais baixa para açúcares e compostos de peso molecular elevado do que para a água, o fluxo de água é muito maior que o contracorrente fluxo da substância osmoativa. Por esta razão, este processo é denominado desidratação osmótica (LEWICKI; LENART, 2006; LERICI et al., 1988).

Segundo Lewicki e Lenart (2006), o alimento originado deste processo de desidratação tem muitas características vantajosas, tais como:

- a) o alimento está pronto para o consumo, sem necessidade de reidratação;
- b) a quantidade de substância osmoativa a penetrar o tecido pode ser ajustada aos anseios individuais;
- c) a composição química do alimento pode ser regulada de acordo com as necessidades;
- d) a massa de matéria-prima é reduzida.

Segundo Jayaraman e Gupta (2006), o processo apresenta outras vantagens, em comparação a outros métodos de secagem, como a minimização dos danos causados pelo calor à cor e ao sabor, menor descoloração de frutas por escurecimento enzimático oxidativo, melhor retenção de compostos de aroma e menor consumo de energia, dado que a água pode ser removida sem alteração de fase.

A quantidade e a taxa de remoção de água dependem de muitas variáveis e parâmetros de processamento. Em geral, demonstrou-se que a perda de peso em frutas desidratadas osmoticamente é aumentada pelo aumento da concentração de soluto na solução, o tempo de imersão do alimento, a temperatura, a razão solução-alimento, a área da superfície específica do alimento, a utilização ou não de vácuo, a agitação e a reconcentração contínua. Além disso, para obter a mesma redução de atividade de água, o tempo tende a diminuir exponencialmente à medida que a temperatura aumenta (JAYARAMAN; GUPTA, 2006).

2.5 Cinética de secagem

A cinética de secagem nada mais é que o acompanhamento da variação do teor de água em relação ao tempo, bastante recorrente em trabalhos de secagem. Este procedimento, que pode ser modelado, propicia que se avalie o processo com relação ao uso energético e as transferências de calor e massa.

De acordo com Resende, Ferreira e Almeida (2010), a modelagem matemática da cinética de secagem é fundamental para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a dessecação de alimentos. Por outro lado, os estudos do sistema como um todo (não só equipamento), o *design*, a otimização, bem como a sua viabilidade para aplicação comercial também

podem ser obtidos por meio de simulações matemáticas (CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006).

De acordo com as condições do processo, diferentes modelos podem ser ajustados para descrever adequadamente a cinética de secagem de produtos agrícolas (ALVES et al., 2013; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; MARTINAZZO et al., 2007; PONTES et al., 2009). Os modelos matemáticos utilizados para a predição da cinética são classificados em dois tipos: empíricos e fenomenológicos. Entre os empíricos, alguns dos mais utilizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Modelos matemáticos utilizados para ajuste dos testes de secagem

Modelo	Equação	
Newton ¹	$M_r = e^{-kt}$	(01)
Page ²	$M_r = e^{-kt^n}$	(02)
Henderson e Pabis ³	$M_r = ae^{(-kt)}$	(03)
Logarítmico ⁴	$M_r = ae^{(-kt)} + c$	(04)
Dois termos ⁵	$M_r = ae^{(-k_0t)} + be^{(-k_1t)}$	(05)
Wang e Singh ⁶	$M_r = 1 + at + bt^2$	(06)
Aproximação por difusão ⁷	$M_r = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-kbt)}$	(07)
Verma ⁸	$M_r = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-k_1t)}$	(08)

¹(AYENSU, 1997; SHI et al., 2008) ²(PAGE, 1949); ³(HENDERSON; PABIS, 1961; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992); ⁴(DOYMAZ, 2008; DOYMAZ, 2006); ⁵(MADHIYANON; PHILA; SOPONRONNARIT, 2009); ⁶(WANG; SINGH, 1978); ⁷(YALDIZ; ERTEKIN, 2001); ⁸(VERMA; SHUKLA, 2000)

O valor de M_r é obtido de acordo com a Equação 09,

$$M_r = \frac{X_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (09)$$

em que

M_r = razão do teor de água, adimensional;

X_t = teor de água no tempo (b. u.) [kg kg^{-1}];

X_i = teor de água para $t = 0$ (b. u.) [kg kg^{-1}];

X_{eq} = umidade de equilíbrio (b. u.) [kg kg^{-1}];

t = tempo de secagem [min];

a ; b ; c ; n = coeficientes do modelo;

k ; k_0 ; k_1 = constantes de secagem [h^{-1}]

Alves et al. (2013) descreveram, em seu trabalho, a cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa, sendo o modelo empírico de Page um dos utilizados para modelagem da cinética, o qual apresentou bons ajustes aos dados experimentais. Corrêa, Resende e Ribeiro (2006), em seu trabalho de cinética de secagem do café cereja, utilizaram também diversos modelos empíricos para a descrição do processo, entre eles o de Henderson e Pabis.

Dentre os fenomenológicos, o modelo difusional de Fick (CRANK, 1975) é bastante utilizado na comparação de cinética de secagem de diferentes tratamentos (DI SCALA; CRAPISTE, 2008; PONTES et al., 2009; DOYMAZ, 2013; OLIVEIRA; OLIVEIRA; PARK, 2006). É um modelo simples, baseado na equação de difusão unidirecional de Fick, sendo representado pela Equação 10.

$$\frac{\partial X(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial X(t)}{\partial z} \right) \quad (10)$$

em que $X(t)$ é o teor de água no instante t , D_{eff} é a difusividade efetiva e z é uma coordenada direcional genérica.

Não foram encontradas, na literatura científica, informações sobre modelos que descrevem a secagem do pequi.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, caracterizou-se o material (pequi) a ser seco. Em seguida, desenvolveu-se um planejamento experimental para a condução do experimento, conforme descrito a seguir. Todos os procedimentos e experimentos foram realizados no Laboratório de Secagem de Alimentos, no Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras, em Lavras, Minas Gerais.

3.1 Material

Os pequis (*Caryocar brasiliense* Camb.) utilizados nos ensaios foram provenientes do cerrado do norte mineiro, cuja safra tem início no final de dezembro e dura, aproximadamente, três meses. O fruto foi, então, obtido no início de janeiro de 2013, pico de sua safra.

O material vegetal foi colhido em seu ponto ótimo de maturação, com todos os frutos maduros no mesmo grau e, em seguida, descascados. A fruta foi adquirida na forma de caroço, ou seja, o fruto *in natura* sem o exocarpo e o mesocarpo externo, num período de 3 a 5 dias após a colheita.

Após a aquisição dos frutos e sua caracterização, os mesmos foram armazenados em congelador doméstico, a -18 ± 2 °C, durante o período de realização dos experimentos, para mitigação da deterioração do produto. Este armazenamento foi semelhante ao verificado no trabalho de Vilas Boas et al. (2012), em que a qualidade do pequi pode ser satisfatoriamente preservada.

3.2 Preparo da matéria-prima

Os pequis selecionados, antes de serem caracterizados, foram lavados em água corrente e, na sequência, despulpados com auxílio de ralador e faca de aço inoxidável, com cuidado especial para não atingir os espinhos da parte mais interior do fruto. Foram obtidas, então, amostras da polpa do pequi no formato de “lascas”, pedaços de diminuta espessura (quando comparada com suas outras dimensões), com forma semelhante a uma placa plana, de tamanho mais uniforme possível. O valor da espessura dos pedaços de polpa de pequi foi de, aproximadamente, 3 mm.

3.3 Caracterização do material vegetal

Procedeu-se à caracterização física do pequi antes e após os tratamentos de secagem, tendo a caracterização do produto *in natura* ocorrido também antes do armazenamento. Realizaram-se as análises de teor de água, atividade de água e volume da amostra, conforme explicitado a seguir.

3.3.1 Teor de água e teor de sólidos

A determinação do teor de água em base úmida foi feita por processo indireto em estufa a vácuo, a 70 °C, segundo AOAC (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY, 2005). As medidas de massa foram efetuadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g de, aproximadamente, 5 g de amostra de polpa de pequi. O valor foi calculado de acordo com a Equação 11.

$$X_{w, bu} = \frac{M_A}{M_T} * 100 \quad (11)$$

em que

X_{w, bu}: teor de água, em grama/100 g de amostra em base úmida;

MA: massa da água contida no produto;

MT: massa total da amostra.

O teor de sólidos é calculado por meio da Equação 12.

$$X_{s, bu} = \frac{(1 - M_A)}{M_T} * 100 \quad (12)$$

em que

X_{s, bu}: teor de sólidos, em grama/100 g de amostra em base úmida.

3.3.2 Atividade de água

A determinação da atividade de água ocorreu à temperatura de 25±2 °C, com o uso do equipamento Aqualab, modelo CX-2T (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, EUA). A cada leitura o produto foi macerado e colocado no recipiente do higrômetro, de forma a preenchê-lo totalmente.

3.3.3 Volume

Para a determinação do volume das amostras de pequi, no intuito de, posteriormente, analisar o grau do encolhimento após a secagem, foram realizadas mensurações das dimensões dos pedaços da polpa da fruta na forma

de “lasca”. Para tanto, foi utilizado paquímetro digital 150 mm DC-60 Western, visor LCD, resolução de 0,01 mm/0,0005" e precisão de 0,03 mm/0,001". Considerou-se a forma das amostras como sendo, aproximadamente, de paralelepípedo, ou placa plana, de forma que o volume foi obtido com a multiplicação de suas dimensões de comprimento, largura e espessura. O encolhimento das amostras de pequi seco foi determinado por meio da Equação 12 (LAZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1983).

$$S_b = \frac{V_b(X)}{V_{b,0}} \quad (12)$$

em que

S_b : coeficiente de encolhimento volumétrico (adimensional);

$V_b(X)$: volume da amostra com teor de água X (m³);

$V_{b,0}$: volume da amostra com teor de água inicial (m³).

3.4 Desidratação osmótica

O processo de desidratação osmótica foi conduzido como pré-tratamento às secagens por convecção e a vácuo. As condições da desidratação osmótica foram estabelecidas com base em trabalhos semelhantes (BORIN et al., 2008; CORRÊA et al., 2008; CORRÊA et al., 2010; PERUSSELLO et al., 2014; VIANA; CORRÊA; JUSTUS, 2013; KHOYI; HESARI, 2007), porém, com outras frutas, fator que se deve à inexistência de trabalhos de desidratação osmótica com o pequi.

Preparou-se uma solução de água destilada contendo sacarose (açúcar refinado comercial), à concentração de 40% (p/p). A relação de massa entre o alimento e a solução foi mantida constante em 1/50, para que a diluição da

solução, durante a desidratação osmótica, fosse totalmente desprezível. Os pedaços de pequi foram colocados individualmente dentro de um Erlenmeyer contendo a solução, e as amostras ficaram submersas durante 120 minutos. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 25 ± 2 °C.

Depois disso, as amostras foram retiradas e imediatamente imersas em gelo e água destilada, para cessar a desidratação e retirar o excesso de solução adsorvida, e, então, secas cuidadosamente com papel absorvente. As amostras foram pesadas e novamente caracterizadas.

Após esta etapa, as amostras de matéria-prima a serem secas (secagem convectiva ou a vácuo) totalizaram dois grupos com características distintas: o de pedaços de frutos *in natura* e o de pedaços de fruta tratados osmoticamente.

3.5 Secagem do pequi

Os experimentos de secagem foram realizados pela ação de ar aquecido, como secagem convectiva, e pelo uso de vácuo, após o sistema de secagem ter atingido determinada temperatura. O objetivo foi estudar quais as diferenças entre as mudanças de determinados atributos da matéria-prima, imprimidas por estes dois processos. Na ocasião dos ensaios, o ar ambiente manteve a temperatura de bulbo seco na faixa de 25 ± 2 °C e umidade relativa no intervalo de $55\pm 5\%$. Os pedaços de pequi (amostras) foram individualmente selecionados, postos em placas de Petri e, sem tampar, foram pesados em balança com precisão de 0,0001 g.

3.5.1 Sistema experimental de secagem

Os ensaios de secagem, tanto convectiva quanto a vácuo, foram realizados em estufa modelo LUCA-104/12 (Figura 2) que, internamente, tem

três prateleiras, ou bandejas, em aço inox, com distância vertical entre si de 50 mm.

O sistema de aquecimento do ar é feito por meio de resistências elétricas blindadas, além de ser dotado de um controle automático de temperatura microprocessado digital ajustável para as condições do processo. O aparelho dispõe de um indicador digital de temperatura interna com variação de $\pm 0,5$ °C.

O equipamento tem uma bomba de vácuo e o ar comprimido tipo 2VC acoplada, podendo imprimir um vácuo de 0 a 760 mmHg, com vacuômetro analógico. Seu registro para vácuo ou entrada de gases é tipo agulha.



Figura 2 Estufa a vácuo experimental

3.5.2 Secagem por convecção natural

A secagem convectiva foi realizada nos dois grupos de amostras, *in natura* e as desidratadas osmoticamente, de duas maneiras: com ar à temperatura de bulbo seco de 40 °C e 60 °C. Para tanto, programou-se a temperatura desejada na estufa e esperou-se o equipamento atingir o patamar desejado, sem grandes variações antes de se inserir as amostras na câmara de secagem.

Temperaturas semelhantes a estas são muito recorrentes nos trabalhos de secagem convectiva encontrados na literatura (ARGYROPOULOS; MÜLLER, 2011; ARGYROPOULOS; MÜLLER, 2014; ZLATANOVIĆ; KOMATINA; ANTONIJEVIĆ, 2013; AGHBASHLO et al., 2013), sendo também duas temperaturas muito observadas em trabalhos de secagem a vácuo (ORIKASA et al., 2014; AGHBASHLO et al., 2013; SOKHANSANJ; JAYAS, 2006). São temperaturas que não imprimem degradação significativa dos nutrientes de alimentos, bem como interferência na cor e na textura, devido à ação do calor.

3.5.3 Secagem a vácuo

Na dessecação a vácuo foram utilizadas as mesmas temperaturas de bulbo seco, 40 °C e 60 °C da secagem convectiva. Inicialmente, ajustou-se a temperatura da estufa e, após sua estabilização, as amostras foram inseridas na câmara de secagem. Depois de o compartimento ser devidamente fechado, o registro para saída do ar foi aberto e a bomba foi, então, acionada, sendo desligada ao atingir um vácuo final de 600 mmHg. O registro na sequência foi fechado.

Durante todo o processo, a pressão interna foi monitorada visualmente utilizando-se o vacuômetro analógico da estufa, de forma a manter o vácuo interno sempre no intervalo de 600±50 mmHg, acionando-se a bomba sempre que necessário.

3.5.4 Cinética de secagem

Na análise dos dados da secagem, a razão do teor de água foi calculada em função do tempo, de acordo com a Equação 11. Para tal, o teor de água foi monitorado ao longo do tempo no processo, com amostras sendo retiradas para

pesagem, primeiramente, de 30 em 30 minutos após a operação de secagem ter sido iniciada e, depois, de 60 em 60 minutos.

Para todas as condições testadas, os valores de razão de teor de água foram ajustados para descrever a cinética de secagem da polpa do pequi e gráficos de razão de teor de água em função do tempo foram gerados. Os dados foram ajustados para modelos empíricos e um modelo fenomenológico.

Os modelos empíricos utilizados foram os de Newton (Equação 01), Page (Equação 02), Henderson e Pabis (Equação 03). O modelo fenomenológico foi o baseado na equação de Fick.

Para ajuste do modelo difusional de Fick (Equação 10), a amostra sólida foi considerada como tendo a forma de uma placa de espessura $2L$. Considerou-se uma condição de teor de água inicial uniforme, $X_{(z,0)} = X_0$. As condições de

contorno são de simetria de concentração, $\left. \frac{\partial X(t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$ e de equilíbrio do teor de água na superfície do material, $X_{(L,t)} = X_{eq}$. Com consideração às condições iniciais de contorno, a equação unidirecional de Fick torna-se

$$M_r = \left(\frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(- (2i+1)^2 \pi^2 D_{eff} \frac{t}{4L^2}\right) \right) \quad (13)$$

em que

M_r : razão do teor de água, adimensional;

D_{eff} : difusividade efetiva da água [m^2s^{-1}];

i : número de termos da série;

L : comprimento característico (metade da espessura da amostra) [m];

t : tempo de secagem [s].

A difusividade efetiva pode ser calculada tanto para água, conforme descrito acima, quanto para sólidos. As substituições na Equação 13 que devem ser feitas são a razão de teor de água por razão de teor de sólidos e a difusividade efetiva da água ($D_{\text{eff água}}$) por difusividade efetiva de sólidos ($D_{\text{eff sólidos}}$).

Para ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* Statistica 8.0 (StatSoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo baseou-se na magnitude dos seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) (Equação 14) e desvio padrão da estimativa (SE) (Equação 15) (JAAFAR; MICHALOWSKI, 1990).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2} \quad (14)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n}} \quad (15)$$

em que

R^2 : coeficiente de determinação (decimal);

SE: desvio padrão da estimativa (decimal);

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

\bar{Y} : média de todos os valores observados experimentalmente;

n: número de observações.

3.6 Planejamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos inteiramente casualizado com esquema fatorial de (2x2x2). Os fatores foram: utilização ou não do pré-tratamento osmótico de sacarose, secagem a vácuo ou convectiva e temperatura do ar de secagem de 40 °C ou 60 °C. Os valores foram calculados pelo valor p de 5% de significância, no teste de Tukey, pelo software Sisvar 5.3 Build 77 (FERREIRA, 2011).

Tabela 2 Condições experimentais

Sem DO		Com DO	
Secagem	Temperatura (°C)	Secagem	Temperatura (°C)
Convectiva	40	Convectiva	40
A vácuo	40	A vácuo	40
Convectiva	60	Convectiva	60
A vácuo	60	A vácuo	60

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para a caracterização da polpa do pequi, desidratação osmótica, secagem convectiva natural e secagem a vácuo são apresentados a seguir.

4.1 Caracterização da polpa do pequi

Os pedaços de polpa de pequi, depois da retirada do caroço, antes do armazenamento, apresentaram as características relacionadas na Tabela 03.

Tabela 3 Valores para pedaços de pequi *in natura*

Parâmetro	Valor médio *
Teor de água b.u. (g.100 g ⁻¹)	51,49±2,27
a _w	0,986±0,002
Espessura (mm)	3,42±0,73
Comprimento (mm)	14,61±2,12
Largura (mm)	35,04±1,77

* Todos os dados foram obtidos por análises em triplicata e expressos como média ± desvio padrão

O valor de teor de água para a polpa é bem semelhante à encontrada em outros trabalhos. Machado, Mello e Hubinger (2013), em seu estudo de extração alcoólica e aquosa de antioxidantes naturais do pequi e concentração de extratos por nanofiltração, utilizaram também pequi proveniente do cerrado mineiro. Sua polpa foi caracterizada como tendo um teor de água médio, base úmida (b.u.), de

51,17±3,78 g.(100 g)⁻¹. Vera et al. (2007), em trabalho de caracterização física e química de frutos do pequizeiro oriundos de duas regiões no estado de Goiás, encontraram valores médios, b.u., de 54,34±4,48 g (100 g)⁻¹, para a região de Araguapaz e de 48,13±2,99 g (100 g)⁻¹, para a região de Mambaí. Santana et al. (2013) utilizaram, em seu trabalho, pequis provenientes do cerrado mineiro com 52,33±0,02 g (100 g)⁻¹ de teor de água b.u. na polpa.

O valor da atividade de água seguiu também bem semelhante aos valores encontrados na literatura. De Oliveira et al. (2010) caracterizaram, em seu trabalho, pequis da Chapada do Araripe, Ceará, e encontraram valor médio de a_w de 0,987, em 35 amostras de polpa, a um teor de água, b.u., próximo de 55%.

4.2 Desidratação osmótica

A desidratação osmótica em duas concentrações diferentes de sacarose (40 °Brix e 60 °Brix) foi realizada nos tempos de imersão de 5, 10, 20, 40, 60, 90 e 120 minutos. Acompanharam-se o teor de água e o teor de sólidos ao longo do tempo, no intuito de se obter a difusividade efetiva da água e a difusividade efetiva de sólidos baseadas na segunda lei de Fick (CRANK, 1975), de maneira semelhante à realizada por Azoubel e Murr (2004), Khoyi e Hesari (2007), Corrêa et al. (2010), Íspir e Toğrul (2009).

4.2.1 Teor de água e teor de sólidos

Tanto o teor de água quanto o teor de sólidos foram mensurados em função do tempo de imersão nas duas soluções de concentração distintas (Figuras 3 e 4). O teor de água de equilíbrio de cada solução para ajuste no

modelo foi obtido em ensaios de tempo de imersão de 24 horas, durante o qual as amostras apresentariam peso seguramente constante.

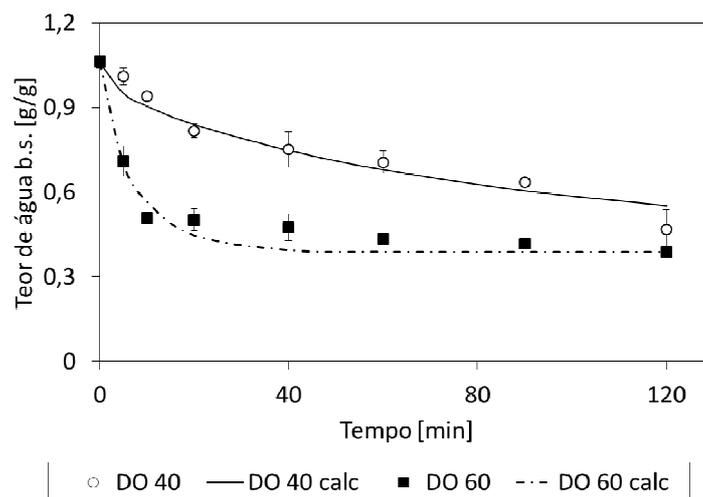


Figura 3 Cinética do teor de água para pedaços de polpa de pequi osmoticamente desidratados em solução de sacarose. DO 40 e DO 60: Valores experimentais a 40 °Brix e 60 °Brix, respectivamente. DO 40 calc e DO 60 calc: Valores calculados (modelo de Fick) a 40 °Brix e 60 °Brix, respectivamente

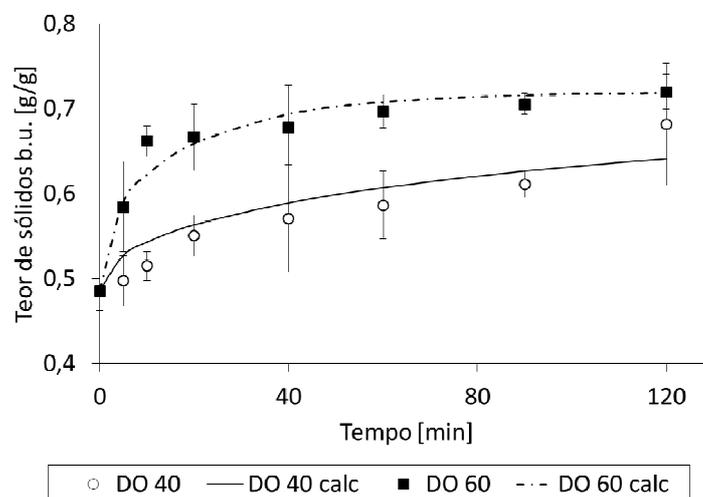


Figura 4 Cinética de teor de sólidos para pedaços de polpa de pequi osmoticamente desidratados em solução de sacarose

De acordo com o exposto na Figura 3, a utilização de uma solução osmótica com maior concentração de sacarose resultou em uma maior perda de água ao longo do tempo, perfazendo uma desidratação mais rápida. Para se chegar a valores de teor de água, em base sólida (b.s.), inferiores a 0,7 g/g, por exemplo, observa-se que, de acordo com os dados experimentais e as curvas ajustadas do modelo, o pequi imerso nesse tipo de solução osmótica demorou mais tempo para atingir este patamar a 40 °Brix do que 60 °Brix.

Na desidratação osmótica, a perda de água é favorecida por concentrações de solução superiores, devido ao aumento do gradiente osmótico entre o alimento e a solução. A presença de uma grande quantidade de soluto dá origem a uma pressão osmótica mais elevada, tornando mais fácil a perda de água. Estes resultados corroboram os obtidos por Madamba e Lopez (2002), Mastrantonio, Pereira e Hubinger (2005), Íspir e Toğrul (2009) e Viana, Corrêa e Justus (2013), na desidratação osmótica de fatias de manga, metades de goiaba, damasco e palma forrageira, respectivamente.

A cinética de teor de sólidos (Figura 4) mostrou aumento desta variável com o tempo e com a concentração da solução. Este comportamento também resulta da maior pressão osmótica que se obtém em solução a 60 °Brix que em solução de 40 °Brix.

Com relação ao tempo, pode-se observar que a grande variação, tanto de teor de água quanto de sólidos, ocorre nos primeiros 20 minutos de desidratação osmótica, após os quais tende ao equilíbrio.

4.2.2 Difusividade efetiva da água e dos sólidos

Na Tabela 4 é apresentado o resultado da difusividade efetiva determinada pelo modelo difusional de Fick, que possibilita o cálculo da difusividade da água ($D_{\text{eff água}}$) e de sólidos ($D_{\text{eff sólidos}}$), individualmente. Zogzas Mauroulis e Marinos-Kouris (1996) reportaram que os valores de difusividade efetiva para produtos agrícolas se encontram na faixa de 10^{-11} a 10^{-9} m^2s^{-1} . Esta observação ampara e valida os valores calculados pelo modelo no presente trabalho.

Tabela 4 Difusividade efetiva calculada

	Brix	D_{eff} (m^2s^{-1})	R^2	SE
Água	40	$1,84 \times 10^{-10}$	0,9600	0,0488
	60	$1,70 \times 10^{-9}$	0,9708	0,0509
Sólidos	40	$9,57 \times 10^{-11}$	0,8602	0,1819
	60	$5,51 \times 10^{-10}$	0,9345	0,11627

Pode-se observar, na Tabela 4, que os coeficientes de difusão, seja de água ($D_{\text{eff água}}$) ou de sólidos ($D_{\text{eff sólidos}}$), aumentam 9,23 e 5,76 vezes, respectivamente, ao se aumentar a concentração da solução osmótica de 40 Brix para 60 °Brix. Isto corrobora os resultados experimentais das Figuras 3 e 4 e, novamente, tem explicação na maior pressão osmótica da solução, ao se aumentar a concentração da mesma, aumentando-se o gradiente de concentração entre a solução e o alimento. Adicionalmente, pode-se observar, na Tabela 4, que a difusividade de água é sempre maior que a difusividade de sólidos. Isto tem explicação na maior facilidade de difusão da água pelas membranas do alimento, dado seu menor peso molecular com relação ao peso molecular da sacarose.

Os dados simulados pelo modelo difusional de Fick ajustaram satisfatoriamente os dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,96, para a água e a 0,86, para sólidos.

4.2.3 Caracterização após desidratação osmótica

Obtiveram-se, então, dois grupos, ou blocos, de amostras para os ensaios de secagem convectiva natural e secagem a vácuo: o de pedaços de polpa de pequi *in natura* e o de pedaços de polpa de pequi pré-desidratados osmoticamente.

De acordo com as cinéticas de desidratação osmótica obtidas (Figuras 1 e 2), o tempo de 120 minutos foi o mais interessante, em termos de redução do teor de água, para ambas as concentrações de sacarose, 40 °Brix e 60 °Brix, além de ser um tempo em que os teores de água estiveram bem próximos do equilíbrio osmótico. Tendo este tempo como atributo fixo, foram feitas leituras de teor de água, perda de água, ganho de sólidos, atividade de água e encolhimento, cujos valores médios estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 Valores médios para pedaços de pequi pré-tratados osmoticamente

Parâmetro	DO 40 °Brix¹	DO 60 °Brix¹
Teor de água b.u. (g.100g ⁻¹)	31,86 ^a	28,03 ^a
Perda de água (%)	21,72 ^a	25,24 ^a
Ganho de sólidos (%)	14,59 ^a	18,82 ^a
a _w	0,965 ^b	0,948 ^a
Coeficiente de encolhimento ²	0,930 ^a	0,911 ^a

¹Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente, pelo Teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ²Volumétrico e adimensional

Observa-se, na Tabela 5, que, com exceção da atividade de água que, para o tratamento a 60 °Brix, era menor, aspecto desejável para um pré-tratamento ao processo de secagem. Os resultados dos demais são estatisticamente equivalentes.

Apesar do menor valor de a_w para a solução de 60 °Brix, prosseguiu-se com o pré-tratamento a 40 °Brix, por apresentar uma perda de água satisfatória do pequi sem maiores ganhos de sólidos, aspectos estes desejáveis, bem como a utilização de uma menor quantidade de sacarose.

4.3 Secagem convectiva natural e secagem a vácuo do pequi

A secagem convectiva natural e a secagem a vácuo foram realizadas sobre os dois grupos de amostras de polpa de pequi, o grupo de amostras *in natura* e o de pré-desidratadas osmoticamente, nas temperaturas de 40 °C e 60 °C. Optou-se por estas temperaturas para que não houvesse degradação importante de nutrientes do pequi. O processo de todos os ensaios foi cessado quando o produto atingiu teor de água b.u. próximo a 13 g.100 g⁻¹, com

atividade de água próximo de 0,435, suficiente para a conservação do produto seco. Acompanhou-se a razão de teor de água ao longo do tempo, no intuito de se obter o coeficiente de difusividade efetiva baseada na segunda lei de Fick (CRANK, 1975), de maneira semelhante à realizada por Martinazzo et al. (2007), Isquierdo et al. (2013), Pontes et al. (2009) e Oliveira, Oliveira e Park (2006).

4.3.1 Cinética de secagem

Neste item são apresentados os resultados de cinética de secagem para os diversos experimentos realizados de secagem convectiva natural e secagem a vácuo, a 40 °C e a 60 °C, com e sem desidratação osmótica.

Nas Figuras 3 a 8 apresentam-se as cinéticas de secagem experimentais e modeladas com o modelo de Fick. Para o cálculo da razão de teor de água foi utilizada a simplificação da equação para quando a umidade de equilíbrio é relativamente pequena, quando comparada com o teor de água do produto num determinado tempo do processo ou o teor de água inicial, de maneira semelhante ao realizado por Doymaz (2013).

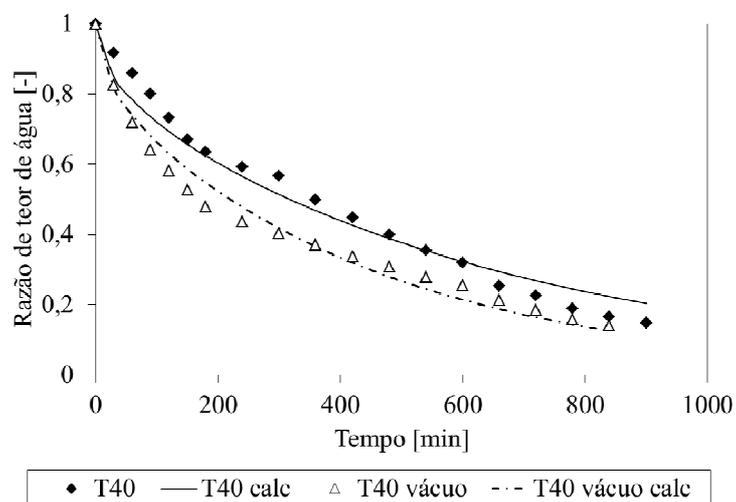


Figura 5 Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi a 40 °C. T40 e T40 vácuo: Valores experimentais para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C, respectivamente. T40 calc e T40 vácuo calc: Valores calculados (modelo de Fick) para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C, respectivamente

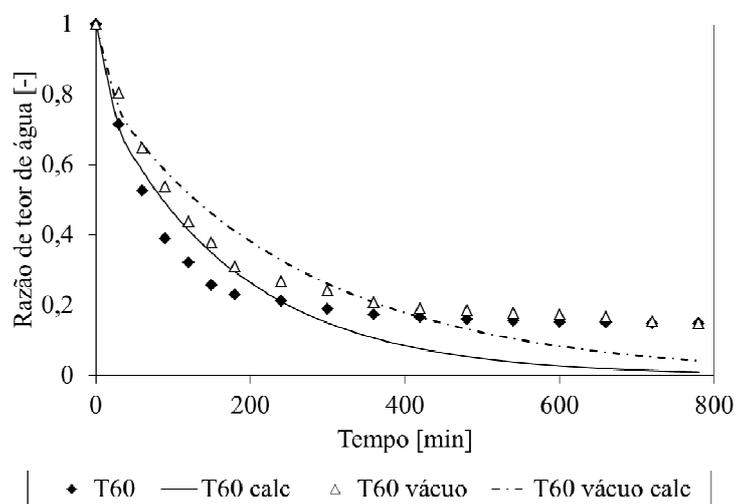


Figura 6 Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi a 60 °C. T60 e T60 vácuo: Valores experimentais para secagem convectiva natural e a vácuo a 60 °C, respectivamente. T60 calc e T60 vácuo calc: Valores calculados (modelo de Fick) para secagem convectiva natural e a vácuo a 60 °C, respectivamente

calc: Valores calculados (modelo de Fick) para secagem convectiva natural e a vácuo a 60 °C, respectivamente

Na secagem a vácuo, o ponto de ebulição da água nas condições de pressão ambiente é reduzido por redução da pressão. É esperado que a secagem a vácuo apresente um menor tempo de processo, se comparada à secagem convectiva natural por conta da menor resistência que o meio de secagem imprime à saída de umidade do alimento para o mesmo. A água sai, então, com mais facilidade e mais rapidamente (AGHBASHLO et al., 2013; ORIKASA et al., 2014; SOKHANSANJ; JAYAS, 2006; REIS; MASSON; WASZCZYNSKYJ, 2006).

Pela observação das Figuras 5 e 6 percebe-se que, tanto para a temperatura de 40 °C quanto para a de 60 °C, os valores de razão de teor de água, fixado um determinado tempo, da secagem convectiva natural e da secagem a vácuo são bem próximos. À temperatura de 40 °C, tanto para dados experimentais quanto para dados calculados pelo modelo de Fick, pôde-se observar (Figura 5) que a secagem a vácuo apresentou um menor tempo de processo em relação à convectiva natural. Por outro lado, à temperatura de 60 °C (Figura 6), para os dados experimentais, os valores de tempo dos dois métodos foram muito próximos e, para os dados calculados pelo modelo, a secagem a vácuo apresentou um tempo maior de processo em relação à convectiva natural. Como os valores de tempo de processo da secagem convectiva natural e da secagem a vácuo foram muito próximos para ambas as temperaturas, a utilização do vácuo não produziu influência significativa, em termos de redução do tempo final da desidratação. Entendem-se por tempos próximos valores com diferença menor que 60 minutos, tendo em vista a maneira como o pequi é comercializado, semelhante aos produtos da agricultura familiar.

Ao se comparar os tempos de secagem obtidos nas Figuras 5 e 6, observa-se que houve redução no tempo de secagem ao se trabalhar com a maior

temperatura. Em processos de secagem convectiva, o aumento da temperatura leva a um aumento das taxas de transferência de energia e de massa e o tempo de secagem é, geralmente, menor. Os tempos de secagem também são apresentados na Tabela 6.

Nas Figuras 7 e 8 apresentam-se as curvas de cinética de secagem obtidas ao se utilizar o pré-tratamento osmótico.

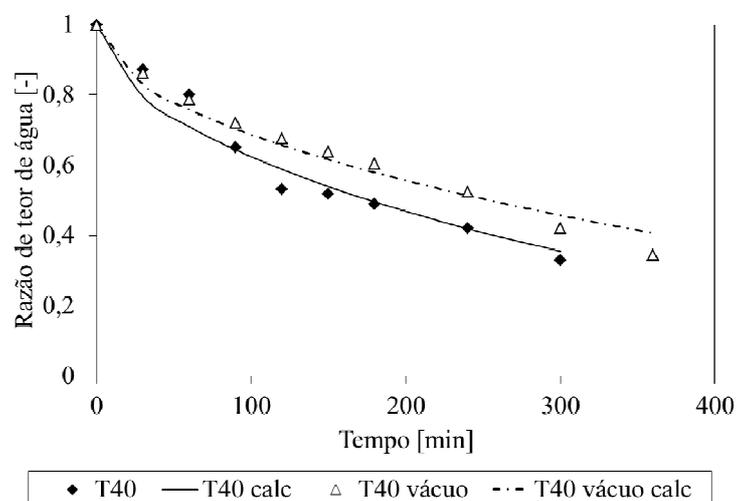


Figura 7 Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi após desidratação osmótica a 40 °C. T40/60 e T40/60 vácuo: valores experimentais para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C e a 60 °C, respectivamente. T40/60 calc e T40/60 vácuo calc: Valores calculados (modelo de Fick) para secagem convectiva natural e a vácuo a 40 °C e a 60 °C, respectivamente

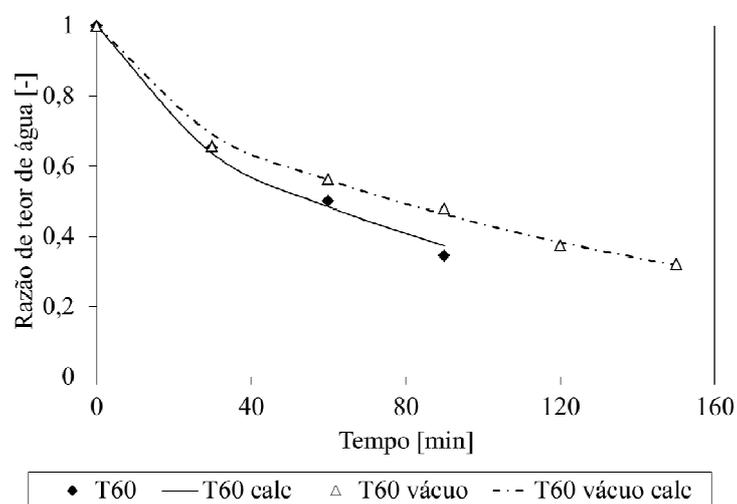


Figura 8 Cinética de secagem de pedaços de polpa de pequi, após desidratação osmótica a 60 °C

Tabela 6 Tempos finais de secagem e dados de ajuste do modelo de Fick

Secagem	Temperatura 40 °C, sem DO			
	Tempo (min)	D_{eff} (m^2s^{-1})*	R^2	SE
Convectiva	900	$2,34 \times 10^{-11}$	0,9885	0,0490
A vácuo	840	$3,38 \times 10^{-11}$	0,9860	0,0372
Temperatura 40 °C, com DO				
Convectiva	300	$4,19 \times 10^{-11}$	0,9636	0,0244
A vácuo	360	$2,92 \times 10^{-11}$	0,9835	0,0160
Temperatura 60 °C, sem DO				
Convectiva	780	$8,56 \times 10^{-11}$	0,9238	0,1036
A vácuo	780	$5,75 \times 10^{-11}$	0,9456	0,0773
Temperatura 60 °C, com DO				
Convectiva	90	$1,31 \times 10^{-10}$	0,9947	0,0125
A vácuo	150	$9,52 \times 10^{-11}$	0,9953	0,0090

* As difusividades efetivas foram calculadas com base na segunda lei de Fick (CRANK, 1975)

Observando-se as Figuras 7 e 8, percebe-se, novamente, que tanto para a temperatura de 40 °C quanto para a temperatura de 60 °C, os valores de razão de teor de água, fixado um determinado tempo, da secagem convectiva natural e da secagem a vácuo, são bem próximos. À temperatura de 40 °C, tanto para dados experimentais quanto para dados calculados pelo modelo de Fick, pode-se observar, na Figura 7, que a secagem a vácuo apresentou um maior tempo de processo em relação à convectiva natural. À temperatura de 60 °C (Figura 8), para os dados experimentais e para os dados calculados pelo modelo, a secagem a vácuo apresentou um tempo também maior de processo em relação à convectiva natural.

Como as diferenças de tempo de processo da secagem convectiva natural e da secagem a vácuo foram bem pequenas, para ambas as temperaturas, a utilização do vácuo não produziu influência significativa em termos de redução do tempo final da desidratação. A diferença observada deve-se unicamente a erro experimental, já que o tempo de processo da secagem convectiva foi ligeiramente menor, comportamento oposto do esperado.

Ao se comparar os tempos de secagem precedida de desidratação osmótica obtidos nas Figuras 7 e 8, observa-se que houve redução no tempo de secagem ao se trabalhar com a maior temperatura, de forma semelhante aos processos não precedidos de desidratação osmótica.

Na Tabela 6 observam-se, além dos tempos finais de cada tratamento de secagem, os dados de ajuste do modelo. O ajuste foi satisfatório, com R^2 superiores sempre a 0,9230. É possível observar que, tanto pelo tempo final quanto pela difusividade, as secagens convectiva natural e a vácuo, para uma determinada temperatura e condição de desidratação osmótica (com pré-tratamento ou sem) apresentam taxas de secagem semelhantes. Os tratamentos a maiores temperaturas, para um determinado método de secagem (convectiva

natural ou a vácuo) e condição de desidratação osmótica (com pré-tratamento ou sem), apresentaram taxas de secagens maiores e que o aumento, por outro lado, foi muito mais significativo, considerando-se a utilização da desidratação osmótica.

Os tratamentos com a utilização de desidratação osmótica resultaram em tempos finais de secagem menores, por conta do teor de água inicial menor das amostras pré-desidratadas osmoticamente, bem como por consequência do fato de que, na desidratação osmótica, a estrutura do alimento é danificada suficientemente para que a retirada de água em uma operação de secagem seja favorecida. O tempo total do processo, somando-se o tempo de secagem com o tempo da desidratação osmótica (120 minutos), foi também menor nos ensaios feitos com a desidratação osmótica.

Pode-se dizer, ainda, que, embora não se tenham medido alterações de cor e nutrientes neste presente trabalho, o produto obtido com uma desidratação osmótica prévia deve apresentar menor perda de cor e nutrientes, isto por não ter sido exposto a tanto tempo em temperaturas altas do processo de secagem.

Nas Tabelas 7 a 9 são exibidos os dados de ajuste dos modelos empíricos de Newton, Page e Henderson e Pabis.

Tabela 7 Dados de ajuste da equação de Newton

Temperatura 40 °C, sem DO			
	k	R²	SE
Convectiva	2,06 x 10 ⁻³	0,9858	0,0163
A vácuo	2,98 x 10 ⁻³	0,8817	0,1170
Temperatura 40 °C, com DO			
	k	R²	SE
Convectiva	4,13 x 10 ⁻³	0,9690	0,0124

A vácuo	$2,99 \times 10^{-3}$	0,9739	0,0093
Temperatura 60 °C, sem DO			
	k	R²	SE
Convectiva	$8,11 \times 10^{-3}$	0,7834	0,1979
A vácuo	$5,28 \times 10^{-3}$	0,8590	0,1446
Temperatura 60 °C, com DO			
	k	R²	SE
Convectiva	$1,22 \times 10^{-2}$	0,9905	0,0022
A vácuo	$8,66 \times 10^{-3}$	0,9413	0,0176

Tabela 8 Dados de ajuste da equação de Page

Temperatura 40 °C, sem DO				
	k	N	R²	SE
Convectiva	$3,95 \times 10^{-3}$	0,89	0,9912	0,0101
A vácuo	$2,58 \times 10^{-2}$	0,63	0,9942	0,0057
Temperatura 40 °C, com DO				
	k	N	R²	SE
Convectiva	$8,61 \times 10^{-3}$	0,85	0,9794	0,0083
A vácuo	$7,56 \times 10^{-3}$	0,82	0,9901	0,0035
Temperatura 60 °C, sem DO				
	k	N	R²	SE
Convectiva	$1,02 \times 10^{-1}$	0,47	0,9548	0,0412
A vácuo	$4,46 \times 10^{-2}$	0,59	0,9713	0,0294
Temperatura 60 °C, com DO				
	k	n	R²	SE
Convectiva	$2,42 \times 10^{-2}$	0,83	0,9969	0,0007
A vácuo	$4,39 \times 10^{-2}$	0,64	0,9941	0,0017

Tabela 9 Dados de ajuste da equação de Henderson e Pabis

Temperatura 40 °C, sem DO				
	a	K	R²	SE
Convectiva	0,96	$1,96 \times 10^{-3}$	0,9912	0,0113
A vácuo	0,85	$2,35 \times 10^{-3}$	0,9476	0,0518
Temperatura 40 °C, com DO				
	a	K	R²	SE
Convectiva	0,98	$3,97 \times 10^{-3}$	0,9713	0,0115
A vácuo	0,96	$2,74 \times 10^{-3}$	0,9858	0,0050
Temperatura 60 °C, sem DO				
	a	K	R²	SE
Convectiva	0,86	$6,18 \times 10^{-3}$	0,8068	0,1765
A vácuo	0,86	$4,14 \times 10^{-3}$	0,8891	0,1138
Temperatura 60 °C, com DO				
	a	K	R²	SE
Convectiva	0,99	$1,19 \times 10^{-2}$	0,9915	0,0020
A vácuo	0,94	$7,91 \times 10^{-3}$	0,9564	0,0131

Os ajustes nos três modelos foram satisfatórios para a maioria das condições de secagem, sendo os menores valores de R² para o modelo de Newton, 0,7834; para o modelo de Page, 0,9548 e para o modelo de Henderson e Pabis, 0,8068. Apesar das diferenças de ajuste, todos os modelos empíricos descreveram o fenômeno da secagem da polpa de pequi, nas condições experimentais do estudo, de forma semelhante ao modelo fenomenológico de Fick. O modelo de Page apresentou até melhores ajustes aos dados experimentais que o modelo de Fick, fato não observado com os outros dois

modelos. Sendo assim, tendo como base os valores experimentais e os dados ajustados dos modelos matemáticos utilizados, o modelo mais recomendado para a secagem da polpa de pequi, nas condições deste trabalho, é o modelo empírico de Page.

4.3.2 Atividade de água e encolhimento

Depois de findado o processo de secagem, foram realizadas leituras da atividade de água e do coeficiente de encolhimento volumétrico. Os resultados das médias estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10 A_w e encolhimento para os diferentes métodos de secagem

Secagem	a_w*	Encolhimento*
Temperatura 40 °C, sem DO		
Convectiva	0,438 ^a	0,596 ^a
A vácuo	0,435 ^a	0,696 ^a
Temperatura 40 °C, com DO		
Convectiva	0,438 ^a	0,891 ^b
A vácuo	0,438 ^a	0,860 ^b
Temperatura 60 °C, sem DO		
Convectiva	0,435 ^a	0,518 ^a
A vácuo	0,435 ^a	0,628 ^a
Temperatura 60 °C, com DO		
Convectiva	0,439 ^a	0,843 ^b
A vácuo	0,436 ^a	0,749 ^b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente, pelo Teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Para os valores de atividade de água não houve diferença estatística. Isto se deve ao fato de a a_w ser estritamente relacionada com o teor de água dos alimentos e, como os processos conduziram a um mesmo teor de água final, a a_w seguiu o mesmo comportamento. Com relação ao encolhimento, expresso pelo coeficiente de encolhimento volumétrico, apenas a interação método (secagem convectiva ou a vácuo) com a desidratação osmótica (com ou sem) é significativa estatisticamente.

Pôde-se observar que o coeficiente de encolhimento é maior nos ensaios com a desidratação osmótica, em relação aos tratamentos sem ela. Isso acontece devido ao fator tempo de secagem que, nos casos sem desidratação osmótica, são significativamente maiores que os tempos de secagem com desidratação osmótica. O alimento fica submetido às temperaturas do processo por mais tempo, causando, dessa forma, maiores danos estruturais ao produto agrícola, de maneira que sua forma seja mais afetada. Quanto maior o tempo de exposição, menor o coeficiente de encolhimento volumétrico, pois mais distante do volume original do produto *in natura* está o alimento submetido ao processo. Dessa forma, os tratamentos com desidratação osmótica apresentaram valores de encolhimento mais desejáveis do que os sem desidratação osmótica. Tanto temperatura quanto método de secagem (convectiva ou a vácuo) não influenciaram ou imprimiram diferenças significativas de encolhimento nos tratamentos.

5 CONCLUSÃO

Na desidratação osmótica foi realizada a modelagem matemática de acordo com a segunda lei de Fick, calculando por meio disso a difusividade efetiva da água e a de sólidos. Apesar de o processo a 60 °Brix ter apresentado uma desidratação mais rápida que a 40 °Brix nos estágios iniciais, após 120 minutos de imersão ambos os tratamentos apresentaram caracterizações semelhantes.

As cinéticas de secagem obtidas neste trabalho pelo modelo de Fick expuseram que tanto a secagem convectiva natural quanto a secagem a vácuo têm taxas de secagem semelhantes para a polpa de pequi. A temperatura influenciou de maneira inversa o tempo de secagem, sendo que quanto maior a primeira menor é o segundo. A utilização de pré-tratamento osmótico a 40 °Brix de sacarose reduziu o tempo de secagem.

Os modelos empíricos também se ajustaram bem aos dados e os resultados observados dessas modelagens corroboraram os obtidos com o modelo de Fick, que também apresentou bom ajuste. Dentre todos os modelos, o que melhor se ajustou, em termos de R^2 e SE, foi o de Page.

O coeficiente de encolhimento volumétrico teve relação com a utilização ou não da desidratação osmótica. Seu valor foi menor nos tratamentos sem do que nos tratamentos com desidratação osmótica.

REFERÊNCIAS

AGHBASHLO, M. et al. A review on exergy analysis of drying processes and systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 22, p. 1-22, June 2013.

ALMEIDA, S. P.; SILVA, J. A. **Piqui e buriti: importância alimentar para a população dos cerrados**. Planaltina: EMBRAPA, 1994.

ALVES, G. E. et al. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 238-247, abr./jun. 2013.

ANDRADE, S. A.; METRI, J. C.; BARROS NETO, B. Desidratação osmótica do jenipapo (*Genipa americana* L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 23, n. 2, p. 276-281, 2003.

ANTÔNIO, G. C. **Influência da estrutura celular e da geometria da amostra na taxa de transferência de massa no processo de desidratação osmótica de Banana Nanica (*Musa Cavendish*) e de Mamão Formosa (*Carica papaya* L.)**. 2002. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ARAUJO, F. D. A review of *Caryocar brasiliense* (Caryocaraceae): an economically valuable of Central Brazilian Cerrados. **Economic Botany**, New York, v. 49, n. 1, p. 40-48, Mar. 1995.

ARGYROPOULOS, D.; MÜLLER, J. Changes of essential oil content and composition during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 52, p. 118-124, Jan. 2014.

ARGYROPOULOS, D.; MÜLLER, J. Effect of convective drying on quality of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). **Procedia Food Science**, Oxford, v. 1, p. 1932-1939, 2011.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY, **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemistry**. 18. Maryland: Gaithersburg, 2005.

AYENSU, A. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. **Solar Energy**, Kidlington, v. 59, n. 4-6, p. 121-126, Apr./June 1997.

AZOUBEL, P. M.; MURR, F. E. X. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 61, n. 3, p. 291-295, Feb. 2004.

BORIN, I. et al. Efeito do pré-tratamento osmótico com sacarose e cloreto de sódio sobre a secagem convectiva de abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 39-50, jan./mar. 2008.

BRANDÃO, M.; LACA-BUENDÍA, J. P.; MACEDO, J. F. **Árvores nativas e exóticas do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2002.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992.

CORRÊA, J. L. G. et al. Drying of pineapple by microwave-vacuum with osmotic pretreatment. **Drying Technology**, v. 29, n. 13, p. 1556-1561, Aug. 2011.

CORRÊA, J. L. G. et al. Desidratação osmótica de tomate seguida de secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 35-42, 2008.

CORRÊA, J. L. G. et al. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 96, n. 4, p. 498-504, Feb. 2010.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975.

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, London, v. 41, n. 5, p. 789-795, June 2008.

DOYMAZ, İ. Convective drying kinetics of strawberry. **Chemical Engineering and Processing**, Lausanne, v. 47, N. 5, p. 914-919, May 2008.

DOYMAZ, İ. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 48, n. 9, p. 1909-1915, Sept. 2013.

DOYMAZ, İ. Thin-layer drying behavior of mint leaves. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 74, n. 3, p. 370-375, June 2006.

FALADE, K. O.; IGBEKA, J. C. Osmotic dehydration of tropical fruits and vegetables. **Food Reviews International**, New York, v. 23, n. 4, p. 373-405, Sept. 2007.

FANTE, C. et al. Drying of plums (*Prunus* sp, c.v Gulfblaze) treated with KCl in the field and subjected to pulsed vacuum osmotic dehydration. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, n. 46, v. 5, p. 1080-1085, May 2011.

FERNANDES, F. A. N. et al. Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. **Food Research International**, New York, v. 39, n. 4, p. 492-498, May 2006.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dec. 2011.

FORZZA, R. C. **Lista de espécies Flora do Brasil**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

GEÓCZE, K. C. et al. Essential oils from pequi fruits from the Brazilian Cerrado ecosystem. **Food Research International**, New York, v. 54, n. 1, p. 1-8, Nov. 2013.

GONÇALVES, G. A. S. et al. Qualidade dos frutos do pequi submetidos a diferentes tempos de cozimento. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 377-385, mar./abr. 2011.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

HINNEBURG, I.; DAMIEN, H. J.; RAIMO, H. Antioxidant activities of extracts from selected culinary herbs and spices. **Food Chemistry**, London, v. 97, n. 1, p. 122-129, July 2006.

HOLDSWORTH, S. D. Dehydration of food products: a review. **Journal of Food Technology**, Oxford, v. 6, n. 4, p. 331-370, Dec. 1971.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

İSPIR, A.; TOĞRUL, İ. Osmotic dehydration of apricot: kinetics and the effect of process parameters. **Chemical Engineering Research and Design**, Elmsford, v. 87, n. 2, p. 166-180, Feb. 2009.

ISQUIERDO, E. P. et al. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of ASABE**, Michigan, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

JAAFAR, F.; MICHALOWSKI, S. Modified BET equation for sorption/desorption isotherms. **Drying Technology**, New York, v. 8, n. 4, p. 811-827, May 1990.

JAYARAMAN, K. S.; GUPTA, D. K. das. Drying of fruits and vegetables. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, 2006. p. 606-631.

KHOYI, M. R.; HESARI, J. Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 4, p. 1355–1360, Feb. 2007.

LAZANO, J. E.; ROTSTEIN E.; URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**, Oxford, v. 48, n. 5, p. 1497-1502, Sept. 1983.

LEITE, G. L. D. et al. Phenology of *Caryocar brasiliense* in the Brazilian cerrado region. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 236, n. 2-3, p. 286-294, Dec. 2006.

LERICI, C. R. et al. Osmotic concentration in food processing. In: BRUIN, S. (Ed). **Preconcentration and drying of food materials**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. p. 123-135.

LEWICKI, P. P.; LENART, A. Osmotic dehydration of fruits and vegetables. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial Drying**. New York: Marcel Dekker, 2006, p. 665-681.

LIMA, A. et al. Composição química e compostos bioativos presentes na polpa e na amêndoa do pequi (*Caryocar brasiliense*, Camb.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 695-698, dez. 2007.

MACHADO, M. T. C.; MELLO, B. C. B. S.; HUBINGER, M. D. Study of alcoholic and aqueous extraction of pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) natural antioxidants and extracts concentration by nanofiltration. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 117, n. 4, p. 450-457, Aug. 2013.

MADAMBA, P. S.; LOPEZ, R. I. Optimization of the osmotic dehydration of mango (*Mangifera indica* L.) slices. **Drying Technology**, New York, v. 20, n. 6, p. 1227-1242, 2002.

MADHIYANON, T.; PHILA, A.; SOPONRONNARIT, S. Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 29, n. 14-15, p. 2849-2854, Oct. 2009.

MAIA, J. G. S.; ANDRADE, E. H. A.; SILVA, M. H. L. Aroma volatiles of pequi fruit (*Caryocar brasiliense* Camb.). **Journal of Food Composition and Analysis**, San Diego, v. 21, n. 7, p. 574-576, Nov. 2008.

MARIANO-DA-SILVA, S. et al. Chemical characteristics of pequi fruits (*Caryocar brasiliense* Camb.) native of three municipalities in the State of Goiás – Brazil. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 29, n. 4, p. 771-777, dez. 2009.

MARTINAZZO, A. P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 301-306, jun. 2007.

MASTRANTONIO, S. D. S.; PEREIRA, L. M.; HUBINGER, M. D. Osmotic dehydration kinetics of guavas in maltose solutions with calcium salt. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 16, n. 4, p. 309-314, out./dez. 2005.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 61, n. 3, p. 373-386, Feb.2004.

McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, v. 77, n. 3, p. 175-193, Sept. 1999.

MELO JUNIOR, A. F. et al. Estrutura genética de populações naturais de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 56-65, dez. 2004.

MELO JUNIOR, A. F. et al. Spatial genetic structure in natural populations of *Caryocar brasiliense* Camb. (Caryocaraceae) in the North of Minas Gerais, Brazil. **Biochemical Systematics and Ecology**, Oxford, v. 43, p. 205-209, Aug. 2012.

MIRANDA-VILELA, A. L. et al. Pequi fruit (*Caryocar brasiliense* Camb.) pulp oil reduces exercise-induced inflammatory markers and blood pressure of male and female runners. **Nutrition Research**, New York, v. 29, n. 12, p. 850-858, Dec. 2009.

MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, 2006. p. 4-31.

OLIVEIRA, M. E. B. et al. Características químicas e físico-químicas de pesquisa da Chapada do Araripe, Ceará. **Revista Brasileira Fruticultura**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 114-125, mar. 2010.

OLIVEIRA, R. A. de; OLIVEIRA, W. P. de; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 181-189, jan./abr. 2006.

ORIKASA, T. et al. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 125, p. 51-58, Mar. 2014.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers**. 1949. 78 p. Thesis (Ph.D.) - Purdue University, Lafayette, 1949.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção de isoterma de sorção em modelagem matemática para pêra bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 73-77, jan./abr. 2001.

PERUSSELLO, C. A. et al. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 63, n. 1, p. 23-32, Feb. 2014.

PONTES, S. F. O. et al. Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro (*capsicum chinense*) a diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 143-148, 2009.

REIS, F. R.; MASSON, M. L.; WASZCZYNSKYJ, N. Efeitos da secagem convectiva e a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de berinjela. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 163-169, 2006.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RIBEIRO, M. C. et al. Influence of the extraction method and storage time on the physicochemical properties and carotenoid levels of pequi

(*Caryocar brasiliense* Camb.) oil. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 32, n. 2, p. 386-392, abr./jun. 2012.

ROESLER, R. et al. Antioxidant activity of *Caryocar brasiliense* (pequi) and characterization of components by electrospray ionization mass spectrometry. **Food Chemistry**, London, n. 110, p. 711-717, 2008.

SALUNKHE, D. K.; DESAI, B. B. **Postharvest biotechnology of fruits**. Cleveland: CRC Press, 1984.

SALUNKHE, D. K.; DESAI, B. B. **Postharvest biotechnology of vegetables**. Cleveland: CRC Press, 1985.

SANTANA, A. A. et al. Influence of process conditions on the physicochemical properties of pequi powder produced by spray drying. **Drying Technology**, New York, v. 31, n. 7, p. 825-836, May 2013.

SHI, J. L. et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. **Food Science and Technology**, London, v. 41, n. 10, p. 1962-1972, Dec. 2008.

SILVA, R. A. M.; LOPES, T. M. C.; GERALDINE, R. M. Extration, drying, and toasting of the pequi almond (*Caryocar brasiliense* Camb.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 4, p. 868-871, out./dez. 2008.

SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D. S. Drying of foodstuffs. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, 2006. p. 522-545.

SOUZA JÚNIOR, J. R.; ALBUQUERQUE, U. P.; PERONI, N. Traditional Knowledge and Management of *Caryocar coriaceum* Wittm. (*Pequi*) in the Brazilian Savanna, Northeastern Brazil. **Economic Botany**, Bronx, v. 67, n. 3, p. 225-233, Aug. 2013.

- SOUZA, I. de; SALVIANO, A. **A cultura do pequi**. Brasília: Emater, 2002. Disponível em: <[http://www.emater.mg.gov.br/doc/intranet/upload// Livraria Virtual/a%20cultura%20do%20pequi.pdf](http://www.emater.mg.gov.br/doc/intranet/upload//LivrariaVirtual/a%20cultura%20do%20pequi.pdf)>. Acesso em: 29 jul. 2013.
- VAN DEN BERG, C.; BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: ROCKLAND, L. B.; STEWART, G. F. (Ed.). **Water activity: influences on food quality**. New York: Academic Press, 1981. p. 147-177.
- VERA, R. et al. Caracterização física e química de frutos do pequi (*caryocar brasiliense* camb.) oriundos de duas regiões no estado de Goiás, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 93-99, jun. 2007.
- VERMA, B.; SHUKLA, N. P. Removal of Nickel (II) from electroplating industry effluent by agrowaste carbons. **Indian Journal of Environmental Health**, Nagpur, v. 42, p. 145-150, 2000.
- VIANA, A. D.; CORRÊA, J. L. G.; JUSTUS, A. Optimisation of the pulsed vacuum osmotic dehydration of cladodes of fodder palm. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 49, n. 3, p. 726-732, Mar. 2013.
- VILAS BOAS, B. M. et al. Qualidade de pequis fatiados e inteiros submetidos ao congelamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 5, p. 904-910, maio 2012.
- WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **A single layer drying equation for rough rice**. Oxford: The Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems, 1978.
- YALDIZ, O.; ERTEKIN, C. Thin layer solar drying of some different vegetables. **Drying Technology**, New York, v. 19, n. 3-4, p. 583-597, 2001.

ZLATANOVIĆ, I.; KOMATINA, M.; ANTONIJEVIĆ, D. Low-temperature convective drying of apple cubes. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 53, n. 1, p. 114-123, Apr. 2013.

ZOGZAS, N. P.; MAUROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.