



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

RAMON RAMOS DE PAULA

**ESTUDO DA CINÉTICA E INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE SECAGEM
SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SORO DE LEITE**

Alegre - ES

Fevereiro - 2015

RAMON RAMOS DE PAULA

**ESTUDO DA CINÉTICA E INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE SECAGEM
SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SORO DE LEITE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de alimentos.

Orientador: Sérgio Henriques Saraiva

Co-orientador: Luciano José Quintão Teixeira

Alegre - ES

Fevereiro - 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

P324e Paula, Ramon Ramos de, 1988-
Estudo da cinética e influência dos métodos de secagem sobre as propriedades físico-químicas de soro de leite / Ramon Ramos de Paula. – 2015.
71 f. : il.

Orientador: Sérgio Henriques Saraiva.

Coorientador: Luciano José Quintão Teixeira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Soro do leite. 2. Desidratação. 3. Secagem em leite de espuma. 4. Liofilização. 5. Spray Dryer. I. Saraiva, Sérgio Henriques. II. Teixeira, Luciano José Quintão. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 664

Dedico esse trabalho à Deus, minha família, noiva, amigos e orientadores pelo apoio, força, incentivo, companheirismo e amizade. Sem eles nada disso seria possível.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por permitir alcançar mais uma vitória e por saber que Ele foi o responsável por me dar força para superar as dificuldades, mostrar o caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

Aos meus pais Antônio e Miriã, à minha noiva Letícia e amigos mais próximos, pelo incentivo e por entenderem a necessidade da minha ausência por muitas vezes.

Aos demais familiares pelo apoio e torcida.

Ao meu orientador, o professor Sérgio Henriques Saraiva, por sua ajuda nos momentos mais críticos e contribuir para o meu crescimento profissional e técnico-científico. Ao professor Luciano Teixeira pela coorientação, e a todos os demais professores e funcionários do PCTA que de alguma forma contribuíram na produção desse trabalho.

Aos colegas de laboratório e amigos Wallaf e Cíntia que participaram diretamente deste trabalho e me ajudaram em todos os momentos, além de tornarem o processo muito mais divertido.

Ao amigo Rafael, pela recepção e hospedagem inúmeras vezes e ao amigo Diorge, por ser sempre prestativo quando precisei do seu carro durante as viagens para Alegre.

Ao Programa de Ciência e Tecnologia de Alimentos do CCA/UFES, pela oportunidade. Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), alunos e colegas de trabalho pelo apoio nos momentos em que precisei me ausentar.

A todos vocês não bastaria um muitíssimo obrigado!

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do soro doce e ácido	15
Tabela 2 – Valores de qualidade nutricional de algumas proteínas	16
Tabela 3 – Distribuição das principais proteínas de soro, do leite bovino e humano	18
Tabela 4 – Processos de separação por membranas comerciais.....	25
Tabela 5 – Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos de Page, Lewis e de Henderson e Pabis (H&P) em diferentes temperaturas do ar de secagem	39
Tabela 6 – Tempo de secagem estimado pela Eq.9 para diferentes temperaturas de secagem	43
Tabela 7 – Parâmetros ajustados para o modelo generalizado, Eq.12.....	46
Tabela 8 – Difusividade efetiva da água na espuma do soro de leite e coeficiente de determinação em diferentes valores de temperatura de secagem	47
Tabela 9 – Parâmetros do modelo de Arrhenius para a secagem da espuma de soro de leite com temperatura de secagem variando de 40°C a 80°C.....	49
Tabela 10 – Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos de Page, Lewis e de Henderson e Pabis (H&P) para o processo de secagem por liofilização.....	51
Tabela 11 – Análise de Variância para a variável teor de umidade do soro em pó.....	53
Tabela 12 – Médias do teor de umidade do soro em pó para os tratamentos testados.	53
Tabela 13 – Análise de Variância para a variável teor de proteína do soro em pó.....	55
Tabela 14 – Médias do teor de proteína do soro em pó para os tratamentos testados.	56
Tabela 15 – Análise de Variância para os parâmetros de cor do soro em pó..	57
Tabela 16 – Médias dos parâmetros de cor do soro em pó para os tratamentos testados	57
Tabela 17 – Análise de Variância para a variável solubilidade do soro em pó	60
Tabela 18 – Médias do teor de índice de retenção do soro em pó para os tratamentos testados.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo per capita de queijos no Brasil – em kg/ano	13
Figura 2 – Diagrama esquemático de um sistema de fase única de secagem por atomização. Fonte: Adaptado de Chen e Mujumdar (2008).....	22
Figura 3 – Liofilizador de bancada utilizado no processo de secagem.	32
Figura 4 – Conjunto compressor e atomizador (spray-dryer) utilizado no processo de secagem.	32
Figura 5 – Espuma resultante do processo de bateção.	33
Figura 6 – Curvas de secagem em leite de espuma do soro de leite em diferentes temperaturas do ar de secagem. A: 40°C; B: 50°C; C: 60°C; D: 70°C; E: 80°C.....	41
Figura 7 – Curvas de secagem em leite de espuma do soro de leite em diferentes temperaturas do ar de secagem. As curvas referem-se ao modelo de Page ajustado em cada temperatura.	42
Figura 8 – Valores preditos pelo modelo generalizado versus valores experimentais da razão de umidade.	47
Figura 9 – Curvas de secagem do soro de leite por liofilização.	52
Figura 10 – Variação da umidade do soro em pó obtido pelo processo de secagem em leite de espuma em função da temperatura do ar de secagem. .	55
Figura 11 - Soro em pó obtido pelo processo de spray dryer nas temperaturas de 55°C (a); 60°C (b); 65°C (c); 70°C (d); 75°C (e).	59
Figura 12 - Soro em pó obtido pelo processo de liofilização.....	59
Figura 13 - Soro em pó obtido pelo processo de leite de espuma nas temperaturas de 40°C (a); 50°C (b); 60°C (c); 70°C (d); e 80°C (e).	59

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SORO DE LEITE	15
2.1.1. Proteínas Do Soro	15
2.2. DESIDRATAÇÃO.....	18
2.2.1. Secagem por leito de espuma	19
2.2.2. Secagem por atomização (Spray-dryer)	20
2.2.3. Secagem Por Liofilização	23
2.3. CONCENTRAÇÃO POR MEMBRANAS.....	24
2.3.1. Osmose Reversa	26
2.4. TENDÊNCIAS DO SORO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	28
3. OBJETIVOS	30
3.1. OBJETIVO GERAL	30
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1. LIOFILIZAÇÃO.....	31
4.2. SPRAY-DRYER	32
4.3. LEITO DE ESPUMA	33
4.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E TECNOLÓGICAS	34
4.4.1. Solubilidade do soro em pó	34
4.4.2. Cor.....	34
4.4.3. Proteína e Umidade.....	35
4.5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA E LIOFILIZAÇÃO	35

4.6. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE SECAGEM NO MÉTODO POR LEITO DE ESPUMA SOBRE O TEOR DE UMIDADE DO SORO DE LEITE	36
4.7. AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA DA ÁGUA NA ESPUMA....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA.....	39
5.2. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE SECAGEM SOBRE O TEOR DE UMIDADE DO SORO DE LEITE.....	44
5.3. AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA DA ÁGUA NA ESPUMA....	47
5.4. AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DO SORO DE LEITE POR LIOFILIZAÇÃO	50
5.5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE O TEOR DE UMIDADE DO SORO EM PÓ	52
5.6. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE O TEOR DE PROTEÍNAS DO SORO EM PÓ.....	55
5.7. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE OS PARÂMETROS DE COR DO SORO EM PÓ	56
5.8. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE A SOLUBILIDADE DO SORO EM PÓ	60
6. CONCLUSÕES.....	62
7. REFERÊNCIAS.....	64

RESUMO

DE PAULA, Ramon Ramos. **Estudo da cinética e influência dos métodos de secagem sobre as propriedades físico-químicas de soro de leite**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre - ES. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Henriques Saraiva. Coorientador: Prof. Dr. Luciano José Quintão Teixeira.

O soro de leite é um subproduto da fabricação do queijo, seja por acidificação ou por processo enzimático. Em condições ideais, a caseína do leite se agrega formando um gel, que posteriormente cortado, induz a separação e liberação do soro. É utilizado de diversas formas em toda a indústria alimentícia, possui rica composição em lactose, sais minerais e proteínas. A desidratação é um dos principais processos utilizados para beneficiamento e transformação do soro. Diante disto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos métodos de secagem: liofilização, leito de espuma (nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C) e spray-dryer (nas temperaturas de 55, 60, 65, 70 e 75°C), sobre as características de umidade, proteína, cor e solubilidade do soro, bem como estudar o seu processo de secagem. O soro foi obtido e desidratado após concentração por osmose reversa, testando 11 tratamentos, em 3 repetições, utilizando um delineamento inteiramente casualizado. Os resultados demonstraram que o modelo matemático que melhor se ajustou foi o modelo de Page, apresentando um coeficiente de determinação ajustado acima de 0,98 e erro padrão da regressão em todas as temperaturas abaixo de 0,04 para o método por leito de espuma. Para o método de liofilização os respectivos valores foram 0,9975 e 0,01612. A partir disso, pode-se elaborar um modelo matemático generalizado, apresentando um coeficiente de determinação igual a 0,9888. No caso do leito de espuma, observou-se que à medida que se aumenta a temperatura do ar de secagem, o tempo de secagem diminui e os valores do coeficiente de difusão efetiva aumentam. Porém, a redução no tempo de secagem entre os intervalos de temperatura, diminui com o aumento da mesma. A energia de ativação para a difusão no processo de secagem do soro foi de 26,650 kJ/mol e para todas as avaliações físico-químicas e tecnológicas, a análise de variância apresentou um valor de F significativo ($p < 0,05$), indicando que há pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos que é significativo.

Palavras-chave: Soro de leite, desidratação, leite de espuma, liofilização, spray-dryer.

ABSTRACT

DE PAULA, Ramon Ramos. **Study of kinetics and influence of drying methods on the physico-chemical properties of whey**. 2015. Dissertation (Master's degree in Food Science and Technology) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre - ES. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Henriques Saraiva. Coorientador: Prof. Dr. Luciano José Quintão Teixeira

Whey is a product of cheese manufacturing, either by acidification or by enzymatic process. Ideally, the milk casein is aggregate to form a gel, later cut when the separation thereof occurs. It is used of various forms within the food industry, has a high levels of lactose, minerals and proteins in the composition and dehydration is one of the major processing procedures and processing whey. Hence, the objective of this study was to evaluate the influence of the drying methods: freeze drying, foam-mat drying (in temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80°C) and spray-dryer (in temperatures of 55, 60, 65, 70 and 75°C) on the moisture characteristics, protein, color and solubility of the whey as well as studying your drying process. The whey was obtained and dehydrated after concentration by reverse osmosis, testing 11 treatments and 3 replications, using a completely randomized design. The results showed that the mathematical model best fit was the Page's model, with a coefficient of determination adjusted above 0.98 and standard error of the regression at all temperatures below 0.04 for the foam-mat drying. In the lyophilization method, the respective values were 0.9975 and 0.01612. From this a generalized mathematical model could be achieved, with a coefficient of determination same to 0.9888. In the case of the foam-mat drying was observed that as one increases the temperature of the drying air, the drying time decreases and values of the effective diffusion coefficient increases. However, the reduction in drying time between the intervals of temperature decreases with the increase of the same. The activation energy for diffusion of whey at drying process was 26.650 kJ/mol and in all physico-chemical and technological assessments, analysis of variance showed a significant F value ($p < 0.05$), indicating that there are at least a contrast between the treatments that is significant.

Keywords: Whey, dehydration, foam-mat drying, freeze drying, spray-dryer.

1. INTRODUÇÃO

Um dos métodos mais tradicionais de transformação do leite, com o objetivo de obter um produto de maior conservação, é a fabricação do queijo. Seja por acidificação ou por processo enzimático, através da adição de coalho, a caseína do leite se agrega, considerando as condições ideais, principalmente temperatura e conseqüentemente forma-se um gel, que posteriormente é cortado, possibilitando a separação de um subproduto denominado de soro de leite. Este processo pode ser melhorado por meio de aquecimento e agitação (WALSTRA; WOUTERS; GEURTS, 2006).

Conforme a Portaria nº 146, de 7 de março de 1996, entende-se por queijo:

O produto fresco ou maturado que se obtém por separação parcial do soro do leite ou leite reconstituído (integral, parcial ou totalmente desnatado), ou de soros lácteos, coagulados pela ação física do coalho, de enzimas específicas, de bactérias específicas, de ácidos orgânicos, isolados ou combinados, todos de qualidade apta para uso alimentar, com ou sem agregação de substâncias alimentícias e/ou especiarias e/ou condimentos, aditivos especificamente indicados, substâncias aromatizantes e matérias corantes (BRASIL, 1996).

Estima-se que sejam gerados no mundo cerca de 145 bilhões de quilogramas por ano de soro. Embora exista a possibilidade de tratamento desse material, muitos produtores optam por utilizar parte do soro como produto destinado a alimentação animal e ainda descartam o excedente diretamente nos rios, sem tratamento, representando um sério problema de poluição causado pelos laticínios. Ainda é estimado que 100 kg de soro despejado nos mananciais correspondem à poluição gerada por 45 pessoas/dia (TURNBOW et al., 1974; LOW, 2001 apud SILVA; BOLINI; ANTUNES, 2004).

Como visto na Figura 1, o consumo per capita de queijos no Brasil aumenta a cada ano e a perspectiva de continuidade é positiva. Este aumento gera a necessidade de criar alternativas para a utilização do subproduto, principalmente pelas pequenas e médias indústrias de laticínios. Sabe-se que o soro é nutritivo e tem sido empregado para a obtenção de produtos como: proteína de soro, lactose, minerais do leite, além de outros produtos já tradicionais como o queijo ricota e bebidas lácteas (RICHARDS, 2002).

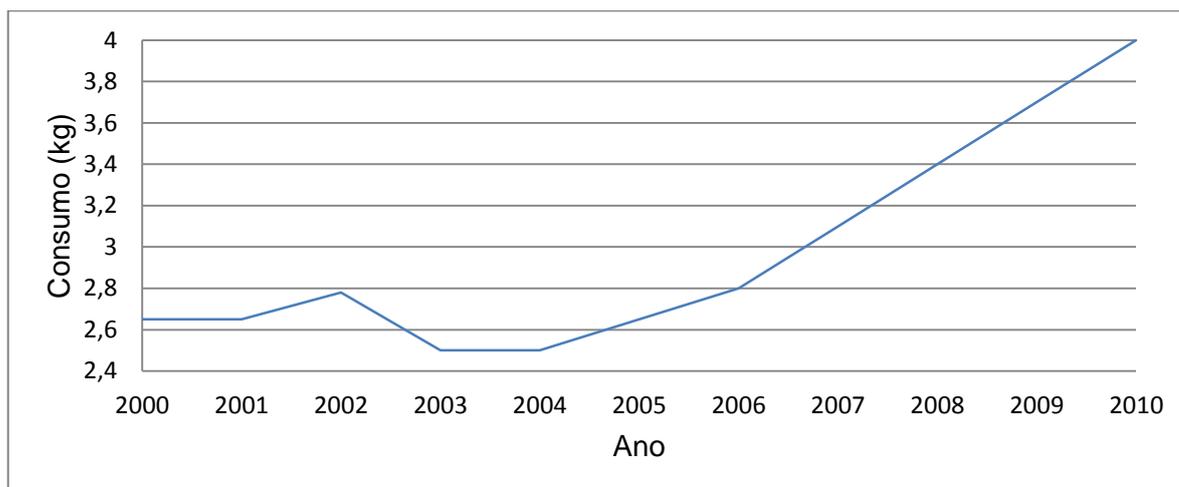


Figura 1 – Consumo per capita de queijos no Brasil – em kg/ano
Fonte: Adaptado de EMBRAPA citado por Scot consultoria (2010).

Possuindo uma demanda bioquímica de oxigênio (DBO) entre 25.000 e 80.000 mg/L, a estabilização do soro pelos tratamentos convencionais se tornam muito difíceis. Logo, quando é despejado junto com os demais resíduos líquidos das indústrias de laticínios, pode dificultar o sistema de tratamento (BRAILE, 1971).

Muitas proteínas do soro possuem propriedades funcionais, nutricionais, fisiológicas ou farmacêuticas. Porém, estas proteínas se apresentam em pequenas concentrações e, conseqüentemente, possuem relativamente, alto custo. O processo de isolamento das proteínas do soro de leite é considerado novo e tornou-se possível através do desenvolvimento de novas tecnologias, especialmente, a de ultrafiltração (FOX; McSWEENEY, 1998).

De acordo com Sgarbieri (1996), as proteínas do soro de leite apresentam elevado valor nutritivo, devido à excelente composição e biodisponibilidade de aminoácidos essenciais e alta digestibilidade. Além disso, apresentam propriedades funcionais tecnológicas como solubilidade; gelatinização; formação e estabilidade de espuma; e emulsibilidade.

A composição e seqüência de aminoácidos, juntamente com sua carga líquida, flexibilidade, hidrofobicidade, estruturas e a habilidade de reagir com outros componentes influenciam na funcionalidade de proteínas em alimentos (ARAÚJO, 2006).

O soro passou a ser procurado pela rica composição em lactose, sais minerais e proteínas, além das suas propriedades funcionais. Um grande número de produtos pode ser obtido a partir de processamento de soro de leite líquido e processos de beneficiamento e transformação como o de desidratação tem-se tornado cada vez mais utilizado para a obtenção de derivados concentrados e isolados (SGARBIERI, 1996).

Diante disto, percebe-se a importância do levantamento de estudos que avaliem até que ponto o calor influencia positivamente ou negativamente nas propriedades físico-químicas do soro, visto que a desidratação é um dos métodos mais eficazes de conservação, além de proporcionar facilidade de utilização, transporte e armazenamento, devido à redução do volume de produto final e redução significativa da atividade de água (A_w).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SORO DE LEITE

De acordo com a legislação internacional, entende-se como soro de leite o: “produto lácteo líquido obtido durante o processamento do queijo, da caseína ou produtos similares, mediante a separação da coalhada, após coagulação do leite e/ ou produtos derivados do leite” e entende-se por soro em pó “o produto obtido por desidratação do soro ou do soro ácido apto para a alimentação humana, mediante processos tecnologicamente adequados” (CODEX ALIMENTARIUS, 2005).

Este líquido remanescente gerado durante a coagulação do leite pode ser classificado como soro doce ou ácido. O primeiro, com pH em torno de 5,6 é resultante da coagulação enzimática (enzima quimosina) em produções de queijos como o cheddar, já o soro ácido, é proveniente da coagulação ácida durante a fabricação de queijos como o cottage, apresentando portanto, pH inferior à 5,1 (ONWULATA; HUTH, 2008)

A tabela 1 indica a composição química dos dois tipos de soro.

Tabela 1 – Composição do soro doce e ácido

	Soro doce	Soro ácido
Sólidos totais (%)	6,4	6,2
Proteína (%)	0,8	0,75
Gordura (%)	0,5	0,04
Lactose (%)	4,6	4,2
Cinza (%)	0,5	0,8
Ácido láctico (%)	0,05	0,4

Fonte: Antunes, 2003.

2.1.1. Proteínas Do Soro

As proteínas do soro são tipicamente globulares: têm relativamente alta hidrofobicidade e suas cadeias peptídicas são dobradas, compactando-se. Em sua maioria, contém uma apreciável proporção de α -hélice e β -folha e a distribuição de suas cargas é bastante homogênea. Elas se tornam insolúveis a

valores de pH inferiores a 6,5 se o leite é aquecido e esta alteração está relacionada com a desnaturação das proteínas pelo calor. A desnaturação não resulta em agregação, mas as proteínas precipitam sobre as micelas de caseína e permanecem dispersas (WALSTRA; WOUTERS; GEURTS, 2006).

Muitas proteínas do soro possuem interessante propriedade funcional, nutricional, fisiológica ou farmacêutica. Porém, estas proteínas se apresentam em pequenas concentrações e, conseqüentemente, possuem relativamente, alto custo. O processo de isolamento das proteínas do soro de leite é considerado novo e tornou-se possível através do desenvolvimento de novas tecnologias, especialmente a de filtração por membranas (FOX; McSWEENEY, 1998).

Três índices são comumente utilizados para determinar a qualidade nutricional das proteínas. São elas: a digestibilidade protéica, que é obtida a partir da composição de aminoácidos essenciais da proteína; relação de eficiência protéica, que é a relação entre ganho de peso e proteína consumida por animais em crescimento; e o valor biológico, que representa a fração da proteína absorvida pelo organismo e é retida para manutenção e crescimento do animal (ANTUNES, 2003). A partir disto, pode-se realizar comparações destes índices entre as proteínas do soro e demais proteínas alimentares, como visualizado na tabela 2.

Tabela 2 – Valores de qualidade nutricional de algumas proteínas alimentares

Proteína	Digestibilidade protéica	Índice de eficiência protéica	Valor biológico
Proteínas do soro	1,00	3,2	100
Ovo inteiro	1,00	3,8	88-100
Caseína	1,00	2,5	80
Concentrado protéico de soja	0,99	2,2	70
Proteína da carne	0,92	2,9	80

Fonte: ANTUNES, 2003.

Como pode ser observado pela tabela e de acordo com Sgarbieri (1996), as proteínas remanescentes no soro de leite apresentam elevado valor

nutritivo, exatamente pela esta excelente composição, biodisponibilidade de aminoácidos essenciais e alta digestibilidade. Além disso, apresentam excepcionais propriedades funcionais como solubilidade, geleificação, formação e estabilidade de espuma, emulsibilidade e outras características que são mencionadas em diversas literaturas.

As proteínas do soro, apresentam-se solúveis em uma faixa ampla de pH, apresentando solubilidade próxima a 100% na faixa de 2,0 a 10,0, diferentemente de outras fontes protéicas como o isolado protéico de soja e o caseinato de sódio. A capacidade de solubilização destas proteínas está intrinsecamente relacionada ao tratamento térmico empregado no seu processamento. O controle da intensidade e velocidade do aquecimento aumenta a capacidade de retenção de água devido à desnaturação da proteína, tornando-a útil na fabricação de produtos cárneos como salsichas e forneados como pães e bolos (ANTUNES, 2003).

Andrade e Nasser (2005) estudaram a formação de gel induzida pelo calor em função do pH de concentrado das proteínas do soro (CPS). Para isso, foram utilizadas suspensões de CPS a 10% (m/m) em água e a diferentes condições de pH (4,0, 4,6 e 7,0). Concluiu-se que a concentração usada nos experimentos foi suficiente para a formação de géis macroscópicos e que o pH exerce papel importante na formação e na natureza estrutural dos géis.

Pagno et al. (2009), obtiveram concentrados protéicos de soro (CPS) a partir de ultrafiltração e diafiltração com o objetivo de caracterizar suas propriedades funcionais tecnológicas. Três procedimentos foram realizados e como resultado, geraram-se concentrados com 56%, 71% e 80% de proteína, respectivamente. A solubilidade dos CPS variou de 70% a 85% (40°C/pH 6,8); a capacidade emulsificante variou de 0,21 a 0,37 g/mg; o índice de atividade emulsificante variou de 12 a 30 m²/g e a estabilidade da emulsão de 7 a 16%. Os índices foram considerados pelos autores como potenciais para utilização em formulações alimentares.

Dentre as proteínas do soro estão a β -lactoglobulina (β -lg), a α -lactoalbumina (α -la), albumina do soro bovino (BSA), Imunoglobulinas (Ig's) e também, em um número menor, proteose-peptonas, uma mistura heterogênea de peptídeos solúveis estáveis ao calor e precipitados resultantes da proteólise

das caseínas por enzimas lácteas, tais como a lactoperoxidase, lactoferrina e os glicomacropéptidos (GMP) (MULVIHILL, 2005).

A quantidade total das proteínas do soro bovino e de outras espécies não difere muito, porém a distribuição é diferente. Na tabela 3 é possível verificar quais são as principais proteínas do soro e a comparação da distribuição das mesmas entre o soro bovino e humano.

Tabela 3 – Distribuição das principais proteínas de soro, do leite bovino e humano

Proteínas de soro (g/L)	Leite bovino	Leite humano
Proteínas totais	5,6	5,0
β -lactoglobulina	3,2	Desprezível
α -lactalbumina	1,2	2,8
Albumina sérica bovina (BSA)	0,4	0,6
Imunoglobulinas	0,7	1,0
Lactoferrina	0,1	0,2
Lisozima	Desprezível	0,4

Fonte: SGARBIERI, 2005.

2.2. DESIDRATAÇÃO

A desidratação representa uma boa alternativa tecnológica para reduzir perdas. Segundo Fellows (2000), desidratação ou secagem é definida como a aplicação de calor, sob condições controladas para remover a maior parte da água normalmente presente em um alimento por meio de evaporação. A sua principal finalidade é prolongar a vida de prateleira dos alimentos pela redução na atividade de água (A_w).

Sendo considerada uma operação complexa, a secagem envolve transferência de calor e massa; e normalmente requer o uso de temperaturas elevadas, o que pode afetar as qualidades sensoriais do produto. Além disso, podem causar e/ou acelerar reações físicas, químicas e bioquímicas, às vezes, influenciadas pelo valor de atividade de água (A_w) do pó, as quais podem ser desejáveis ou indesejáveis, tais como o escurecimento não enzimático, caramelização, oxidação lipídica, perda de nutrientes, perda de voláteis e

desnaturação das proteínas no produto (MUJUNDAR, 2006; SMITH; HUI, 2004).

A eficiência energética, o tempo de secagem, a qualidade do produto alcançado, entre outros fatores são características determinantes na escolha do método de secagem. O ideal é que haja um equilíbrio entre estes fatores para se atingir o objetivo econômico, além de garantir um alimento seguro e com qualidade sensorial desejada. Dentre os vários existentes, em geral, os processos de desidratação podem ser divididos em dois grandes grupos: em atmosfera normal e à vácuo. Os processos à vácuo podem ser preferenciais no processamento de produtos sensíveis ao oxigênio e ao calor, visto que podem ser utilizadas temperaturas relativamente baixas (CHEN; MUJUMDAR, 2008).

2.2.1. Secagem por leito de espuma

A secagem em leito de espuma é uma técnica desenvolvida para promover secagem de alimentos líquidos, que devem ser convertidos em espuma por meio da adição de agentes espumantes e incorporação de ar por agitação. Em seguida, a espuma é espalhada sobre uma superfície e levada a um secador, resultando em um produto poroso e quebradiço, de fácil moagem e transformação em pó com boas propriedades de reidratação. Além de ser uma técnica que demanda menos recursos tecnológicos, o custo operacional é menor e possibilita o uso de temperaturas mais baixas como 40 ou 50°C, preservando o sabor e o valor nutricional do alimento (FELLOWS, 2000; FRANCIS, 2000).

A secagem de espumas envolve alimentos líquidos como sucos, extratos e polpas preparadas, nos quais existem apenas células dispersas na fase líquida. Espumas alimentícias normalmente apresentam período de taxa constante de secagem antes do período de taxa decrescente de secagem. Existem duas teorias para descrever o movimento da água durante a desidratação no período de taxa decrescente: teoria difusional e teoria de fluxo por capilaridade. Sendo a mais aceita, a teoria difusional baseada na segunda Lei de Fick. Podendo ser assumindo que o material é homogêneo e que o encolhimento durante a secagem é desprezível e que a resistência ao fluxo de

água é uniformemente distribuído ao longo do interior do material (PEREIRA, 2008).

Estudos mostram que o processo de secagem por leito de espuma mantém as características sensoriais e as propriedades nutricionais e/ou físico química dos alimentos. Soares et al. (2001) elaboraram um suplemento alimentar em pó, a partir da desidratação da polpa de frutos de acerola. Na condição experimental definida, a polpa foi formulada e desidratada em estufa de secagem com circulação de ar, a uma temperatura de 60 a 70°C, por 90 minutos, obtendo-se um produto em pó, com umidade final de 7,2%. Em paralelo ao experimento, foi efetuada uma caracterização química da polpa de acerola. Os resultados encontrados mostraram que o produto elaborado apresentou elevado teor de vitamina C, em um nível 10 vezes maior do que na polpa integral.

Pinto (2009) estudou as propriedades da espuma de jenipapo formada por 4 diferentes aditivos, albumina, Emustab®, maltodextrina e Superliga® nas concentração: 5, 10, 15 e 20% em massa, para uma subsequente secagem por leito de espuma (foam-mat). Concluiu-se que o Emustab® foi o aditivo que obteve os melhores resultados para uma posterior secagem foam-mat, pois através da sua utilização, houve a maior redução da massa específica (densidade), obteve-se a maior estabilidade da espuma, mantendo-se os valores de pH e vitamina C, quando comparados com a polpa in natura.

Monzelle (2009), em seu experimento de mestrado obteve um pó a partir de espuma de caldo de cana, estudando sua cinética de secagem e as características físico-químicas e sensoriais. Os resultados apresentaram que a solubilidade do produto em forma de flocos foi de 100% e na forma de pó, 90,53%. A análise sensorial mostrou numa escala hedônica de 1 a 7 médias iguais a 5,88 para o atributo impressão global, 5,87 para o aroma, 5,79 para a aparência, 5,60 para o sabor e para a cor 5,45, concluindo que a secagem em leito espuma do caldo de cana produz um produto com boas características de pó e com qualidade sensorial para ser consumido e adquirido pela maioria dos provadores.

2.2.2. Secagem por atomização (Spray-dryer)

A secagem por pulverização (spray dryer) é uma técnica que utiliza atomização de líquido para criar gotículas e deixa as partículas em suspensão, as quais são secas individualmente quando em contato com um meio de secagem gasoso quente, usualmente ar. Espontaneamente, a diferença de temperatura e pressão parcial da água entre o produto e o ar, resulta na transferência de energia na forma de calor do ar para o produto e na transferência de água do produto para o ar. Tornou-se um dos métodos mais utilizados para secar os alimentos líquidos no mundo ocidental. Embora o desenvolvimento do processo esteja intimamente associado com a indústria de laticínios e a demanda por secagem de leite, esta tecnologia tem sido desenvolvida e expandida para cobrir um grupo não só de alimentos como produtos relacionados à biotecnologia agroquímica, química, concentrados minerais, produtos farmacêuticos, dentre outros (MUJUMDAR, 2006).

Grandes quantidades de gotículas individuais do líquido são formadas pelo atomizador, os quais podem ser dos tipos: bicos de pressão e duplo fluido, sendo mais utilizado em escala industrial, o do tipo disco rotativo. Geralmente localizado na região central da câmara de secagem, o atomizador pulveriza as gotas, resultando em uma rápida evaporação da água a uma temperatura relativamente baixa, devido a grande área superficial das mesmas, o que minimiza os danos térmicos ao produto. A secagem das gotículas continua no interior da câmara de secagem até se conseguirem as características de partícula desejadas. A separação das partículas secas e o subsequente recolhimento são realizados em equipamentos externos, tais como ciclones ou sacos-filtro, conforme esquematizado na Figura 2. (CHEN; MUJUMDAR, 2008; SCHUCK, 2009).

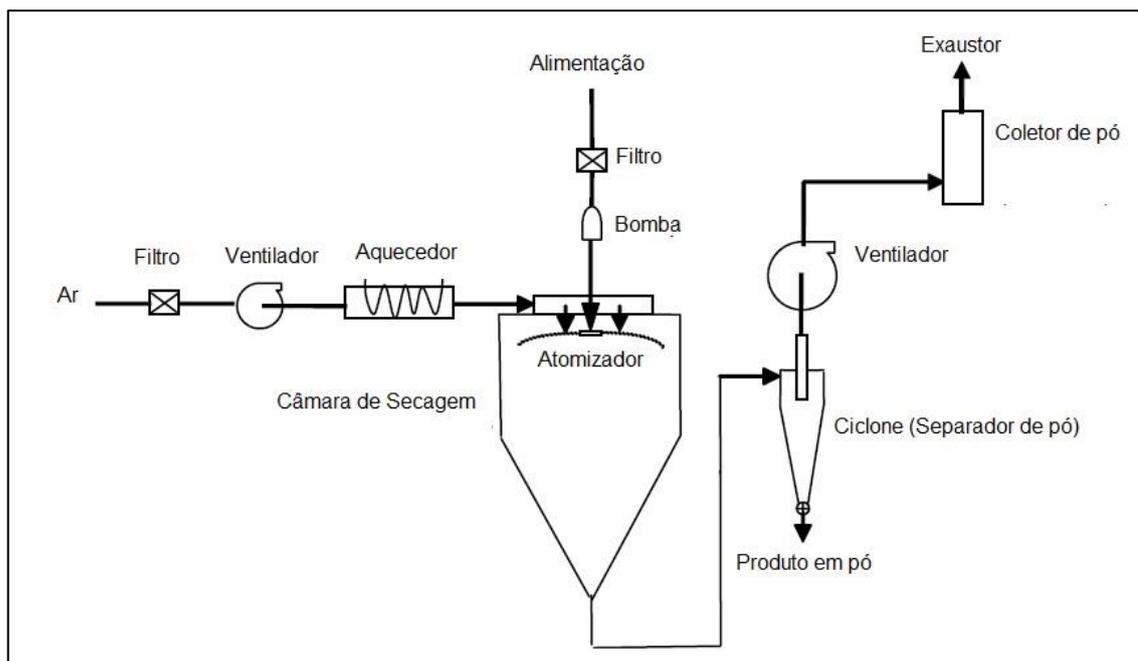


Figura 2 – Diagrama esquemático de um sistema de fase única de secagem por atomização. Fonte: Adaptado de Chen e Mujumdar (2008).

O processo de secagem por spray dryer possui várias vantagens. Dentre elas se destacam o fato de que se trata de uma operação relativamente rápida de secagem e contínua; é possível adaptar um controle automático total; e com o controle das condições de secagem, é possível manter constantes as características do pó no final do processo de secagem (MASTERS, 1985).

Vários estudos mostram que o sistema de secagem por pulverização permite adaptações quanto às temperaturas de entrada e vazão de ar, o que influencia diretamente na temperatura de saída do pó, bem como nas características do produto final. Perrone et al. (2013), determinaram a influência das condições de operação em spray dryer piloto sobre a umidade e a atividade de água do leite em pó integral. Seis tratamentos foram empregados variando a temperatura e a vazão de ar na câmara e a vazão de produto. Os resultados indicaram que tratamento com menor temperatura do ar de entrada, menor vazão de ar e menor temperatura do ar de saída possibilitaram que o leite em pó integral tivesse atividade de água média superior a 0,200 (0,236), tornando-o inadequado. O controle de apenas um único atributo durante a secagem não possibilitou a padronização da umidade e da atividade de água do leite em pó.

Esteves (2006) variou a temperatura do ar de entrada (140°C – 170°C) e a rotação do disco atomizador (27000 – 33000 rpm) durante a secagem de extrato de café por spray-dryer. Os resultados mostraram que o tamanho da partícula do pó apresentou uma tendência a aumentar de acordo com a diminuição da temperatura de secagem. Além disso, o aumento, tanto a temperatura quanto a velocidade de rotação do disco, influenciaram de forma contrária nos valores de atividade de água, porém, não influenciaram os valores de densidade aparente.

2.2.3. Secagem Por Liofilização

Liofilização é um processo de secagem em que o meio de suspensão do alimento é cristalizado a baixas temperaturas e, posteriormente, passa por um processo de sublimação, ou seja, mudança de fase do estado sólido diretamente para fase de vapor. O principal objetivo da secagem por liofilização é a fabricação de um produto estável durante o armazenamento e que é inalterado após a reconstituição com água, embora isso também dependa da embalagem e condições de armazenamento (REY; MAY, 2010; OETJEN; HASELEY, 2004).

Estudos indicam que a utilização da técnica de liofilização é promissora devido à possibilidade de boa reidratação, incluindo alimentos sólidos, além da manutenção das características nutricionais. Vieira, Nicoletti e Telis (2012) realizaram um trabalho com o objetivo de avaliar a cinética de secagem e os parâmetros de qualidade – conteúdo de vitamina C, reidratação e textura – de fatias de abacaxi liofilizadas em função da espessura e da temperatura de congelamento. Em relação à difusividade efetiva e ao teor de vitamina C retido ao final do processo, o comportamento dessas variáveis teve efeitos distintos quanto à espessura das fatias, sendo maior a retenção de vitamina C para as fatias de menor espessura enquanto a difusividades efetiva de maiores valores foram observadas para as fatias mais grossas; porém, a temperatura do ar de congelamento intermediária (-24 °C) foi a mais favorável para ambas as espessuras. O maior grau de dureza foi encontrado nas amostras submetidas a condições intermediárias de temperatura de congelamento e de espessura (1,0

cm), enquanto o índice de reidratação mostrou-se mais vantajoso em temperaturas mais altas de congelamento e em fatias mais finas.

Menezes, Torres e Srur (2008) avaliaram algumas das características físico-químicas de polpa de açaí liofilizada. Os resultados mostraram que esse produto na forma de pó é um alimento altamente calórico, 489,39 Kcal/100 g de polpa liofilizada. O teor de carboidratos totais foi de 42,53% \pm 3,56 e o de proteínas foi de 8,13 g \pm 0,63 por 100 g de produto. Na avaliação do perfil de minerais foi demonstrado que o potássio (900 mg/100 g de polpa de açaí liofilizado) e o cálcio (330 mg/100 g de polpa de açaí liofilizada) foram os minerais observados em maior abundância, além do magnésio (124,4 mg em 100 g de polpa liofilizada) e ferro (4,5 mg em 100 g de polpa liofilizada), em menores concentrações. Os autores concluíram que esse processo pode ser considerado como uma excelente alternativa de conservação dessa polpa devido a presença e manutenção de importantes componentes nutricionais encontrados na polpa.

Marques (2008), em seu experimento de doutorado, avaliou as características de cinco frutas tropicais: abacaxi, acerola, goiaba, mamão papaya e manga. As frutas liofilizadas apresentaram características de alta porosidade, alta taxa de reidratação e elevada preservação de nutrientes.

Oliveira et al. (2010) realizaram um estudo com objetivo de obter ubaia desidratada pelo processo de liofilização e avaliar as alterações dos componentes nutricionais provocadas pelo processo. Após despulpamento, as frutas foram liofilizadas e analisadas em relação às características físico-químicas, comparando-as com as características da ubaia in natura. De acordo com os resultados, os autores observaram o decréscimo da umidade inicial, aumento significativo nos teores de açúcares totais, sólidos solúveis, cinzas, vitamina C, acidez, ferro, sódio, potássio e tanino e queda nos valores de fósforo e pH após a liofilização do fruto.

2.3. CONCENTRAÇÃO POR MEMBRANAS

Várias são as aplicações industriais das membranas, o que faz delas, peças fundamentais em operações muito importantes na indústria de alimentos. A cada dia, indícios são encontrados da utilização desta tecnologia,

tais como: a purificação de água, tratamento de efluentes industriais, desidratação recuperação de solventes de compostos orgânicos voláteis, a concentração de sólidos como proteína, dentre outros. A membrana permeável ou semi-permeável geralmente é constituída por polímero de metal ou cerâmica e funciona como uma barreira, controlando a taxa de transporte de massa através dela e restringindo a mobilidade de determinados compostos. Isso permite a obtenção de produtos livres de determinados compostos, sendo denominado como permeado e conseqüentemente, produtos com concentração elevada destes determinados compostos, denominados retentados (SCOTT, 1995).

Os tratamentos térmicos comumente utilizados no leite e derivados, apesar de garantir a segurança microbiológica, afetam as propriedades físico-químicas dos sais de cálcio, a qualidade sensorial, bem como a capacidade de fabricação de queijos, o que justifica a utilização intensa das tecnologias de membrana pelas indústrias de laticínios, que operam em temperaturas mais baixas (CORREIA; MAUBOIS; CARVALHO, 2011).

Os vários tipos de membranas, combinados com diferentes condições de pressão, originam tratamentos com finalidades que também se diferem conforme pode ser visualizado pela tabela abaixo.

Tabela 4 – Processos de separação por membranas comerciais.

Processo	Força motriz	Material retido	Algumas Aplicações
Microfiltração	Pressão (0,5 – 2 atm)	Material em suspensão; Bactérias.	Esterilização bacteriana, clarificação de bebidas, concentração de células, oxigenação do sangue.
Ultrafiltração	Pressão (1 – 7 atm)	Colóides, Macromoléculas > 5000 Da.	Fracionamento /Concentração de proteínas, recuperação de pigmentos.

Nanofiltração	Pressão (5 – 25 atm)	Moléculas de massa molar média (500 < MM <2000 Da)	Purificação de enzimas
Osmose reversa	Pressão (15 – 80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão	Dessalinização /Desmineralização de águas, concentração de alimentos líquidos.
Diálise	Concentração	Moléculas de massa molar > 5000 Da.	Hemodiálise, recuperação de NaOH.
Eletrodiálise	Gradiente do potencial elétrico	Macromoléculas e compostos não iônicos	Concentração de soluções salinas, purificação de águas
Permeação de gases	Concentração	Gás menos permeável	Recuperação de hidrogênio, fracionamento de ar
Pervaporação	Pressão de vapor	Líquido menos permeável	Desidratação de álcoois

Fonte: Adaptado (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

2.3.1. Osmose Reversa

A osmose reversa, também conhecida como osmose inversa é um processo baseado na inversão do fenômeno natural da osmose, causado por aplicação de uma diferença de pressão, maior que a pressão osmótica, sobre a solução mais concentrada. Com isso, ocorre a remoção de solutos da solução, através da passagem de solvente, geralmente água, por uma membrana semipermeável, do meio mais concentrado para o meio menos concentrado (BETTIOL, 2004).

Sá et al. (2003) obtiveram suco de abacaxi concentrado utilizando a osmose inversa associada à microfiltração para clarificação. O suco de abacaxi clarificado (8,3°Brix) foi concentrado em uma unidade de osmose inversa, do tipo quadro e placas, utilizando membranas de filme composto com rejeição

nominal ao NaCl de 95%, à temperatura de 25°C. Foram testadas três pressões transmembrana, 20, 40 e 60 bar, sendo obtidos fatores de concentração na ordem de 2,1, 3,6 e 4,5; teores de sólidos solúveis de 16.0°Brix, 26.2°Brix e 30.8°Brix; 16,0%, 26,0% e 30,9% de sólidos totais; 14,9g, 30,1g e 34,7g de ácido cítrico/100g de suco, respectivamente. Não foram observadas variações significativas ($p < 0,05$) nos valores de pH do suco concentrado em relação ao suco integral.

Cianci et al. (2005) avaliaram a utilização da microfiltração e da osmose inversa para a obtenção de suco de caju clarificado e concentrado, sendo que a clarificação foi conduzida em uma unidade de microfiltração tubular e, em seguida, foi utilizado um sistema de osmose inversa, do tipo quadro e placas, para concentração. Os taninos, responsáveis pela adstringência do suco, foram retidos pela membrana de microfiltração e, por isso, não foram detectados nos sucos clarificado e concentrado. Verificou-se que o suco clarificado contendo 12,1° Brix foi concentrado até 28,6° Brix e o teor de vitamina C aumentou de 162mg/100g no suco clarificado para 372mg/100g, no concentrado.

Desconsi, Filho e Salazar (2014), realizaram um estudo com o objetivo de avaliar a estabilidade e realizar uma caracterização físico-química e microbiológica de soro de leite concentrado por osmose reversa. Foi observado que a contagem de bactérias aeróbias mesófilas apresentou uma contagem abaixo da referência (1×10^5 UFC mL⁻¹). Além disso, o soro de leite concentrado apresentou acidez titulável de 22 °D, sólidos igual a 18 °BRIX, densidade de 1085 g cm⁻³, percentual de extrato seco total em torno de 30,0%, teor de gordura abaixo de 4% e pH de 6,4. Os autores concluíram que o soro de leite concentrado obtido por osmose reversa apresentou elevado valor nutricional e estabilidade microbiológica.

Já Mendes, Furtado e Perrone (2012) sugerem a utilização da tecnologia de osmose reversa acoplada à técnica de evaporação na produção de leite condensado com o intuito de reduzir os gastos de energia térmica durante a cocção do produto. Em revisão, os autores citam também o uso de membranas de osmose reversa para a fabricação de iogurte e leite em pó, como forma de complementar ou até mesmo substituir o processo de concentração do leite a vácuo e para a padronização de leite UHT (TAMIME, 2007 apud MENDES; FURTADO; PERRONE, 2012).

2.4. TENDÊNCIAS DO SORO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

É comum encontrar referências de utilização do soro como matéria prima e como substituto de ingredientes, seja com o objetivo de reduzir custos, melhorar qualidade nutricional e funcional ou de apenas encontrar soluções para destinar esse resíduo biológico.

Forniari (2006), em sua tese de mestrado desenvolvida no Rio Grande do Sul, objetivou estudar a reutilização do soro de queijo prato e mussarela como substrato para a produção de goma xantana, utilizando duas linhagens de *Xanthomonas*. O maior rendimento obtido foi de 26,35 g/L, com o soro proveniente da produção de mussarela, resultado este superior àqueles encontrados na literatura.

Em um trabalho desenvolvido por Valduga et al. (2006), foram formulados pães de leite, substituindo-se o leite em pó por soro de leite desidratado nas proporções de 25, 50, 75 e 100 %. Essa substituição ocasionou uma diminuição no teor de cálcio e aumentou nos teores de gordura e sódio nas formulações e a formulação com 25 % de soro de leite desidratado apresentou as melhores características de sabor e aceitação geral (69 %).

A água empregada na elaboração da mortadela foi substituída nas proporções de 50, 75 e 100% por soro de leite líquido em um experimento conduzido por Terra et al. (2009). Avaliou-se características sensoriais, pH, estabilidade da emulsão da mortadela, assim como a percentagem de gordura e líquido, liberados após o tratamento térmico da emulsão da mortadela. A adição de soro de leite líquido não exerceu influência significativa na maioria das características. A substituição de 75 e 100% por soro proporcionou menor percentual de gordura liberada após o tratamento térmico. Concluiu-se então, que o soro líquido pode ser usado para substituir 100% do gelo usado na elaboração da mortadela.

Madrona et al. (2009), desenvolveu um trabalho que teve como objetivo realizar uma avaliação do perfil sensorial de cinco amostras de doce de leite pastoso formuladas com diferentes concentrações de soro de queijo em pó ou in natura, que variaram de 0 a 50% em substituição ao leite. Os atributos sensoriais avaliados foram aparência, aspecto geral, cor, sabor, textura e intenção de compra. Os resultados mostraram que não houve diferença

significativa entre as amostras, concluindo que a utilização de soro na fabricação do doce de leite é uma ótima alternativa para a indústria.

Em um estudo desenvolvido na Universidade Estadual de Maringá (UEM), o soro foi utilizado como substituinte do leite na preparação do pão de queijo nas concentrações de 0%, 50% e 100%. Além das análises físico-químicas, as amostras foram também avaliadas sensorialmente para os atributos aparência, aroma, sabor e textura, através do teste de escala hedônica. As amostras com 50% e 100% de soro em substituição ao leite não apresentaram diferença significativa para nenhum dos atributos avaliados. Os valores das análises físico-químicas para as amostras com substituição de leite por soro de leite apresentaram um aumento da umidade e um decréscimo da acidez, quando comparadas com a amostra padrão, porém, as amostras se enquadraram na legislação (IMADURA; MADRONA, 2008).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência de diferentes métodos de secagem sobre as características físico-químicas de soro de leite, bem como estudar o seu processo de secagem.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ajustar modelos matemáticos descrevendo a cinética de secagem do soro para cada temperatura no método de secagem por leite de espuma;
- Ajustar um modelo matemático generalizado descrevendo o teor de água do soro em função do tempo e da temperatura de secagem;
- Estimar o coeficiente de difusão efetivo para o soro em cada temperatura de secagem no método por leite de espuma;
- Estimar os parâmetros do modelo de Arrhenius para a difusividade efetiva do soro como função da temperatura do ar de secagem no método por leite de espuma;
- Ajustar modelos matemáticos descrevendo a cinética de secagem do soro para cada temperatura no método de secagem por liofilização e
- Avaliar o efeito da secagem pelos métodos de liofilização, atomização e leite de espuma sobre as propriedades físico-químicas de umidade, solubilidade, proteína e cor do soro de leite em pó.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O soro de leite doce foi adquirido, após ser submetido ao processo de osmose reversa, com o intuito de aumentar a concentração de sólidos totais, mediante doação pela Cooperativa Agropecuária do Norte do Espírito Santo (Veneza) localizado em Nova Venécia – ES. O soro alcançou um teor de sólidos solúveis de 17°Brix, medido em refratômetro digital de bancada, marca Abbe Atago, fornecedor Hosteclab.

Após a constatação do teor de sólidos solúveis, o produto foi dividido em unidades amostrais de 500 g e armazenado em embalagens plásticas metalizadas e impermeáveis, com o sistema de fechamento zip, em temperatura de congelamento no Laboratório de Operações Unitárias do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), em Alegre – ES.

De acordo com o planejamento de utilização das amostras, as mesmas foram submetidas à temperatura de refrigeração por 24 horas para total descongelamento e foram então, submetidas ao processo de secagem, sendo utilizados três métodos: liofilização, spray-dryer e secagem por leito de espuma.

Para avaliar o efeito do processo de secagem sobre as propriedades físico-químicas e tecnológicas do soro de leite em pó, as análises e o processo de secagem do produto foram realizadas em três repetições, totalizando 33 unidades experimentais, visto que foram aplicadas cinco temperaturas diferentes nos processos por atomização e leito de espuma. Foi realizado um delineamento inteiramente casualizado, e para cada propriedade físico-química e tecnológica foi feita a análise de variância univariada (ANOVA) a 5% de probabilidade. Em caso de diferença significativa, o teste de Tukey de comparações múltiplas foi feito a 5% de probabilidade.

4.1. LIOFILIZAÇÃO

A liofilização foi realizada por liofilizador de bancada modelo Labconco freezezone 2.5 L (Figura 3) após o congelamento das amostras em *superfreezer* marca Thermocientific, com temperatura de 80°C negativos.



Figura 3 – Liofilizador de bancada utilizado no processo de secagem.
Fonte: O autor (2015).

4.2. SPRAY-DRYER

Foi utilizado um spray-dryer em escala piloto, da marca Yamato, modelo ADL311S (figura 4), sendo que foram aplicadas cinco temperaturas de secagem (55° , 60° , 65° , 70° e 75°C), através do controle das temperaturas de entrada do ar e da saída de produto.



Figura 4 – Conjunto compressor e atomizador (spray-dryer) utilizado no processo de secagem.
Fonte: O autor (2015).

4.3. LEITO DE ESPUMA

Para o processo de secagem por leito de espuma cada unidade foi adicionada de 8% do agente espumante Marvi gel®. Percentagem esta, definida após a realização de testes preliminares.

Para a produção da espuma utilizou-se uma batedeira de uso doméstico, a qual permaneceu em funcionamento por um período de 20 minutos, sendo 5 minutos em velocidade mínima e 15 minutos em velocidade máxima.

A espuma resultante do batimento foi espalhada sobre bandejas de aço inoxidável de 10 mm de altura e levadas para estufa com circulação de ar, conforme figura abaixo, trabalhando em cinco temperaturas controladas (40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C) por um tempo necessário para estabilizar a perda de peso.



Figura 5 – Espuma resultante do processo de bateção.
Fonte: O autor (2015).

A secagem foi acompanhada em relação à perda de peso, periodicamente: de 15 em 15 minutos na primeira hora, 30 em 30 minutos até a terceira hora e de 60 em 60 minutos a partir da quarta hora de desidratação, até peso constante.

A espuma obtida anteriormente a secagem foi avaliada em relação à sua densidade e coalescência. O método usado para determinar a massa específica foi realizado com uma proveta de 2000 mL, sendo a amostra colocada até o volume desejado e pesada para se obter a relação massa por

volume. A coalescência foi determinada através da medição do volume de líquido formado no fundo da proveta por um período de 30 minutos em intervalos de 5 minutos.

Em todos os casos, o produto desidratado foi armazenado em embalagens de plástico metalizado, as quais foram fechadas pelo sistema zip e posteriormente seladas em selador por aquecimento. Após o fechamento, as embalagens foram devidamente rotuladas para identificação do conteúdo, bem como da data de fabricação, sendo então conservadas em ambiente isento de umidade.

4.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E TECNOLÓGICAS

As análises físico-químicas e das propriedades tecnológicas do produto *in natura* e do soro em pó foram realizadas em duplicata no laboratório de Química de Alimentos e no laboratório de Operações Unitárias, no CCA-UFES.

4.4.1. Solubilidade do soro em pó

A análise constituiu em adicionar 5,0 g da amostra em 35,0 g de água destilada a 25°C. Em seguida realizou-se a mistura utilizando agitador magnético (300 rpm, 30 s). A solução resultante do processo de mistura foi filtrada em peneira com abertura de 35 *mesh*, e a solução filtrada foi quantificada em balança analítica. A solubilidade foi medida pelo índice de retenção (IR), que é a relação entre a massa de insolúveis e solúveis.

4.4.2. Cor

A análise de cor do soro em pó foi realizada em um colorímetro da marca Konica-Minolta CM-5 espectrofotométrico de reflectância e transmitância. Foi empregada a escala de cor do sistema CIELAB utilizando a escala de cor L^* , que indica valores de luminosidade, do preto ($L=0$) ao branco ($L=100$), a^* que indica a região do vermelho (+a) ao verde (-a) e b^* , que indica a região do amarelo (+b) ao azul (-b). Além disso, foram geradas as coordenadas h^0 , que corresponde a tonalidade de cor e c^* , que corresponde ao grau de saturação da cor.

4.4.3. Proteína e Umidade

Para a análise de proteína foi utilizado o método de Kjeldahl modificado (IAL, 1985) e para a análise de umidade foi utilizado o método de secagem por infravermelho em balança.

4.5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA E LIOFILIZAÇÃO

A partir dos resultados experimentais de razão de umidade ao longo do tempo de secagem, ajustou-se os seguintes modelos de cinética de secagem:

- Modelo de Lewis:

$$RU = e^{-kt} \quad (1)$$

Em que:

RU = razão de umidade

k = parâmetro do modelo

T = tempo

- Modelo de Page:

$$RU = e^{-kt^n} \quad (2)$$

Em que:

k e n = parâmetros do modelo.

- Modelo de Henderson e Pabis:

$$RU = a \cdot e^{-kt} \quad (3)$$

Em que:

a e k = parâmetros do modelo.

Os ajustes dos parâmetros dos modelos foram feitos por meio da minimização da soma de quadrados dos desvios, usando regressão não linear. Os modelos ajustados foram comparados pelo coeficiente de determinação ajustado (R_{adj}^2), definido pela Eq.4, e pelo erro padrão da regressão (S), definido pela Eq.5:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{prev,i})^2}{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - \bar{RU})^2} \frac{N-1}{N-p} \quad (4)$$

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{prev,i})^2}{N-p} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Em que:

$RU_{exp,i}$ = valores experimentais da razão de umidade para a i -ésima observação;

$RU_{prev,i}$ = valores previstos da razão de umidade para a i -ésima observação;

RU = valor médio da razão de umidade calculado a partir dos valores experimentais

N = número de observações e

p = o número de parâmetros no modelo.

4.6. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE SECAGEM NO MÉTODO POR LEITO DE ESPUMA SOBRE O TEOR DE UMIDADE DO SORO DE LEITE

Escolhido o modelo que melhor descreveu a cinética de secagem, foi avaliado o efeito da temperatura do ar de secagem sobre os parâmetros do modelo. Um modelo matemático foi proposto para descrever esse efeito. A escolha sobre qual tipo de modelo ajustar foi feita após a plotagem do(s) gráfico(s) desse(s) parâmetros versus a temperatura. Escolhida(s) a(s) função(s) que melhor representa(m) o(s) parâmetro(s), um modelo

generalizado, em que o(s) parâmetro(s) original é substituído por essa função na cinética de secagem, foi ajustado por regressão não linear.

4.7. AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA DA ÁGUA NA ESPUMA

O modelo de difusão representa uma soma de infinitos termos, em que os primeiros termos são os mais importantes e, a partir de um determinado termo, a contribuição das próximas parcelas podem ser desprezadas. Nesse modelo a razão de umidade é função do tempo de secagem, e o parâmetro do modelo é o coeficiente de difusão efetivo.

No caso de espuma disposta em uma bandeja não perfurada, com o ar escoando paralelamente a face superior da espuma, pode-se considerar a difusão da água no interior da espuma unidirecional e perpendicular em relação ao escoamento do ar. Nesse caso, o modelo de difusão é dado pela seguinte equação:

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2i+1)^2} e^{-\frac{(2i+1)^2 D_{ef} \cdot \pi^2}{4l^2} \cdot t} \right] \quad (6)$$

Em que:

D_{ef} = Difusividade Efetiva;

t = tempo e

l = espessura da camada de espuma.

Para calcular o valor do parâmetro do modelo (difusividade efetiva) que torna mínima a soma de quadrados dos desvios, o somatório acima pode ser truncado em um número definido de termos, e os demais termos desprezados, pois à medida que se aumenta i , as parcelas do somatório tornam-se cada vez menos importantes.

A influência da temperatura de secagem sobre a difusividade efetiva foi avaliada ajustando-se o modelo de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 e^{-E_a/RT} \quad (7)$$

Em que:

R = constante universal dos gases;

E_a = Energia de ativação;

D_o = fator pré-exponencial e

T = temperatura absoluta em Kelvin.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA

Para cada temperatura de secagem, a razão de umidade foi calculada a partir das massas das bandejas registradas ao longo do tempo, conforme a equação a seguir:

$$RU = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (8)$$

Em que,

M_t = Massa do produto na bandeja no tempo t ;

M_e = Massa do produto na bandeja no equilíbrio;

M_o = Massa do produto na bandeja no tempo inicial (tempo zero);

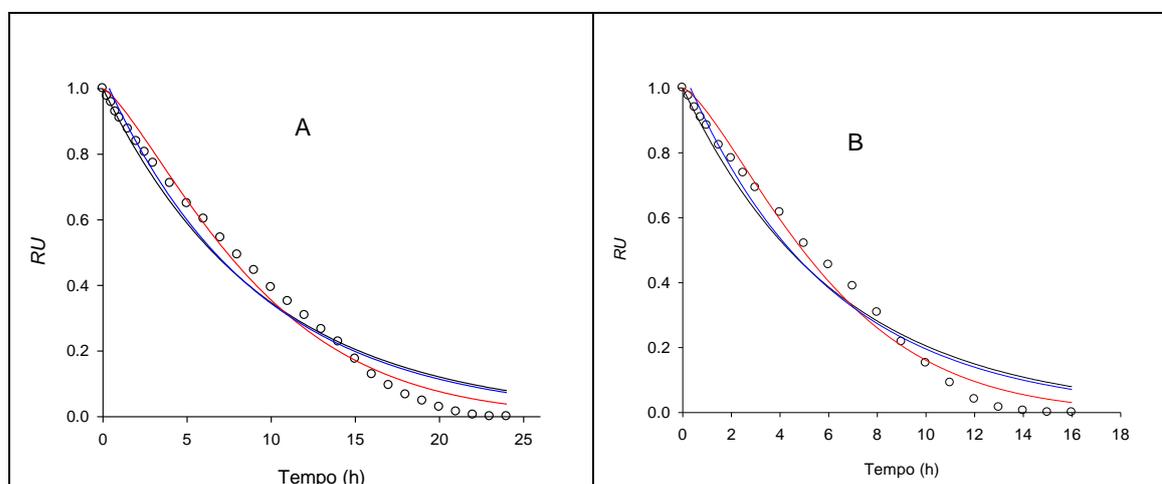
A partir dos resultados experimentais de razão de umidade ao longo do tempo de secagem, ajustaram-se os modelos matemáticos dados pelas Equações 1, 2 e 3. A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros ajustados, do coeficiente de determinação ajustado e do erro padrão da regressão para cada modelo em todas as temperaturas testadas. O modelo é considerado melhor quanto maior for o coeficiente de determinação ajustado e quanto menor for o erro padrão da regressão.

Tabela 5 – Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos de Page, Lewis e de Henderson e Pabis (H&P) em diferentes temperaturas do ar de secagem

Temperatura	Modelo	k	a ou n	R_{adj}^2	S
40°C	Lewis	0,1056	-	0,9737	0,0578
	Page	0,05026	1,3136	0,9898	0,0359
	H&P	0,1106	1,0423	0,9758	0,0554
50°C	Lewis	0,1583	-	0,9665	0,0677
	Page	0,07752	1,3723	0,9884	0,0400

	H&P	0,1686	1,0550	0,9701	0,0640
60°C	Lewis	0,2548	-	0,9654	0,0685
	Page	0,1487	1,3892	0,9898	0,0371
	H&P	0,2717	1,0565	0,9701	0,0655
70°C	Lewis	0,3166	-	0,9661	0,0679
	Page	0,2017	1,4107	0,9938	0,0290
	H&P	0,3434	1,0668	0,9715	0,0622
80°C	Lewis	0,3835	-	0,9551	0,0830
	Page	0,2242	1,5869	0,9938	0,03096
	H&P	0,4248	1,0903	0,9633	0,0750

Pode-se observar na Tabela 5 que o Modelo de Page foi o que apresentou o maior valor do coeficiente de determinação ajustado e o menor valor do erro padrão da regressão em todas as temperaturas testadas. Logo, conclui-se que, dentre os modelos testados, o Modelo de Page é o que melhor representa as cinéticas de secagem em leite de espuma do soro de leite. Esse resultado também pode ser observado na Figura 6, que apresenta as curvas de secagem em leite de espuma do soro de leite em diferentes temperaturas. Observa-se que, dentre os modelos testados, a curva ajustada pelo Modelo de Page foi a que mais se aproximou dos resultados experimentais, confirmando o melhor desempenho desse modelo para o ajuste de cinéticas de secagem em leite de espuma do soro de leite. Assim, o Modelo de Page foi o modelo escolhido para descrever a cinética de secagem em leite de espuma do soro de leite.



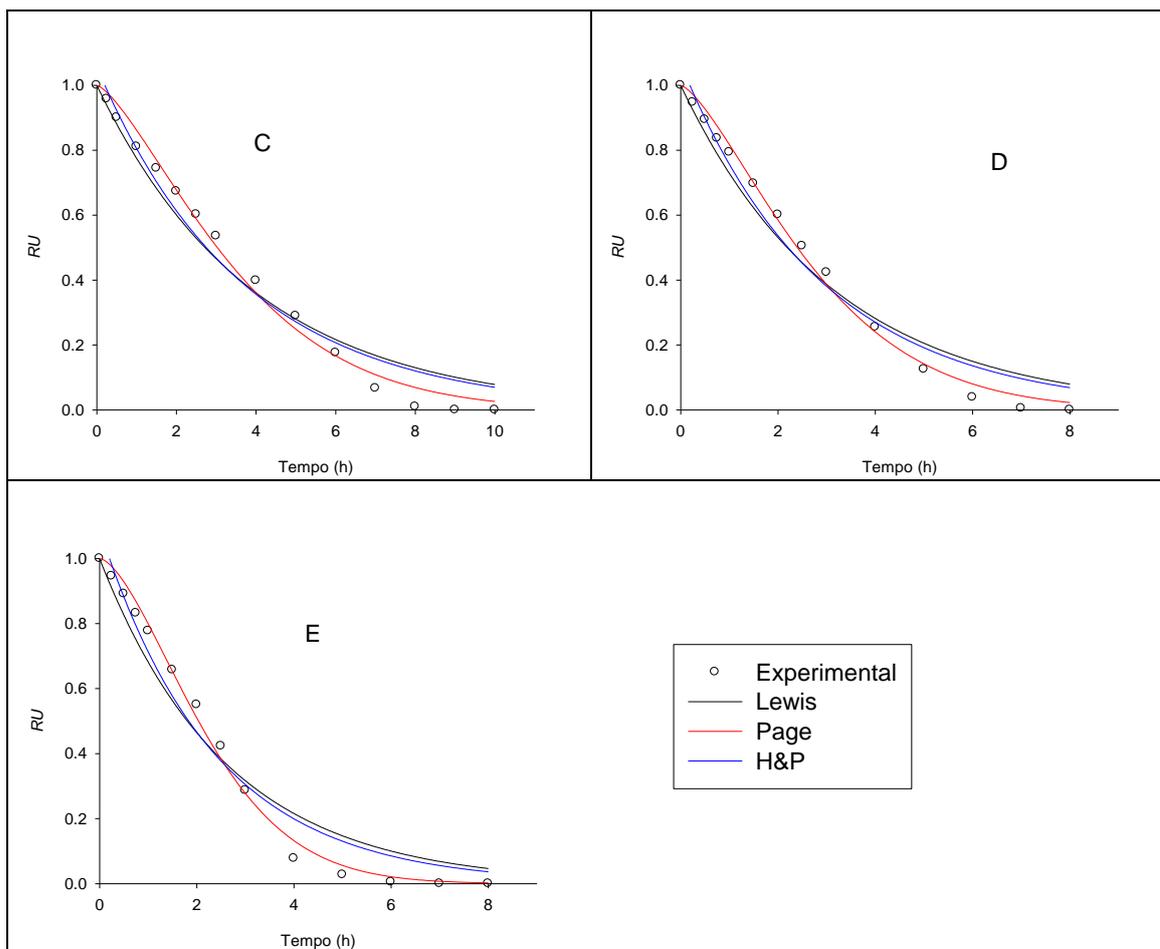


Figura 6 – Curvas de secagem em leite de espuma do soro de leite em diferentes temperaturas do ar de secagem. A: 40°C; B: 50°C; C: 60°C; D: 70°C; E: 80°C.

Na Figura 7 pode-se visualizar as curvas de secagem em leite de espuma do soro de leite nas cinco temperaturas testadas utilizando o modelo de Page. Nota-se que quando se aumenta a temperatura de secagem a partir de valores menores de temperaturas, a redução do tempo de secagem é muito grande e que quando se aumenta a temperatura a partir de temperaturas maiores essa redução no tempo de secagem torna-se bem menor.

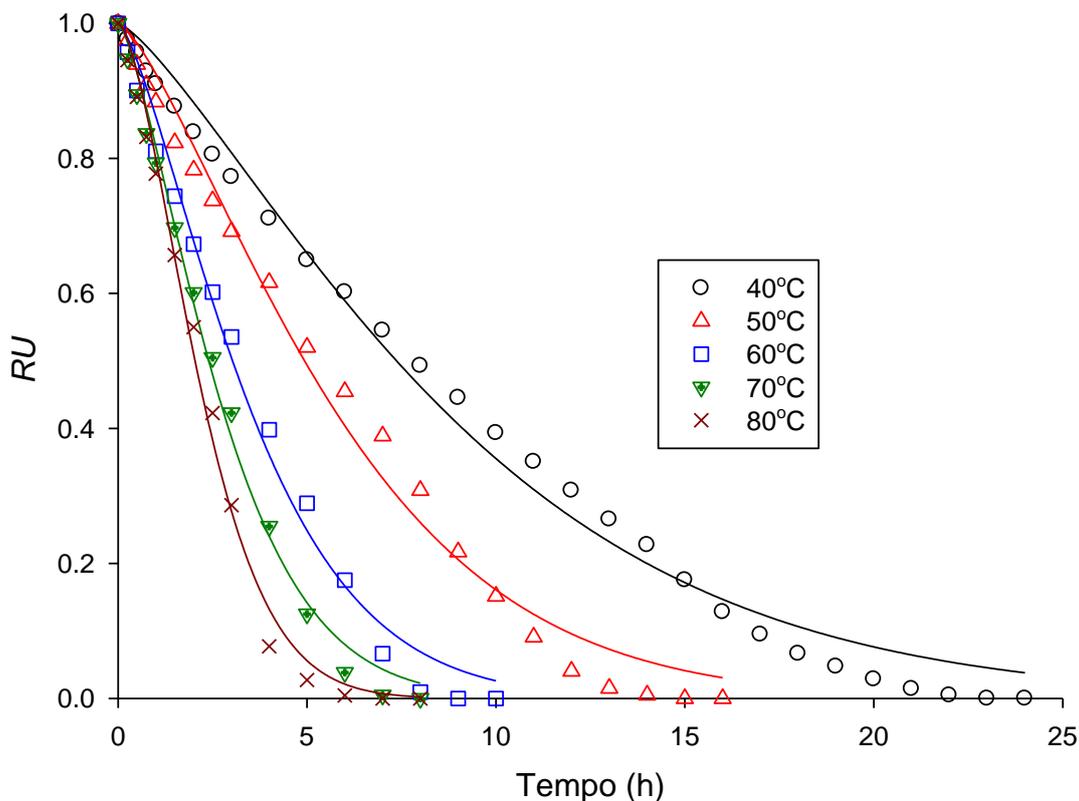


Figura 7 – Curvas de secagem em leito de espuma do soro de leite em diferentes temperaturas do ar de secagem. As curvas referem-se ao modelo de Page ajustado em cada temperatura.

De acordo com o modelo de Page, a razão de umidade varia de 1 (tempo zero) a zero (tempo tendendo a infinito). Uma vez que o valor zero para a razão de umidade é na realidade uma assíntota horizontal, jamais poderíamos definir o tempo final do processo de secagem como aquele no qual a razão de umidade seja zero, pois este tempo seria infinito. Sendo assim, o final do processo de secagem poderia ser definido como o tempo no qual a razão de umidade atingisse um valor suficientemente próximo de zero. Para comparar os diferentes tratamentos quanto ao tempo necessário para o processo de secagem, adotou-se como critério o tempo final sendo aquele no qual a razão de umidade livre atinja o valor de 0,01. Assim, o tempo de secagem pode ser calculado por:

$$t_s = \left(-\frac{\ln(0,01)}{k} \right)^{1/n} \quad (9)$$

Em que t_s é o tempo de secagem, segundo o critério adotado.

A partir dos parâmetros ajustados para o Modelo de Page, calculou-se uma estimativa do tempo de secagem em cada tratamento conforme Eq. 9. Os valores calculados para o tempo de secagem são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Tempo de secagem estimado pela Eq.9 para diferentes temperaturas de secagem

Temperatura (°C)	t_s (h)	$\Delta t_s / \Delta T$ (h/°C)
40	31,16	
50	19,62	-1,154
60	11,84	-0,0778
70	9,18	-0,0266
80	6,72	-0,0146

Observa-se que à medida que se aumenta a temperatura do ar de secagem, o tempo necessário para a secagem diminui. Quando se aumenta a temperatura no intervalo de 40 a 50°C, a redução média no tempo de secagem é de 1,154h para cada 1°C de aumento na temperatura. A redução no tempo de secagem torna-se menor com o aumento da temperatura, atingindo o valor médio de 0,0146h para cada 1°C de aumento na temperatura no intervalo de 70 a 80°C. Essas são informações bastante úteis no projeto e otimização de processos de secagem, pois o custo do processo de secagem é função do tempo de secagem e da temperatura de secagem. O custo aumenta com o tempo de secagem e o custo por unidade de tempo aumenta com a temperatura de secagem.

Reis (2011) avaliou a cinética de secagem a vácuo de fatias de yacon (*Smallanthus sonchifolius*), e ajustou os modelos de Lewis, Henderson- Pabis e Page. O modelo de Lewis foi o que obteve menor valor de R^2 (0,961), seguido pelo modelo de Henderson- Pabis (0,969). O autor atribui a isso, o fato de que o modelo de Lewis possui um menor número de parâmetros do que o modelo de Henderson-Pabis. Isso corrobora com o presente trabalho, pois o modelo

de Lewis também apresentou um R^2 menor do que o modelo de Henderson-Pabis. Reis (2011) encontrou um bom ajuste do modelo de Page para a secagem do yacon ($R^2= 0,995$). No presente estudo, o modelo de Page foi o que apresentou melhor valor de R^2 em todas as temperaturas de secagem, o que indica que esse modelo foi o mais adequado para representar a cinética de secagem dessa raiz.

Viganó (2012) avaliou as propriedades termodinâmicas de adsorção de água e cinética de secagem de subprodutos da industrialização de abacaxi (*Ananás comosus L.*), e observou que o modelo de Page ajustou-se melhor aos dados experimentais da casca de abacaxi. Já para o cilindro central do fruto, os modelos de Page e Henderson-Pabis apresentaram melhores resultados estatísticos. Tal fato também foi atribuído ao maior número de parâmetros desses modelos, o que permite que se ajustem aos dados experimentais com mais qualidade. O modelo de Page contém dois parâmetros, k e n . O parâmetro k representa o efeito das condições externas de secagem, como a temperatura (BABALIS; BELESSIOTIS, 2004). O parâmetro n representa a resistência interna do produto à secagem (CORRÊA, et al., 2007).

Guiné e Barroca (2010), estudaram diferentes sistemas de secagem da pêra *S. bartolomeu*, e também encontraram bons ajustes de R^2 para o modelo de Page. Corrêa, Araújo e Afonso (2003) encontraram que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem de milho doce.

5.2. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE SECAGEM SOBRE O TEOR DE UMIDADE DO SORO DE LEITE

Um modelo generalizado que descreva a razão de umidade livre do soro de leite como função do tempo e da temperatura do processo de secagem em leite de espuma foi proposto. Partiu-se do Modelo de Page, Eq.2.

A partir dos parâmetros do Modelo de Page estimados nas diferentes temperaturas testadas, verificou-se que o parâmetro k variou muito mais que o parâmetro n com a variação da temperatura. O parâmetro k apresentou um coeficiente de variação de 54%, enquanto que o parâmetro n apresentou um coeficiente de variação de 7,3%.

Verificou-se graficamente que o parâmetro n do Modelo de Page apresentou uma tendência próxima de uma relação linear com a temperatura. Assim, propõe-se a seguinte relação funcional para o parâmetro n :

$$n = aT + b \quad (10)$$

Em que,

T = Temperatura do ar de secagem, em °C

a e b = parâmetros do modelo.

Também verificou-se graficamente que o parâmetro k do Modelo de Page tem uma tendência de aumentar exponencialmente com a temperatura. Assim, propõe-se a seguinte relação funcional para o parâmetro k :

$$k = k_1 e^{\frac{-k_2}{T}} \quad (11)$$

Em que,

T = Temperatura do ar de secagem, em °C

k_1 e k_2 = parâmetros do modelo.

Esse modelo proposto pela Eq.9 tem uma forma semelhante ao modelo de Arrhenius. Sua proposição foi motivada pelo fato do parâmetro k ter variado exponencialmente com a temperatura e pelo fato do parâmetro k estar relacionado com a difusividade efetiva do material. O modelo de Arrhenius é tradicionalmente o modelo mais utilizado para explicar a difusividade efetiva em função da temperatura.

Substituindo as Eq. 10 e Eq. 11 na Eq. 2, obtém-se o seguinte modelo generalizado:

$$RU = e^{\left[- \left(k_1 e^{\frac{-k_2}{T}} \right) t^{(aT+b)} \right]} \quad (12)$$

Em que a razão de umidade, RU , é uma função da temperatura, T , e do tempo, t .

Utilizando-se todos os dados experimentais de todas as curvas de secagem, ou seja, todos os valores de razão de umidade em todos os tempos de secagem de todas as temperaturas de secagem, o modelo generalizado foi ajustado por meio de regressão não linear.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros ajustados para o modelo generalizado. O modelo ajustado apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,9888.

Tabela 7 – Parâmetros ajustados para o modelo generalizado, Eq.12

Parâmetro	Estimativa
k_1	1,2076
k_2	129,2894
a	0,004047
b	1,1564

A Figura 8 apresenta o gráfico dos valores preditos pelo modelo generalizado versus os valores experimentais. Observa-se que o modelo generalizado apresenta um alto valor de coeficiente de determinação, o que significa que esse modelo tem um bom ajuste à secagem do soro de leite em leite de espuma. Além disso, observa-se na Figura 8 que os pontos estão próximos e aleatoriamente distribuídos em torno da reta $y=x$, o que confirma que o modelo generalizado ajustado é adequado para estimar a razão de umidade do soro de leite como função da temperatura do ar de secagem e do tempo de secagem para o sistema de secagem em leite de espuma.

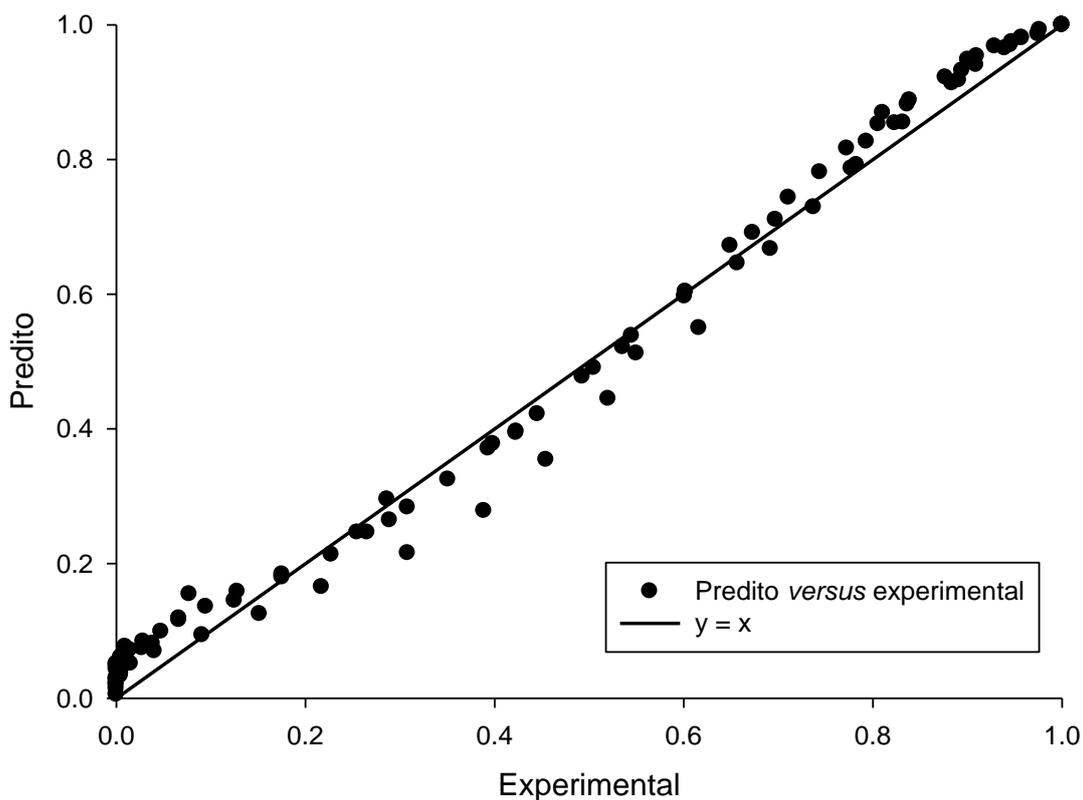


Figura 8 – Valores preditos pelo modelo generalizado versus valores experimentais da razão de umidade.

5.3. AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA DA ÁGUA NA ESPUMA

Para estimar a difusividade efetiva da água na espuma de soro de leite nas diferentes temperaturas testadas, a Eq. 6 foi ajustada por meio de regressão não linear, truncando-se o somatório em cinco termos, pois verificou-se que a adição de novos termos não alterava a estimativa da difusividade efetiva.

A Tabela 8 apresenta os valores estimados da difusividade efetiva da água na espuma e do coeficiente de determinação para as diferentes temperaturas testadas.

Tabela 8 – Difusividade efetiva da água na espuma do soro de leite e coeficiente de determinação em diferentes valores de temperatura de secagem

Temperatura (°C)	$D_{ef} \cdot 10^{10}$ (m ² /s)	r^2
40	9.4031	0,9194
50	13.9328	0,9045

60	22.3865	0,9045
70	27.2314	0,8956
80	33.5823	0,8868

Verifica-se que durante a secagem da espuma do soro de leite, a difusividade efetiva aumenta significativamente com a elevação da temperatura, apresentando valores que variam de $9,4031 \times 10^{-10}$ a $33,5823 \times 10^{-10}$ m²/s, quando a temperatura variou de 40°C a 80°C, respectivamente.

Roncheti (2014) calculou a difusividade efetiva da espuma de beterraba, de tomate, de cenoura e de morango no processo de secagem em leito de espuma com temperatura variando de 40 a 80°C e encontrou valores com ordem de grandeza entre 10^{-9} a 10^{-7} m²/s.

Reis et al. (2012) estudaram a cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum*, e concluíram que os valores do coeficiente de difusão aumentaram de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem. Ocácia e Souza (2009) concluíram que os valores dos coeficientes de difusão efetivos médios de umidade nas fatias de maçã aumentaram com o aumento da temperatura do ar de secagem, devido à maior energia fornecida pelo sistema, o que favorece a evaporação da água, mostrando a diminuição das resistências internas de secagem com o aumento da temperatura.

Segundo Goneli (2007), a variação do coeficiente de difusão efetivo se dá com a elevação da temperatura, o que aumenta o nível de vibração molecular das moléculas de água e contribui para difusão mais rápida.

Oliveira et al. (2006) determinou em seu trabalho a difusividade efetiva da raiz de chicória e notou que quanto maior foi a variável temperatura, maior foi a difusividade efetiva. Desse modo, concluiu que a temperatura do ar foi a única variável que manteve influência significativa sobre a difusividade efetiva.

Goneli (2008), estudando a secagem de sementes de mamona, encontrou magnitudes da difusividade efetiva entre $0,5117 \times 10^{-10}$ e $1,5643 \times 10^{-10}$ m²/s para a faixa de temperatura de 25°C a 55°C. Almeida et al. (2009), verificaram que durante a secagem do feijão adzuki os valores da difusividade efetiva apresentaram magnitudes entre $0,51 \times 10^{-10}$ e $2,23 \times 10^{-10}$ m²/s para a faixa de temperatura de 30°C a 70°C; o mesmo ocorreu para o

feijão vermelho, que apresentou valores entre $2,1 \times 10^{-10}$ a $10,4 \times 10^{-10}$ m²/s para temperaturas de secagem entre 25°C e 55°C (RESENDE et al., 2007).

Amendola e Queiroz (2007) encontraram, durante a secagem de banana a 50°C, o valor de $4,58 \times 10^{-10}$ m²/s para a difusividade efetiva. Babalis e Belessiotis (2004), relataram magnitudes de $8,40 \times 10^{-10}$ a $1,13 \times 10^{-9}$ m²/s para figo quando aumentaram a temperatura de 55°C para 85°C.

Sharma e Prasad (2004) verificaram que, com o aumento da temperatura de secagem de alho de 40°C para 70°C, a difusividade efetiva apresentou magnitudes de $1,593 \times 10^{-10}$ e $9,7 \times 10^{-10}$, respectivamente e Sacilik (2007) encontrou valores de $8,53 \times 10^{-11}$ a $17,52 \times 10^{-11}$ m²/s para a difusividade efetiva das sementes de abóbora durante a secagem nas temperaturas de 40°C a 60°C. Costa et al. (2011) encontrou valores de difusividade efetiva de sementes de crambe variando de $0,88 \times 10^{-11}$ a $5,85 \times 10^{-11}$ quando a temperatura de secagem variou de 30°C para 70°C, respectivamente.

Segundo ZOGZAS et al. (1996), os valores de difusividade efetiva para produtos alimentícios sólidos se encontram entre 10^{-10} e 10^{-9} m²/s, para a faixa de temperatura em estudo.

Logo, a ordem de grandeza dos valores da difusividade efetiva da água na espuma do soro de leite encontrados no presente trabalho está de acordo com a magnitude dos valores encontrados na literatura científica para a maioria das matérias-primas agrícolas.

A partir dos valores estimados da difusividade efetiva da espuma de soro de leite em cada temperatura, ajustou-se, por meio de regressão não linear, os parâmetros do modelo de Arrhenius para se obter uma relação funcional da difusividade efetiva do soro como função da temperatura. A Tabela 9 apresenta os parâmetros do modelo de Arrhenius. O valor do coeficiente de determinação foi de 0,8921.

Tabela 9 – Parâmetros do modelo de Arrhenius para a secagem da espuma de soro de leite com temperatura de secagem variando de 40°C a 80°C

Parâmetro	Estimativa
D_0	$3,0268 \times 10^{15}$ m ² /s
E_a	26,650 KJ/mol

A energia de ativação para a difusão líquida no processo de secagem da espuma de soro de leite foi de 26,650 kJ/mol. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto. Zogzas et al. (1996) ressaltam que a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ/mol. Roncheti encontrou valores da energia de ativação de 22,2489; 15,62; 26,93; 18,59 kJ/mol para cenoura, tomate, beterraba e morango, respectivamente. Goneli (2008) determinaram a energia de ativação para a mamona de 15,25 kJ/mol, durante a secagem com uma faixa de temperatura de 25°C a 55°C. Souza et al. (2011) encontraram o valor de 24,78 kJ/mol para o nabo forrageiro quando a temperatura de secagem variou de 30°C a 70°C. Goneli et al. (2007), avaliando a secagem de trigo nas temperaturas entre 25°C e 5°C, verificaram que o produto apresentou energia de ativação para a difusão líquida de 42,0 kJ/mol. Reis et al. (2011) secaram pimenta Cumari do Pará para temperaturas de 45°C a 65°C e obtiveram o valor da energia de ativação de 5,02 kJ/mol. Costa et al. (2011) encontraram o valor da energia de ativação do processo de secagem de sementes de crambe de 37,07 kJ/mol com a temperatura de secagem variando de 30°C a 70°C. A energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto (KASHANINEJAD et al., 2007). Segundo Kayacier e Singh (2004), a energia de ativação diminui com a elevação do teor de água inicial do produto durante o processo de secagem.

5.4. AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DO SORO DE LEITE POR LIOFILIZAÇÃO

A razão de umidade foi calculada a partir das massas do produto registradas ao longo do tempo, conforme a Eq.8. A partir dos resultados experimentais de razão de umidade ao longo do tempo de secagem, ajustou-se os seguintes modelos de cinética de secagem: Modelo de Lewis (Eq. 1); Modelo de Page (Eq. 2) e Modelo de Henderson e Pabis (Eq. 3). Os ajustes dos parâmetros dos modelos foram feitos por meio da minimização da soma de quadrados dos desvios, usando regressão não linear. Os modelos ajustados

foram comparados pelo coeficiente de determinação ajustado (R_{adj}^2), definido pela Eq.4, e pelo erro padrão da regressão (S), definido pela Eq.5.

A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros ajustados, do coeficiente de determinação ajustado e do erro padrão da regressão para cada modelo em todas as temperaturas testadas. O modelo é considerado melhor quanto maior for o coeficiente de determinação ajustado e quanto menor for o erro padrão da regressão.

Tabela 10 – Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos de Page, Lewis e de Henderson e Pabis (H&P) para o processo de secagem por liofilização

Modelo	k	a ou n	R_{adj}^2	S
Lewis	0,08917	-	0,9969	0,01777
Page	0,1005	0,9541	0,9975	0,01612
H&P	0,08819	0,9903	0,9970	0,01758

Pode-se observar na Tabela 10 que o Modelo de Page foi o que apresentou o maior valor do coeficiente de determinação ajustado e o menor valor do erro padrão da regressão em todas as temperaturas testadas. Logo, conclui-se que, dentre os modelos testados, o Modelo de Page é o que melhor representa as cinéticas de secagem do soro de leite por liofilização. Esse resultado também pode ser observado na Figura 10, que apresenta as curvas de secagem em leite de espuma do soro de leite por liofilização. Observa-se que, embora a o Modelo de Page tenha sido o de melhor desempenho, os outros modelos também tiveram excelente ajuste, uma vez que suas curvas estão muito próximas. Assim, o Modelo de Page foi o modelo escolhido para descrever a cinética de secagem do soro de leite por liofilização. Rocha (2013) ajustou o modelo de Page para a liofilização de suco misto de açaí, morango e acerola e encontrou excelente ajuste, com coeficiente de determinação acima de 0,99.

Utilizando-se o mesmo critério que foi utilizado no cálculo do tempo de secagem por leite de espuma, calculou-se o tempo de secagem por liofilização e o valor encontrado foi de 55,05 h, valor bem superior aos valores encontrados para a secagem por leite de espuma. Vários trabalhos envolvendo liofilização encontraram um tempo superior a 48 h para garantir que o produto

atinga os teores de umidade desejados (MENEZES et al., 2009; RAHARITSIFA e RATTI, 2010; CATELAM et al, 2011). Outros autores encontraram valores inferiores a 30 horas (ROCHA, 2013; BEER et al., 2009; VIEIRA et al., 2012). O tempo de secagem depende, dentre outras características, do sistema de liofilização (sistema de vácuo, fonte de calor para o processo de sublimação), do tipo de material a ser liofilizado, da quantidade e umidade inicial do material sendo liofilizado, da área de secagem e da espessura do material. Em função de todas essas características, diferentes autores podem encontrar tempos de liofilização distintos. A Figura 9 demonstra a curva de secagem do soro por liofilização.

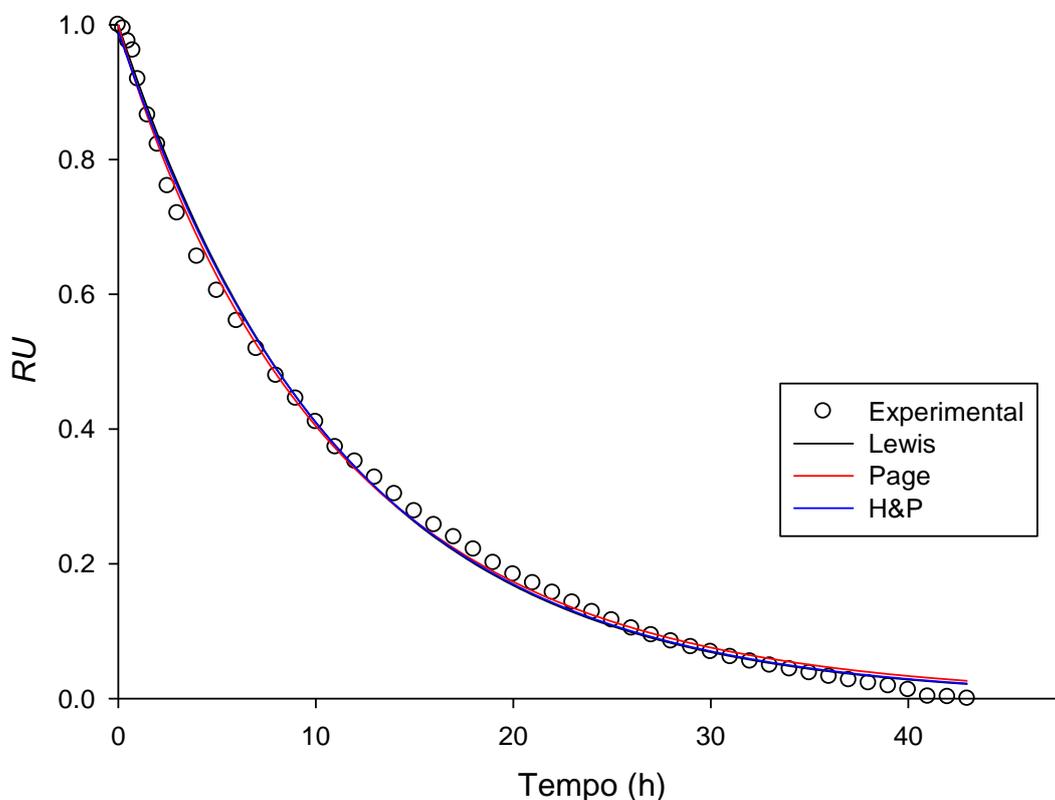


Figura 9 – Curvas de secagem do soro de leite por liofilização.

5.5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE O TEOR DE UMIDADE DO SORO EM PÓ

A análise de variância para os onze tratamentos testados (5 de leite de espuma, 5 de spray dryer e 1 de liofilização) apresentou um valor de F significativo ($p < 0,05$), indicando que há pelo menos um contraste entre as

médias dos tratamentos que é significativo. A Tabela 11 mostra o resultado da análise de variância para o teor de umidade do soro em pó.

Tabela 11 – Análise de Variância para a variável teor de umidade do soro em pó

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Tratamento	10	49,5898	4,9590	8,711*	0,000025
Resíduo	20	11,3850	0,5693		
Total	30	60,9748			

*: Significativo ($p < 0,05$)

Uma vez que a análise de variância foi significativa, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey. A Tabela 12 mostra as médias dos 11 tratamentos com o resultado do teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 12 – Médias do teor de umidade do soro em pó para os tratamentos testados.

Tratamento	Umidade (g de água / 100g de pó)
Spray Dryer 55°C	5.6667ab
Spray Dryer 60°C	5.6833ab
Spray Dryer 65°C	5.0667ab
Spray Dryer 70°C	5.7333ab
Spray Dryer 75°C	5.0833ab
Liofilização	4.5667a
Leito de espuma 40°C	8.0000c
Leito de espuma 50°C	6.8167bc
Leito de espuma 60°C	4.1667a
Leito de espuma 70°C	3.6667a
Leito de espuma 80°C	2.9000a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey.

Nota-se, pela Tabela 12, que a temperatura não influenciou no teor de umidade do soro em pó para o processo de secagem em spray dryer. Além disso, pode-se concluir que o teor de umidade do soro em pó liofilizado não difere dos pós provenientes dos processos de secagem em spray dryer e do

processo de secagem em leito de espuma a 60°C, 70°C e 80°C. Contudo, nota-se que a temperatura de secagem tem efeito sobre o teor de umidade do soro em pó obtido pelo processo de secagem em leito de espuma. Pode-se observar que quanto maior a temperatura, menor a umidade do soro em pó. Esse fato é esperado, uma vez que o teor de umidade de equilíbrio de alimentos é menor, quanto maior a temperatura e quanto menor a umidade relativa do ar. No caso de secagem em leito de espuma, a secagem em maiores temperaturas contribui para reduzir o teor de umidade de equilíbrio das duas formas, uma vez que o aumento da temperatura do ar diminui sua umidade relativa. Para avaliar o efeito da temperatura do ar sobre o teor de umidade do soro em pó obtido pelo processo de secagem em leito de espuma, o seguinte modelo foi testado:

$$U = U_o + a e^{-kT} \quad (13)$$

Em que,

U = Teor de umidade, em g de água por 100g de pó, do soro em pó obtido por secagem em leito de espuma na temperatura T em °C;

U_o , a e k = parâmetros do modelo;

Os parâmetros obtidos foram ajustados por meio de regressão não linear e o seguinte modelo foi obtido:

$$U = 0,2443 + 24,7602 e^{-0,02844 T} \quad (14)$$

O modelo ajustado apresentou um erro padrão da regressão de 0,6057 e um valor de coeficiente de determinação de 0,9616. A Figura 10 mostra os pontos experimentais e a curva simulada pelo modelo ajustado.

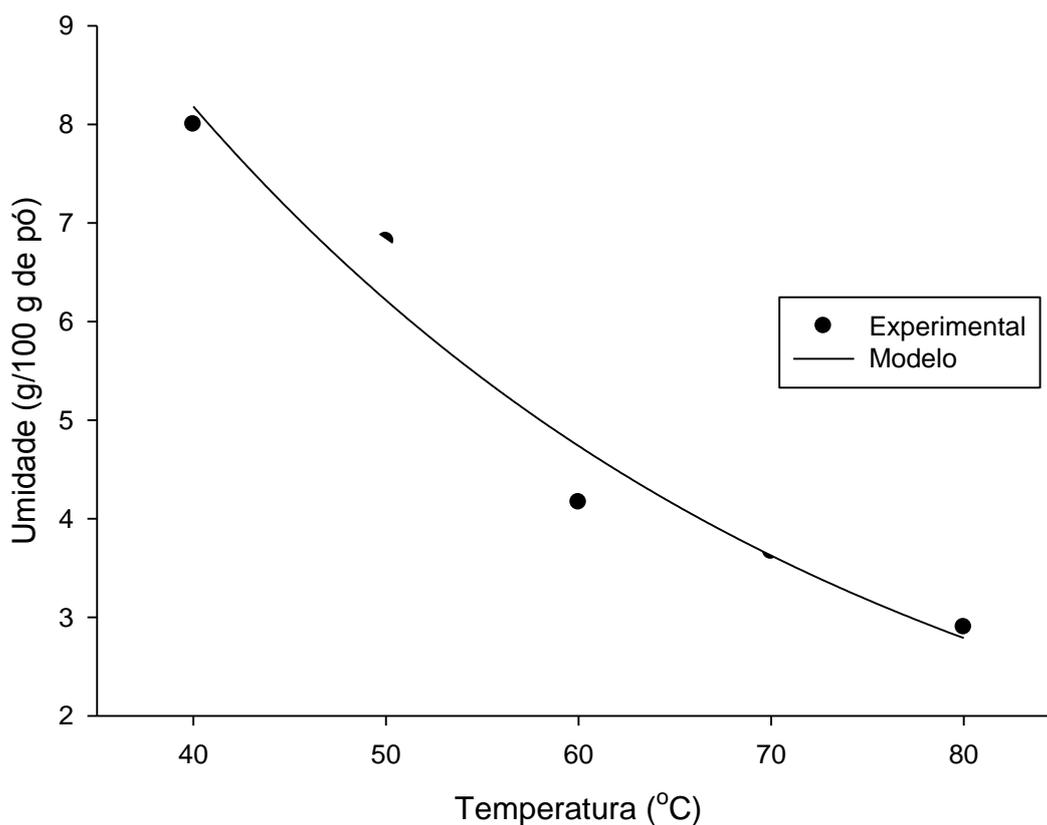


Figura 10 – Variação da umidade do soro em pó obtido pelo processo de secagem em leito de espuma em função da temperatura do ar de secagem.

5.6. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE O TEOR DE PROTEÍNAS DO SORO EM PÓ

A análise de variância para os onze tratamentos testados (5 de leito de espuma, 5 de spray dryer e 1 de liofilização) apresentou um valor de F significativo ($p < 0,05$), indicando que há pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos que é significativo. A Tabela 13 mostra o resultado da análise de variância para o teor de proteínas do soro em pó.

Tabela 13 – Análise de Variância para a variável teor de proteína do soro em pó

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	P
Tratamento	10	51,075	5,108	6,207*	0,000273
Resíduo	20	67,532	0,823		
Total	30	60,9748			

*: Significativo ($p < 0,05$)

Uma vez que a análise de variância foi significativa, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey. A Tabela 14 mostra as médias dos 11 tratamentos com o resultado do teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 14 – Médias do teor de proteína do soro em pó para os tratamentos testados.

Tratamento	Proteína (%)
Spray Dryer 55°C	13,340abc
Spray Dryer 60°C	13,216abc
Spray Dryer 65°C	13,999ab
Spray Dryer 70°C	14,163 ^a
Spray Dryer 75°C	14,205 ^a
Liofilização	13,916ab
Leito de espuma 40°C	11,364bc
Leito de espuma 50°C	11,199c
Leito de espuma 60°C	11,611abc
Leito de espuma 70°C	10,870c
Leito de espuma 80°C	11,858abc

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey.

Nota-se, pela Tabela 14, que a temperatura não influenciou no teor de proteína do soro em pó para o processo de secagem em spray dryer e para o processo de secagem em leito de espuma. Além disso, pode-se concluir que o teor de proteína do soro em pó liofilizado não difere dos pós provenientes dos processos de secagem em spray dryer e do processo de secagem em leito de espuma a 40°C, 60°C e 80°C.

5.7. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE OS PARÂMETROS DE COR DO SORO EM PÓ

A análise de variância para os onze tratamentos testados (5 de leito de espuma, 5 de spray dryer e 1 de liofilização) apresentou um valor de F significativo ($p < 0,05$) para todos os parâmetros de cor, indicando que há pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos que é significativo. A

Tabela 15 mostra o resultado da análise de variância para os parâmetros de cor do soro em pó.

Tabela 15 – Análise de Variância para os parâmetros de cor do soro em pó

Parâmetro de cor	F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	P
L	Tratamento	10	195	19,5	4,65*	0,001692
	Resíduo	20	83,8	4,2		
A	Tratamento	10	27,7095	2,771	8,159*	0,00004
	Resíduo	20	6,792	0,34		
B	Tratamento	10	536,957	53,696	5,473*	0,000622
	Resíduo	20	196,22	9,811		
C	Tratamento	10	532,741	53,274	5,4754*	0,00062
	Resíduo	20	194,594	9,73		
H	Tratamento	10	385,0	38,5	9,01*	0,000019
	Resíduo	20	85,5	4,3		

*: Significativo ($p < 0,05$)

Uma vez que a análise de variância foi significativa, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey. A Tabela 16 mostra as médias dos 11 tratamentos com o resultado do teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 16 – Médias dos parâmetros de cor do soro em pó para os tratamentos testados

Tratamento	L*	a*	b*	c*	h ^o
S. D. 55°C	91,34abc	-0,87bcdef	18,37abcd	18,4abcd	93,42abc
S. D. 60°C	94,34ab	-1,21def	12,40bcd	12,46bcd	95,69ab
S. D. 65°C	92,67abc	-1,17cdef	16,52abcd	16,57abcd	94,23abc
S. D. 70°C	95,12b	-1,32f	10,64d	10,72d	97,11a
S. D. 75°C	94,17ab	-1,23ef	11,90cd	11,97cd	96,09ab
Liofilização	89,84bc	0,59ab	19,23abcd	19,25abcd	88,2cd
L. E. 40°C	88,71ac	-0,05bcde	19,53abcd	19,56abcd	90,92bcd
L. E. 50°C	89,07ac	-0,32bcdef	21,50ab	21,51ab	90,66bcd
L. E. 60°C	89,39ac	0,52abc	22,73a	22,75a	88,69cd

L. E. 70°C	90,07ac	0,44abcd	20,69abc	20,72abc	88,2cd
L. E. 80°C	85,29ac	2,87a	23,53a	23,71a	83,06d

Médias seguidas pela mesma letra, dentro de uma mesma coluna, não diferem entre si ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey. S. D. = Spray dryer; L. E. = Leito de espuma.

Em relação à variável L^* , que varia entre 0 (preto) e 100 (branco), percebe-se que não houve diferenças significativas entre os tratamentos S.D., bem como entre os tratamentos L.E. O produto liofilizado não se difere das amostras secas pelos outros métodos, porém, é possível verificar diferença entre o tratamento S.D. 70°C e os tratamentos L.E., em todas as temperaturas testadas, sendo que o primeiro apresentou um pó mais claro.

Sobre a tonalidade a^* (verde-vermelha), os valores negativos correspondem ao verde e valores positivos correspondem ao vermelho. Os resultados demonstram que as amostras provenientes da secagem por S.D. não diferem entre si, mas as mesmas, exceto a S.D. 55°C, se diferem da amostra liofilizada, que apresentou uma tonalidade vermelha mais forte que as demais. Também pode-se pontuar que houve diferença entre o tratamento L.E. 80°C e os tratamentos L.E. nas temperaturas de 40 e 50°C, bem como entre todos os tratamentos S.D., que tendem à tonalidade verde.

As amostras L.E. 60 e 80°C se diferem das amostras S.D. desidratadas nas temperaturas de 60, 70 e 75°C, em relação à variável b^* , onde valores negativos correspondem ao azul e valores positivos correspondem ao amarelo. Apesar de todos os valores serem positivos, as amostras provenientes da secagem por leito de espuma apresentaram tonalidade amarela mais forte. Além disso, o tratamento S.D.70°C se diferiu dos tratamentos L.E.70°C e L.E.50°C, o qual também se diferiu do S.D.75°C.

O resultado anterior se repete em relação à coordenada c^* , que corresponde ao grau de pureza de uma cor em relação à mistura com a cor cinza. Os produtos desidratados por leito de espuma apresentaram, de forma geral, valores mais altos para esta variável.

O ângulo de matiz (h°) indica a cor observável e é definido como iniciando no eixo $+a^*$, em graus, em que 0° é $+a^*$ (vermelho), 90° é $+b^*$ (amarelo), 180° é $-a^*$ (verde), e 270° é $-b^*$ (azul). De acordo com a tabela 16, verifica-se que todos os tratamentos geraram pós com a tonalidade próxima do

amarelo (90°). O produto liofilizado não se diferenciou em relação à tonalidade das amostras desidratadas por leite de espuma e nem das amostras desidratadas por spray dryer, nas temperaturas de 55 e 65°C, que por sua vez, também não se diferenciaram dos tratamentos L.E., exceto o L.E.80°C. Não houve diferença entre as amostras desidratadas pelo mesmo método e, além disso, o tratamento S.D.60°C se igualou aos tratamentos L.E.40°C e L.E.50°C, em relação a este atributo.

As Figuras 11, 12 e 13 mostram os produtos após o processo de secagem pelos processos de spray dryer, liofilização e leite de espuma, respectivamente.

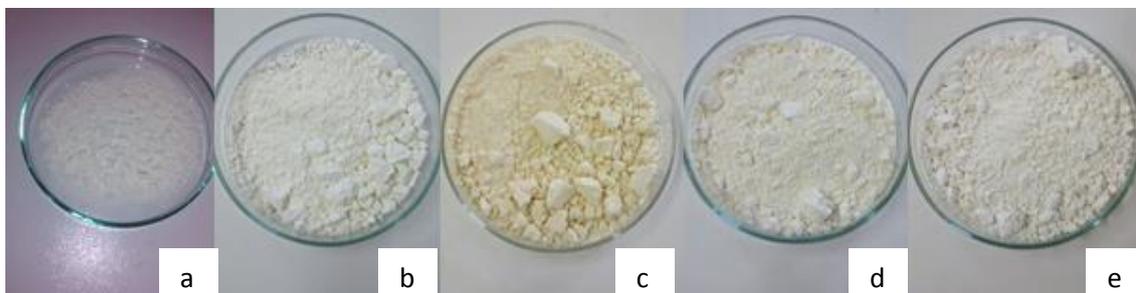


Figura 11 - Soro em pó obtido pelo processo de spray dryer nas temperaturas de 55°C (a); 60°C (b); 65°C (c); 70°C (d); 75°C (e).



Figura 12 - Soro em pó obtido pelo processo de liofilização.



Figura 13 - Soro em pó obtido pelo processo de leite de espuma nas temperaturas de 40°C (a); 50°C (b); 60°C (c); 70°C (d); e 80°C (e).

5.8. AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCESSO DE SECAGEM SOBRE A SOLUBILIDADE DO SORO EM PÓ

A análise de variância para os onze tratamentos testados (5 de leite de espuma, 5 de spray dryer e 1 de liofilização) apresentou um valor de F significativo ($p < 0,05$), indicando que há pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos que é significativo. A Tabela 17 mostra o resultado da análise de variância para a solubilidade do soro em pó.

Tabela 17 – Análise de Variância para a variável solubilidade do soro em pó

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	P
Tratamento	10	3871,77	387,18	10,2082*	0,000007
Resíduo	20	758,56	37,93		
Total	30	60,9748			

*: Significativo ($p < 0,05$)

Uma vez que a análise de variância foi significativa, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey. A Tabela 18 mostra as médias dos 11 tratamentos com o resultado do teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 18 – Médias do teor de índice de retenção do soro em pó para os tratamentos testados.

Tratamento	IR (%)
Spray Dryer 55°C	8,29c
Spray Dryer 60°C	5,87c
Spray Dryer 65°C	7,2c
Spray Dryer 70°C	4,14c
Spray Dryer 75°C	4,29c
Liofilização	3,86c
Leito de espuma 40°C	36,64a
Leito de espuma 50°C	31,84ab
Leito de espuma 60°C	17,42bc
Leito de espuma 70°C	16,62c
Leito de espuma 80°C	16,81c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey.

De acordo com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância, as amostras secas por leite de espuma nas temperaturas de 40°C e 50°C não apresentaram diferença significativa entre si em relação ao IR, porém, apresentaram diferença entre as demais amostras, exceto aquela seca por leite de espuma na temperatura de 60°C, que também não apresentou diferença entre a amostra seca em 50°C pelo mesmo método. Todas as demais amostras não apresentaram diferença significativa entre si.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados foi possível concluir que dentre os modelos testados, o Modelo de Page é o que melhor representa as cinéticas de secagem em leite de espuma e por liofilização do soro de leite, pois apresentou o maior valor do coeficiente de determinação ajustado (acima de 0,98 e 0,99, respectivamente) e o menor valor do erro padrão da regressão em todas as temperaturas testadas (abaixo de 0,04 e próximo de 0,01, respectivamente). Os gráficos que descrevem as curvas de secagem do soro confirmam que aquelas ajustadas pelo Modelo de Page foram as que mais se aproximam dos resultados experimentais.

A partir dos parâmetros ajustados para o Modelo de Page, observou-se que à medida que se aumenta a temperatura do ar de secagem, o tempo necessário para a secagem diminui e os valores do coeficiente de difusão efetiva aumentam, mostrando que a temperatura tem a capacidade de influenciar na velocidade de secagem. Porém, a redução média no tempo de secagem entre os intervalos de temperatura, diminui com o aumento da mesma, sendo 1,154h para cada 1°C de aumento na temperatura no intervalo de 40 a 50°C, chegando a atingir o valor médio de 0,0146h para cada 1°C de aumento na temperatura no intervalo de 70 a 80°C.

O modelo matemático generalizado ajustado apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,9888, mostrando que o mesmo foi adequado para estimar a razão de umidade do soro em função da temperatura do ar de secagem e do tempo de secagem para o sistema de secagem em leite de espuma.

Ainda foi possível concluir que a temperatura não influenciou no teor de umidade do soro em pó para o processo de secagem em spray dryer, nem quando se compara o soro em pó liofilizado com o método por spray por leite de espuma a 60°C, 70°C e 80°C. Entretanto, pode-se observar que quanto maior a temperatura, menor a umidade do soro em pó no caso da secagem em leite de espuma. Esse fato era esperado, visto que a secagem em maiores temperaturas contribui para reduzir o teor de umidade de equilíbrio entre o alimento e o ar.

Em relação à solubilidade do soro em pó dos diferentes tratamentos, foi possível concluir, de forma geral, que o pó liofilizado apresentou melhor solubilidade e aqueles desidratados por leite de espuma, menor solubilidade. Além disso, as temperaturas mais elevadas nos métodos por leite de espuma e spray dryer tenderam a maior solubilidade, ainda que nem sempre as diferenças fossem significativas de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A análise de variância para os onze tratamentos testados apresentou um valor de F significativo ($p < 0,05$), indicando que há pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos que é significativo tanto para os atributos de cor, quanto de proteína. Contudo, não possível perceber influência da temperatura sobre estes parâmetros, sendo que a variação dos mesmos não seguiu um comportamento estritamente crescente ou estritamente decrescente.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, v.2, p.72-83. 2009.

AMENDOLA, M.; QUEIROZ, M. R. de. Mathematical methodologies for calculating the mass diffusion coefficient of bananas during drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.623-627, 2007.

ANDRADE, C.T.; NASSER, R.O. Estudo reológico da gelificação induzida pelo calor de proteínas do soro do leite e dos géis resultantes sob condições variadas de pH. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.25, n.2, p. 315-321, abr./jun. 2005.

ANTUNES, A.J. **Funcionalidade das proteínas de soro de leite bovino**. Barueri –SP. Manole, 2003.

ARAÚJO, J.M.A. **Química de alimentos: teoria e prática**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2006.

BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.449-458, 2004.

BEER, T. R. M.; VERCRUYSSSE, P.; BURGGRAEVE, A.; QUINTEN, T.; OUYANG, J.; ZHANG, X.; VERVAET, C.; REMON, J. P.; BAEYENS, W. R. G. In-Line and Real-Time Process Monitoring of a Freeze Drying Process Using Raman and NIR Spectroscopy as Complementary Process Analytical Technology (PAT) Tools. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 98, n.9, 2009.

BETTIOL, V. R. **Estudo da Influência do ClO₂ sobre membranas de poliamida para osmose inversa**. Porto Alegre: UFRS, 2004. 154p. Dissertação de mestrado.

BRAILE, P. M. Tratamento de despejos de laticínios. In: **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. CETESB. São Paulo: FESB, 1971.

BRASIL, Ministério Da Agricultura, Do Abastecimento E Da Reforma Agrária. Portaria nº 146, de 7 de março de 1996. Aprova os Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade dos Produtos Lácteos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 mar. 1996.

CATELAM, K. T.; TRINDADE, C. F. S.; ROMERO, J. T. water adsorption isotherms and isosteric sorption heat of spray-dried and freeze-dried dehydrated passion fruit pulp with additives and skimmed milk. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1196-1203, 2011.

CHEN, X.D.; MUJUMDAR, A.S. **Drying technologies in food processing**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2008.

CORREIA, L. F. M.; MAUBOUIS, J. L.; CARVALHO, A. F. Aplicações de membranas na indústria de laticínios. **Revista Indústria de Laticínios**, v.15, p. 74-78, 2011.

COSTA, L.M., RESENDE, O., SOUSA, K.A., GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.15, n.10, p.1089-1096. 2011.

DESCONSI, A. C.; FILHO, H. J. I.; SALAZAR, R. F. S. Avaliação físico-química e microbiológica do soro de leite concentrado obtido por osmose inversa. **Revista Ambiente e Água**. Taubaté, v.9, n.2, Apr./Jun., 2014.

ESTEVES, B. N. **Influência do processo de secagem por pulverização mecânica (spray-dryer) no tamanho da partícula e densidade aparente do café solúvel**. São Paulo-SP: USP, 2006. 86p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia – Área de concentração em Engenharia Química).

FAO/WHO Codex Alimentarius, Codex Stan 289-1995.

FELLOWS, P. **Food Processing Technology**. Principles and Practice, 2 Ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

FORNIARI, R.C.G. **Aproveitamento de soro de queijo para a produção de goma xantana**. URI, Erechim, RS, 2006. 80p. Dissertação de mestrado

FOX, P.F; McSWEENEY, P.L.H. **Dairy Chemistry and Biochemistry**. 1 Ed. London: Blackie Academic & Professional, 1998.

FRANCIS, F. J. **Encyclopedia of Food Science and Technology**. 2 Ed. New York: John Wiley & Sons. v. 1, 2000.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade de mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. Viçosa: UFV, 2008. 186p. Tese Doutorado.

GONELI, A. L.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.27, p.135-140. 2007.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação com membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

IMADURA, J.K.N.; MADRONA, G.S. Reaproveitamento de soro de queijo na fabricação de pão de queijo. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 1, n.3, p. 381-390, set./dez. 2008.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 3. ed. São Paulo: IMESP, 1985.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer during characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.98-108, 2007.

KAYACIER, A.; SINGH, R. K. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v.37, p.275-281, 2004.

MADRONA, G.S. et al. Estudo do efeito da adição de soro de queijo na qualidade sensorial do doce de leite pastoso. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.29, n.4, p. 826-833, out./dez. 2009.

MARQUES, L. G. **Liofilização de frutas tropicais**. São Carlos: UFSCar, 2008. 255 f. Tese de doutorado.

MASTERS, K. **Spray Drying Handbook**, 4 ed. London: George Godwin, 1985.

MENDES, P. N.; FURTADO, M. A. M.; PERRONE, I. T. Osmose reversa na produção de leite condensado: uma possibilidade tecnológica. **Revista do Instituto de Laticínios “Cândido Tostes”**. Juiz de Fora, v.67, n.388, p.68-76, Set./Out., 2012.

MENEZES, A. R. V.; SILVA JÚNIOR, A.; CRUZ, H. L. L.; ARAUJO, D. R. A.; Sampaio, D. D. S. Estudo comparativo do pó da acerola verde (*Malpighia emarginata* D.C) obtido em estufa por circulação de ar e por liofilização. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.11, n.1, p.1-8, 2009.

MENEZES, E. M. S.; TORRES, A. T.; SRUR, A. U. S. Valor nutricional da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart) liofilizada. **Acta Amazônica**. v. 38, n. 2, p. 311-316, 2008.

MONZELLE, G. **Secagem de caldo de cana em leito de espuma e avaliação sensorial do produto**. Itapetinga-BA: UESB, 2009. 84p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Alimentos).

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 3 Ed. New York: Taylor & Francis Group, 2006.

MULVIHILL, D. M. Functional Milk Protein Products. In: ANDREWS, A. T.; VARLEY, J. **Biochemistry of Milk Products**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.

OETJEN, G.; HASELEY, P. **Freeze-Drying**. 2 Ed. Weinheim: WILEY-VCH, 2004.

OLIVEIRA, E. N. A.; et al. Obtenção de ubaia desidratada pelo processo de liofilização. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**. v. 04, n. 2, p. 235-242, 2010.

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

ONWULATA.C; HUTH.P. **Whey processing, functionality and health benefits**. John Wiley & Sons, Inc., 2008.

PAGNO, C.H. et al. Obtenção de concentrados protéicos de soro de leite e caracterização de suas propriedades funcionais tecnológicas. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara. v.20, n.2, p. 231-239, abr./jun. 2009.

PEREIRA, D. A. **Extração aquosa de própolis e secagem em leito de espuma para uso em alimentos**. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2008.

PERRONE, I. T.; et al. Influência das condições de operação em spray dryer piloto sobre a umidade e a atividade de água do leite em pó integral. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 68, nº. 393, p. 5-9, jul/ago., 2013.

PINTO, E. G. **Caracterização da espuma de jenipapo (*Genipa americana L.*) com diferentes aditivos visando à secagem em leito de espuma**. Itapetinga-BA: UESB, 2009, 65p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Alimentos).

RAHARITSIFA, N.; RATTI, C. Foam-mat freeze-drying of apple juice part 1: experimental data and ann simulations. **Journal of Food Process Engineering**, v.33, p. 268–283, 2010.

REIS, R. C.; BARBOSA¹, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.347–353, 2011.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; JAREN, C.; MOURE, A. J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.5, p.51-58, 2007.

REY, L.; MAY, J.C. **Freeze Drying/Lyophilization of Pharmaceutical and Biological Products**. 3 Ed. London: Informa Healthcare, 2010.

RICHARDS, N. S. P. S. Soro lácteo: Perspectivas Industriais e Proteção ao meio ambiente. **Revista Food Ingredients**, São Paulo, n. 17, p. 20-27, 2002.

ROCHA, C.T. **Obtenção de suco misto de açaí, morango e acerola em pó por diferentes processos de secagem**. Alegre: UFES, 2013. 69p. Dissertação de mestrado.

RONCHETI, E.F.S. **Estudo Do Processo de Secagem em Leito de Espuma de Cenoura, Tomate, Beterraba e Morango**. Alegre: UFES, 2014. 52p. Dissertação de mestrado.

SÁ, I. S. et al. Concentração de suco de abacaxi através dos processos com membranas. **Brazilian Journal of Food Technology**. Campinas, v.6, n.1, p.53-62, jan./jun., 2003.

SACILIK, K. Effect of drying methods on thinlayer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, v.79, p.23-30, 2007.

SCHUCK, P. Understanding the factors affecting spray-dried dairy powder properties and behavior. In: CORREDIG, M. **Dairy-derived ingredients**. 1 ed. Boca Raton: CRC, 2009. Cap. 2, p. 24-50.

SCOT CONSULTORIA. Aumenta o consumo de queijo no Brasil. **Carta Leite**, Bebedouro, SP, Ano 6, n. 105, setembro 2010. Disponível em: http://www.bovinos.ufpr.br/100921_Aumenta_o_consumo_de_queijo_no_brasil_def.pdf. Acesso em: 21 de maio de 2013.

SCOTT, K. **Handbook of Industrial Membranes**. Oxford: Elsevier, 1995.

SGARBIERI, V.C. **Proteínas em alimentos protéicos**: propriedades, degradações, modificações. São Paulo: Editora-Livraria Varela, 1996.

SGARBIERI, V.C. Revisão: Propriedades Estruturais e Físico-Químicas das Proteínas do Leite. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.8, n.1, p. 43-56, jan./mar., 2005

SHARMA, G. P.; PRASAD, S. Effective moisture diffusivity of garlic cloves under going microwave-convective drying. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.609-617, 2004.

SILVA, K.; BOLINI, H.M.A.; ANTUNES, A.J. Soro de leite bovino em sorvete. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 15, n. 2, p. 187-196, 2004.

SMITH, J.S.; HUI, Y.H. **Food processing**: principles and applications. Iowa: Blackwell Publishing, 2004.

SOARES et al. Desidratação da polpa de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) pelo processo "foam-mat". **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas. v.21, n. 2, p.164-170, maio/ago. 2001.

TERRA, N.N. et al. Emprego de soro de leite líquido na elaboração de mortadela. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.3, p.885-890, mai./jun., 2009.

VALUGA, E. et al. Aplicação do soro de leite em pó na panificação. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara. v.17, n.4, p.393-400, out./dez. 2006.

VIEIRA, A. P.; NICOLETI, J. F.; TELIS, V. R. N. Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 50-58, 2012.

WALSTRA, P.; WOUTERS, J.T.M.; GEURTS, T.J. **Food Science and Technology**. 2 ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.

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