

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TALITA SZLAPAK FRANCO

**DESIDRATAÇÃO DE SUCO DE YACON PELO
MÉTODO DE CAMADA DE ESPUMA**

CURITIBA

2015

TALITA SZLAPAK FRANCO

**DESIDRATAÇÃO DE SUCO DE YACON PELO
MÉTODO DE CAMADA DE ESPUMA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Dr^a Maria Lúcia Masson

Co-orientadora: Dr^a Luciana de Souza Neves
Ellendersen

CURITIBA

2015

F825d

Franco, Talita Szlapak

Desidratação de suco de yacon pelo método de camada de espuma/
Talita Szlapak Franco. – Curitiba, 2015.

190 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa
de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, 2015.

Orientador: Maria Lúcia Masson – Co-orientador: Luciana de souza
Neves Ellendensen.

Bibliografia: p. 168-172.

1. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) - Desidratação. 2. Alimentos -
Conservação. 3. Microscopia eletrônica de varredura. I. Universidade Federal
do Paraná. II. Masson, Maria Lúcia. III. Ellendensen, Luciana de souza Neves .
IV. Título.

CDD: 641.351

TALITA SZLAPAK FRANCO

**DESIDRATAÇÃO DE SUCO DE YACON PELO MÉTODO DE
CAMADA DE ESPUMA**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



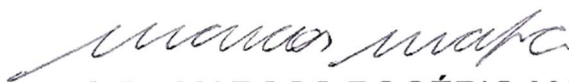
Orientadora: Prof.^a Dr.^a MARIA LUCIA MASSON
Setor de Tecnologia, UFPR



Dr. DANIEL GRANATO
Departamento de Engenharia de Alimentos, PNPD-UEPG



Prof. Dr. LUIZ GUSTAVO LACERDA
Universidade Positivo



Prof. Dr. MARCOS ROGÉRIO MAFRA
Setor de Tecnologia, UFPR



Prof. Dr. MARCELO KAMINSKI LENZI
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, 09 de abril de 2015.

Aos meus amados pais José Ari Szlapak (*sempre presente*) e
Marizete Canavessi Szlapak, que sempre me apontaram o estudo como
o caminho da conquista e se dedicaram plenamente
para que eu alçasse voos maiores.
Ao meu irmão, Gustavo Szlapak por ser parte da minha essência.
E ao meu marido Guilherme de Oliveira Franco, por ser
meu companheiro de sonhos e vitórias.
Por vocês os meus sonhos, minhas realizações e todo meu amor!

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos derramadas, pela luz que me guia e protege e por me dar força nos momentos de fraqueza e calmaria durante as atribuições.

Ao meu pai por ser meu anjo protetor e por me acompanhar em todos meus momentos. Pelos exemplos dados e que nunca foram esquecidos.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pelo exemplo de vida e por sempre me apoiar nas decisões mais difíceis e por estar presente quando precisei, seja com uma palavra de conforto, com um colo ou mesmo em orações.

Ao meu irmão, por todo o amor, carinho e atenção, por toda a força e orações. Por toda a sua alegria que contagia quem está por perto e que ajudaram a aliviar a tensão nos momentos oportunos.

Ao meu esposo, minha alma gêmea, pelo amor, carinho, companheirismo, paciência e atenção. Por todos os momentos que partilhamos, por me passar calma nos momentos de dificuldade, me proporcionar confiança durante as incertezas e por seu meu parceiro nesta jornada.

Aos meus amigos e colegas, pela parceria e convivência e por estarem presentes e participarem de tantos momentos.

À Professora Maria Lucia, por ser minha guia nesta etapa tão importante da minha formação, pela orientação, ensinamentos, paciência e atenção.

À Luciana Neves Ellendersen, minha co-orientadora, por me inserir em seu projeto de Pós-Doutorado, pelos conselhos e por toda paciência, atenção e ajuda prestadas.

À Universidade Federal do Paraná, em especial a todos os professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos.

À Capes pela concessão da bolsa de estudos e pelo suporte financeiro.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço por toda a experiência e conhecimento adquiridos no percorrer desta caminhada, que contribuíram plenamente na formação da profissional que está se formando.

*“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar,
divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais
bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua
misterioso diante dos meus olhos”*

(Isaac Newton)

RESUMO

Devido aos benefícios à saúde apresentados pelo consumo de yacon e por sua elevada perecibilidade, aplicou-se a desidratação por camada de espuma visando o aumento da sua vida útil. Espumas de suco e suco concentrado de yacon foram formadas a partir da adição de ovoalbumina e de um agente espumante. Um planejamento fatorial 2^2 com repetições no ponto central foi elaborado para verificar a influência da concentração do agente e do tempo de incorporação de ar sobre a densidade, “*overrun*”, volume da fração de ar, estabilidade, valor de tensão limite, número e diâmetro das bolhas de ar. As espumas formadas com associação entre a maior concentração de agente espumante e maior tempo de batimento foram as que mostraram as características adequadas para o processo de desidratação por camada de espuma, sendo desta forma, as espumas formadas por ovoalbumina (20%) e emulsificante (10%) e 20 minutos de batimento. A desidratação foi efetuada em estufa convectiva com variações na espessura da camada (0,5, 1,0 e 1,5 cm) e na temperatura do ar de secagem (50, 60 e 70 °C). A partir da elaboração das curvas de secagem observou-se que o processo ocorreu em período decrescente e que maiores temperaturas e menores espessuras resultaram em diminuição do tempo e aumento do coeficiente de difusão efetivo. A aplicação de modelos de cinética de secagem estabeleceu que o modelo logarítmico foi o que melhor representou a desidratação das espumas de suco e suco concentrado de yacon por camada de espuma. Espumas formadas por emulsificante não permitiram a formação de pó, desta forma, as formadas com ovoalbumina foram analisadas frente à características físico-químicas, propriedades físicas e morfológicas. A combinação entre a maior temperatura de secagem (70 °C) e a menor espessura da camada de espuma (0,5 cm) levou menor tempo para o produto atingir sua umidade de equilíbrio e gerou produtos com maior estabilidade frente às modificações microbiológicas e enzimáticas (baixa umidade e atividade de água), sem o comprometimento de sua composição e características físicas, que se mostraram adequadas para o consumo puro ou como ingrediente em formulações alimentares.

Palavras-chave: desidratação por camada de espuma, yacon, valor de tensão limite, cinética de secagem, modelos de secagem, propriedades físicas, microscopia eletrônica de varredura.

ABSTRACT

Due to the health benefits provided by the consumption of yacon and its high perishability, foam layer drying was applied in order to increase the root's shelf life. Foams of yacon juice and concentrate juice were formed by the addition of egg albumin and a foaming agent. A 2^2 factorial design with repetitions at the central point was used to study the influence of the foaming agent concentration and whipping time on the following properties of the foams: density, overrun, air fraction volume, stability, voltage limit value, number and diameter of the air bubbles. The foams formed with a higher concentration of foaming agent and increased whipping time presented the most adequate characteristics for the foam layer drying, hence the best conditions of foaming were selected as foams formed by egg albumin (20%) and emulsifier (10%) whipped for 20 minutes. The dehydration process was performed in a convection oven varying the conditions of foam layer thickness (0.5, 1.0 and 1.5 cm) and drying air temperature (50, 60 and 70°C). The drying curves indicated that the process occurred in a decreasing period and that higher temperatures and lower thicknesses resulted in decreased time and raised the effective diffusion coefficient. The application of drying kinetics models established that the logarithmic model best represented the process. Foams formed by the addition of emulsifier did not allow the formation of powder, hence those ones formed with egg albumin were analyzed with respect to the physico-chemical and morphological properties. The combination between the highest drying temperature (70°C) and the smallest thickness of the foam layer (0.5 cm) led to the lowest time for the product to reach its equilibrium moisture content and also generated products with higher microbiological and enzymatic stability (related to low moisture content and water activity) without compromising its composition and physical characteristics. The powdered yacon juice showed to be adequate for pure consumption or to be applied as an ingredient in food formulations.

Key words: foam mat drying, yacon, yield stress, drying kinetics, drying models, physical properties, electron microscopy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1- PARTE AÉREA (A) E PARTE SUBTERRÂNEA DA PLANTA DO YACON (B)	26
FIGURA 2 – APARÊNCIA EXTERNA E INTERNA DE RAÍZES DE YACON.....	27
FIGURA 3 – PRODUTOS DERIVADOS DE YACON COMERCIALIZADOS NO BRASIL, PERU E JAPÃO.....	28
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE A ATIVIDADE DE ÁGUA E REAÇÕES DETERIORATIVAS EM ALIMENTOS.....	33
FIGURA 5 – TAXA E EFICIÊNCIA DE SECAGEM VERSUS CONTEÚDO DE UMIDADE PARA SUCO DE MAÇÃ LÍQUIDO E EM FORMA DE ESPUMA DESIDRATADOS POR SECAGEM CONVECTIVA A 55°C E CAMADA COM ESPESSURA DE 19 mm	36
FIGURA 6 – ESTRUTURA DE UMA ESPUMA.....	38
FIGURA 7 – GEOMETRIA DOS ROTORES TIPO “VANE”: VISTA LATERAL (A) E VISTA SUPERIOR DEMONSTRANDO O DESLOCAMENTO DA AMOSTRA PELO MOVIMENTO DOS ROTORES (B).....	39
FIGURA 8 – ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E CALOR DURANTE SECAGEM À TAXA CONSTANTE.....	40
FIGURA 9 – CURVA TÍPICA DE TAXA DE SECAGEM SOB CONDIÇÕES CONSTANTES.....	42
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA GERAL DE EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	44
FIGURA 11- ESPUMAS DE SUCO DE YACON COM EMULSIFICANTE DISPOSTAS NOS LEITOS DE METAL COM ESPESSURAS DE 1,5 CM (A), 1,0 CM (B) E 0,5 CM (C)	51
FIGURA 12- APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO NA SECAGEM CONVECTIVA: SECADOR DE BANDEJAS (A); ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO MESMO (B)	53
FIGURA 13 - GRÁFICOS DE CONTORNO DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA ESPUMAS FORMADAS COM EMULSIFICANTE E SUCO DE YACON - EFEITO SOBRE DENSIDADE (A), <i>OVERRUN</i> (B) E VOLUME DA FRAÇÃO DE AR (C)	70
FIGURA 14 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE ESPUMAS DE OVOALBUMINA (A) E EMULSIFICANTE (B), OBTIDAS A PARTIR DE SUCO DE YACON (SY) E SUCO DE	

YACON CONCENTRADO (SYC) * Letras diferentes indicam diferença significativa (p < 0,05) pelo teste de Tukey. Os dados são a média de triplicatas e as barras de erro demonstram os desvios padrões.....	74
FIGURA 15 – PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS VALOR DE TENSÃO LIMITE, NÚMERO E DIÂMETRO DAS BOLHAS DE ESPUMAS DE SUCO DE YACON (A) E SUCO CONCENTRADO (B) SOBRE O PLANO FATORIAL (CP1 X CP2)	77
FIGURA 16 - PROJEÇÃO DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON (A) E SUCO CONCENTRADO DE YACON (B), FORMADAS POR OVOALBUMINA E EMULSIFICANTE SOBRE O PLANO FATORIAL (CP1 X CP2)	79
FIGURA 17 – FOTOMICROGRAFIA DAS BOLHAS DE AR, PARA O TRATAMENTO SY-OVO-10-5, NOS TEMPOS DE REPOUSO 0 (A), 10 (B) E 20 (C) MINUTOS	82
FIGURA 18 – FOTOMICROGRAFIA DE ESPUMAS DOS TRATAMENTOS SYC-OVO-10-5 (A), SYC-OVO-10-20 (B), SYC-OVO-20-5 (C) E SYC-OVO-20-20 (D)....	82
FIGURA 19 – CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO DE YACON ELABORADAS COM OVOALBUMINA (A) E EMULSIFICANTE (B)	85
FIGURA 20 - CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON ELABORADAS COM OVOALBUMINA (A) E EMULSIFICANTE (B)	86
FIGURA 21 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO LOGARÍTMICO EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE UMIDADE DURANTE A SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA	92
FIGURA 22 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO LOGARÍTMICO EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE UMIDADE DURANTE A SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA.....	93
FIGURA 23 – VALORES OBSERVADOS VERSUS VALORES PREDITOS PELO MODELO LOGARÍTMICO PARA AS CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA	94
FIGURA 24 - VALORES OBSERVADOS VERSUS VALORES PREDITOS PELO MODELO LOGARÍTMICO PARA AS CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA	95
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DO LOGARITMO DA RAZÃO DE UMIDADE PELO TEMPO DE SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON OBTIDAS COM	

EMULSIFICANTE (A) E OVOALBUMINA (B) SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM.....	97
FIGURA 26 - REPRESENTAÇÃO DO LOGARITMO DA RAZÃO DE UMIDADE PELO TEMPO DE SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDAS COM EMULSIFICANTE (A) E OVOALBUMINA (B) SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM	98
FIGURA 27- PÓS DE SUCO DE YACON (A) E DE SUCO DE YACON CONCENTRADO (B), OBTIDOS PELA SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO COM OVOALBUMINA A UMA ESPESSURA DE 1,0 CM E TEMPERATURA DE 60°C ..	101
FIGURA 28 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO DE YACON – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ATIVIDADE DE ÁGUA (A) E UMIDADE (B).....	108
FIGURA 29 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO DE YACON CONCENTRADO – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ATIVIDADE DE ÁGUA (A) E UMIDADE (B).....	109
FIGURA 30 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO DE YACON – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (A) E PERCENTUAL DE HIGROSCOPICIDADE (B)	117
FIGURA 31 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (A) E PERCENTUAL DE HIGROSCOPICIDADE (B)	118
FIGURA 32 - MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE PARTÍCULAS DE SUCO (A) E SUCO CONCENTRADO DE YACON (B) SUBMETIDAS À DESIDRATAÇÃO POR CAMADA DE ESPUMA (ESPESSURA DE 1,0 CM E TEMPERATURA DE 60°C) – RESOLUÇÃO DE 250X	125
FIGURA 33 MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE PARTÍCULAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON, A UMA RESOLUÇÃO DE 1 300 X. TRATAMENTOS (ESPESSURA DA CAMADA DE ESPUMA E TEMPERATURA DE DESIDRATAÇÃO: (A) SUCO DE YACON – 0,5 CM – 50°C; (B) SUCO DE YACON – 1,5 CM – 70°C; (C) SUCO DE YACON	

CONCENTRADO – 0,5 CM – 50 °C; (D) SUCO DE YACON CONCENTRADO – 1,5
CM – 70°C.....126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO YACON (BASE ÚMIDA)	29
TABELA 2 – MATRIZ DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2^2 , COM REPETIÇÃO NO PONTO CENTRAL.....	47
TABELA 3 – MATRIZ DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2^2 , COM QUATRO REPETIÇÕES NO PONTO CENTRAL	52
TABELA 4 – MODELOS DE SECAGEM EM CAMADA DELGADA E SUAS EQUAÇÕES.....	55
TABELA 5 – DENSIDADE, “ <i>OVERRUN</i> ” E VOLUME DA FRAÇÃO DE AR PARA OS DIFERENTES TRATAMENTOS DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON E DE SUCO CONCENTRADO DE YACON.....	65
TABELA 6 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA AS RESPOSTAS DENSIDADE, “ <i>OVERRUN</i> ” E VOLUME DA FRAÇÃO DE AR, DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON E SUCO CONCENTRADO DE YACON COM OVOALBUMINA OU EMULSIFICANTE COMO AGENTE ESPUMANTES	66
TABELA 7 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE (120 MINUTOS) DE ESPUMAS ELABORADAS COM SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON A DIFERENTES CONDIÇÕES DE PREPARO	72
TABELA 8 – VALOR DE TENSÃO LIMITE, NÚMERO E DIÂMETRO MÉDIO DAS BOLHAS, NOS TEMPOS DE REPOUSO APÓS FORMAÇÃO.....	80
TABELA 9 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS APLICADOS À DIFERENTES ESPUMAS DE SUCO DE YACON E CONDIÇÕES DE SECAGEM, 88	
TABELA 10 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS APLICADOS À DIFERENTES ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON E CONDIÇÕES DE SECAGEM	90
TABELA 11 – PARÂMETROS DO MODELO LOGARÍTMICO APLICADO AOS DADOS DE DESIDRATAÇÃO DE ESPUMAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM.....	96
TABELA 12 -VALORES DE DIFUSIVIDADE EFETIVA DAS ESPUMAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM	99

TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON E SUAS RESPECTIVAS ESPUMAS.....	102
TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM	104
TABELA 15 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA AS RESPOSTAS ATIVIDADE DE ÁGUA E PERCENTUAL DE UMIDADE DOS PÓS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM	107
TABELA 16 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PÓS DE SUCO E DE SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM	112
TABELA 17 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA AS RESPOSTAS ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E PERCENTUAL DE HIGROSCOPICIDADE DOS PÓS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM.....	114
TABELA 18 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PÓS DE SUCO E DE SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM	121
TABELA 19 – PARÂMETROS DE COR DOS SUCOS DE YACON E SUCO DE YACON CONCENTRADO, SUAS ESPUMAS E SEUS RESPECTIVOS PÓS OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM	123

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- Δm – aumento do peso do pó após alcançado o equilíbrio (g)
- a^* - coordenada *chroma* na faixa do verde ao vermelho
- Aa – atividade de água
- ACP – análise de componentes principais
- ANOVA – análise de variância
- AOAC – *Association of Official Analytical Chemists*
- b^* - coordenada *chroma* na faixa do azul ao amarelo
- BOD – demanda bioquímica de oxigênio
- CIE – *Commission Internationale de l'Éclairage*
- CP1 – componente principal 1
- CP2 – componente principal 2
- d – diâmetro do rotor tipo “*vane*” (m)
- D_{eff} – coeficiente de difusão efetivo ($m^2 \cdot s^{-1}$)
- ε – porosidade intragranular
- FOS – frutooligossacarídeos
- h – comprimento do rotor tipo “*vane*” (m)
- HG –higroscopicidade
- IAA – Índice de absorção de água
- k – constante de secagem (min)
- L – espessura da camada de espuma (m)
- L – espessura da placa plana (m)
- L^* - luminosidade
- m – massa inicial do pó (g)
- $m_{(a)}$ – massa da amostra (g)
- $m_{(pf + amostra)}$ – massa do pesa filtro com a amostra do sobrenadante (g)
- $m_{(pf \text{ vazio})}$ – massa do pesa filtro vazio (g)
- $m_{(pó)}$ – massa do pó diluído (g)
- $m_{(rc)}$ – massa do resíduo da centrifugação (g)
- $m_{(re)}$ – massa do resíduo da evaporação (g)
- M_0 – torque máximo ($N \cdot m^{-1}$)
- m_1 – conteúdo de água livre do pó (base úmida)

MEV – microscopia eletrônica de varredura
MSR- metodologia de superfície de resposta
N – número de observações
n – número de parâmetros do modelo
p-valor – significância do modelo
 R^2 – coeficiente de determinação
 R^2 ajustado – coeficiente de determinação ajustado aos dados experimentais
RDC – resolução da diretoria colegiada
RMF – resíduo mineral fixo
rpm – rotações por minuto
RQMR – raiz do quadrado médio residual
RU – razão de umidade
 RU_{exp} – razão de umidade experimental
 RU_{pre} – razão de umidade predito pelo modelo
SY – suco de yacon
SYC – suco de yacon concentrado
t – tempo de secagem (s)
U – umidade no tempo t (base seca)
 U_0 – umidade inicial (base seca)
 U_e – umidade de equilíbrio (base seca)
V – volume da espuma (ml)
 V_0 – volume inicial da espuma (ml)
 v_s – volume ocupado pelos sólidos solúveis (ml)
 v_t – volume total (ml)
 ρ_{abs} – densidade absoluta ($g \cdot cm^{-3}$)
 ρ_a – densidade aparente ($g \cdot cm^{-3}$)
 ρ_E – densidade da espuma ($g \cdot cm^{-3}$)
 ρ_L – densidade do líquido ($g \cdot cm^{-3}$)
 τ – valor de tensão limite (Pa)
 Φ – volume da fração de ar
 Φ^2 – qui-quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. JUSTIFICATIVA	22
3. OBJETIVOS	23
3.1. OBJETIVO GERAL	23
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
4. DIAGRAMA CONCEITUAL DO TRABALHO	24
5. REVISÃO DE LITERATURA	25
5.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE O YACÓN (<i>SMALLANTHUS SONCHIFOLIUS</i>) .	25
5.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NUTRICIONAL DO YACÓN	28
5.3. POTENCIAL E VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO YACÓN	31
5.4. DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS	33
5.5. DESIDRATAÇÃO EM CAMADA DE ESPUMA – “ <i>FOAM-MAT DRYING</i> ”	35
5.6. CINÉTICA E MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM	40
6. MATERIAIS E MÉTODOS	44
6.1. MATÉRIA-PRIMA	45
6.2. EXTRAÇÃO E ARMAZENAMENTO DO SUCO DE YACÓN.....	45
6.3. PREPARO DAS ESPUMAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACÓN	46
6.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E DE ESTABILIDADE DAS ESPUMAS.....	48
6.4.1. Densidade.....	48
6.4.2. Volume da fração de ar.....	48
6.4.3. Percentual de expansão	49
6.4.4. Estabilidade física	49
6.4.5. Ensaio rotacional de valor de tensão limite.....	49
6.4.6. Análise por imagem	50
6.5. ENSAIOS DE SECAGEM CONVECTIVA.....	51
6.6. CINÉTICA E MODELAGEM DOS DADOS DE SECAGEM	54
6.6.1. Cálculo da razão de umidade	54
6.6.2. Modelos de secagem.....	54
6.6.3. Cálculo da difusividade efetiva	56

6.7. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SUCOS, ESPUMAS E SUCOS EM PÓ	56
6.8. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SUCOS DE YACON EM PÓ	57
6.8.1. Solubilidade em água	57
6.8.2. Índice de absorção de água (IAA)	58
6.8.3. Densidade aparente	58
6.8.4. Densidade absoluta	59
6.8.5. Porosidade intragranular	60
6.8.6. Higroscopicidade	60
6.9. PARÂMETROS DE COR	61
6.10. MICROESTRUTURA	61
6.11. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	61
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
7.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E DE ESTABILIDADE DAS ESPUMAS	63
7.1.1. Capacidade de formação, densidade, percentual de expansão da espuma e volume da fração de ar	63
7.1.2. Índice de estabilidade das espumas	71
7.1.3. Valor de tensão limite, número e diâmetro das bolhas de ar	74
7.2. CARACTERÍSTICAS DA SECAGEM	83
7.2.1. Cinética de secagem das espumas de suco e suco de yacon concentrado	84
7.2.2. Modelagem dos dados de secagem	87
7.2.3. Difusividade efetiva	96
7.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUCOS, ESPUMAS E SUCOS EM PÓ	100
7.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SUCOS DE YACON EM PÓ	110
7.4.1. Solubilidade em água, índice de absorção de água e percentual de higroscopicidade	111
7.4.2. Densidade aparente, densidade absoluta e porosidade intragranular	119
7.4.3. Parâmetros de cor	121
7.4.4. Microestrutura	124

8. CONCLUSÕES.....	127
8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
9. REFERÊNCIAS	130
APÊNDICES	152
ANEXOS	187

1. INTRODUÇÃO

A raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) é originária e nativa dos montes Andinos, onde é comumente cultivada e consumida desde a época da cultura pré-Inca (SEMINARIO *et al.*, 2003; GRAEFE *et al.*, 2004). A expansão mundial de sua produção e comercialização se deu início após estudos relacionarem seu consumo à promoção de benefícios à saúde humana, como a caracterização da sua atividade antioxidante associada aos compostos fenólicos (YAN *et al.*, 1999; TAKANEKA *et al.*, 2003), a redução dos níveis de glicose sanguínea e seu potencial prebiótico (MENTREDDY, 2007; VALENTOVÁ *et al.*, 2008).

Um outro grande atrativo é o seu baixo valor calórico, devido a sua composição ser em maior parte água (acima de 70% do peso úmido) (MANRIQUE & PÁRRAGA, 2005). Porém, este elevado percentual de umidade aliado a uma acelerada atividade enzimática, o tornam um alimento perecível, dificultando seu armazenamento, distribuição e transporte (SHI *et al.*, 2013). Como o yacon é uma cultura sazonal, é importante a aplicação de tratamentos tecnológicos, como a secagem, em função de preservar suas características e o tornar disponível para comercialização e processamento durante longos períodos (SCHER *et al.*, 2009).

A retirada de umidade com consequente redução da atividade de água é uma das alternativas mais viáveis para aumentar a vida útil desta cultura, tendo sido estudada a aplicação de diferentes técnicas de secagem, como encapsulamento (LAGO *et al.*, 2012), secagem convectiva (VASCONCELOS *et al.*, 2010), desidratação em estufa a vácuo (REIS *et al.*, 2012), secagem solar (CASTRO *et al.*, 2012), secagem osmo-convectiva (KOTOVICZ *et al.*, 2014; PERUSSELLO *et al.*, 2014) e liofilização (BERNSTEIN *et al.*, 2014). Dentre as diversas pesquisas sobre desidratação de yacon já publicadas até o momento, durante o levantamento bibliográfico, não foi encontrada alguma que indicasse o emprego da metodologia de secagem por camada de espuma.

A desidratação por camada de espuma consiste em um processo de conservação, onde o material líquido ou semilíquido é transformado numa espuma estável, através da incorporação de ar ou outro gás, que é submetido à secagem com ar aquecido, até o ponto em que impeça o crescimento de microrganismos, reações

químicas e/ou enzimáticas (FALADE *et al.*, 2003). É um método relativamente simples e barato, que se vale da utilização de agentes, que tem a finalidade de manter a espuma estável durante o processo (WIDYASTUTIL & SRIANTA, 2011). Dentre as vantagens deste método, destacam-se as menores temperaturas de desidratação e o menor tempo de secagem, devido à maior área de superfície exposta ao ar e à velocidade de secagem, acelerando o processo de remoção de água e a obtenção de um produto poroso e de fácil reidratação (RAJKUMAR & KAILAPPAN, 2006; KUDRA & RATTI, 2008).

Espumas alimentares podem ser consideradas como um sistema bifásico onde um gás (fase dispersa) é incorporado a uma fase líquida contínua (VERNON-CARTER *et al.*, 2001). A instabilidade intrínseca das espumas recém formadas tem sido apontada como um importante problema a ser resolvido antes da desidratação, pois para um eficiente processo de secagem, as espumas devem se manter mecânica e termodinamicamente estáveis para não haver o comprometimento da qualidade da cor, textura, sabor e valor nutricional do produto desidratado (MUTHUKUMARAN *et al.*, 2008; BAG *et al.*, 2011; KRASAEKOOPT & BHATIA, 2012).

A secagem é um processo térmico com alto consumo de energia onde a transferência de calor e massa ocorrem simultaneamente (RATTI, 2001; SAHIN & DINCER, 2005). A cinética de secagem de alimentos é um fenômeno complexo que requer representações que simplifiquem a previsão do comportamento da secagem e também a otimização dos seus parâmetros (KARATHANOS & BELESSIOTIS, 1999). Modelos matemáticos dos processos de secagem são utilizados para o desenho de novos sistemas, para a melhoria dos já existentes ou mesmo para o seu controle; podendo descrever o fenômeno e fornecer as informações necessárias sobre umidade, temperatura, tempo e gasto energético (ÖZDEMIR & DEVRES, 1999).

O uso de adequadas condições nos processos de secagem é de fundamental importância para a qualidade do produto final e a demanda energética requerida para sua fabricação. No contexto da secagem por camada de espuma, parâmetros como temperatura, velocidade, umidade relativa do ar, espessura da camada e composição da espuma, são determinantes da qualidade do pó obtido.

Como forma de avaliar a aplicação desta tecnologia à raiz de yacon, foram conduzidos testes de formulação das espumas, determinação dos atributos adequados para a posterior desidratação e em como as condições de processo interferiram nas características do produto final.

2. JUSTIFICATIVA

As raízes tuberosas do yacon são mundialmente conhecidas por suas características funcionais, sendo seu consumo amplamente difundido, principalmente em países da América do Sul, da onde este é originário quanto no continente asiático (destaque para o Japão) onde sua produção é acentuada.

Seu consumo se dá principalmente por suas raízes em sua forma fresca, por elas apresentarem sabor adocicado semelhante à pera ou maçã. Apesar da informação sobre seus benefícios ser muito bem difundida, muitas pessoas não têm fácil acesso a este alimento, pois sua composição rica em água (acima de 70%), elevam sua perecibilidade. Este fator associado à fragilidade da sua estrutura e a sazonalidade do seu cultivo, dificultam o transporte, distribuição e armazenamento desta cultura.

A retirada de água (desidratação) se mostra como uma eficiente alternativa para o aumento da vida útil de diversos alimentos. Dentre os métodos existentes, a desidratação por camada de espuma se destaca, pois neste processo a retirada de água é mais eficiente, gerando um produto final com cor e sabor superiores devido ao mínimo dano causado pelo calor.

Diversos trabalhos sobre a secagem de yacon já foram publicados, na sua maioria envolvendo a desidratação osmótica e/ou convectiva de suas raízes, mas até o presente momento, durante a revisão de literatura não foi possível encontrar trabalhos que envolvam a aplicação da técnica em camada de espuma para o suco de yacon.

Para tornar possível a aplicação deste método, é necessária a avaliação das variáveis que interferem na formação, estabilidade e características físicas das espumas formadas, bem como um acompanhamento detalhado do processo de secagem e sua influência sobre a qualidade/estabilidade do produto final obtido.

Ao estabelecer as melhores condições que viabilizam o processo e avaliar a influência das variáveis de operação sobre a qualidade do produto final obtido, este trabalho disponibiliza mais uma opção de aumento da vida útil desta cultura e também auxiliará na valorização do yacon como produto e matéria-prima, facilitando e ampliando sua participação no mercado de alimentos funcionais.

3. OBJETIVOS

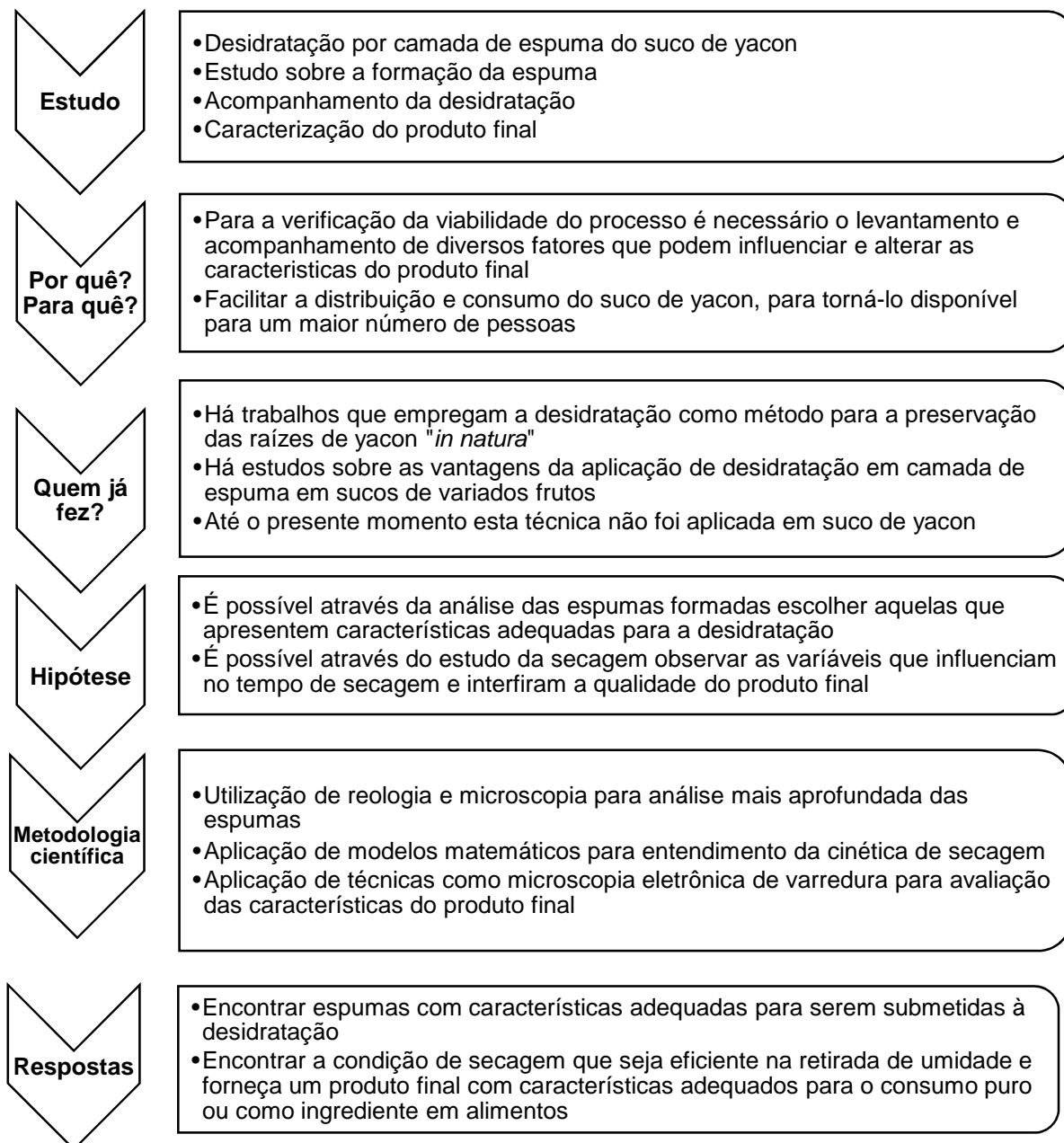
3.1. OBJETIVO GERAL

Aplicar a desidratação em suco de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) pelo método de camada de espuma em estufa convectiva e avaliar as características que influenciam o processo e a qualidade do produto final.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar e caracterizar o suco de yacon “*in natura*”;
- Estudar a influência da presença e concentração de agentes espumantes e do tempo de batimento na formação, expansão, estabilidade e características físicas das espumas formadas;
- Escolher através de planejamento experimental, as espumas com características apropriadas para serem submetidas à desidratação;
- Caracterizar as espumas selecionadas;
- Submeter à desidratação convectiva as espumas selecionadas;
- Utilizar planejamento experimental para avaliar a influência da temperatura e espessura da camada de espuma sobre a cinética de secagem e características do produto final;
- Estudar a cinética de secagem e aplicar modelos empíricos;
- Caracterizar e avaliar os parâmetros de qualidade do produto final.

4. DIAGRAMA CONCEITUAL DO TRABALHO



5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE O YACON (*Smallanthus sonchifolius*)

O yacon é uma espécie herbácea, nativa da região dos Andes, na América do Sul, sendo datado seu cultivo e consumo desde os tempos pré-incas (BUTLER & RIVERA, 2004). Seu plantio ocorre em regiões de clima temperado, desde a Colômbia e a Venezuela até o noroeste da Argentina, em altitudes que variam de 2.000 a 3.400 metros acima do nível do mar e sob condições limitadas por causa da combinação do seu longo período de crescimento (acima de 180 dias) e da susceptibilidade de suas partes aéreas ao congelamento (GRAU & KORTSARZ, 2001, PEDRESCHI *et al.*, 2003; MACHADO *et al.*, 2004; MALDONADO *et al.*, 2008).

Vêm sendo cultivada com sucesso em diferentes partes do mundo com condições climáticas variadas incluindo países como República Tcheca, China, Coréia, Japão, Nova Zelândia, Rússia, Taiwan e Estados Unidos, tendo sido introduzida no Brasil por volta de 1989, na região de Capão Bonito (SP), por imigrantes japoneses e à poucos anos há também o desenvolvimento dessa cultura na região de Itajaí (SC) e São José dos Pinhais (PR) (ITAYA *et al.*, 2002; MANRIQUE *et al.*, 2005; NISHIMOTO *et al.*, 2012).

Pertencente à família Asteraceae, a mesma do girassol, dália e dente de leão foi inicialmente classificado como *Polymnia sonchifolia* Poepp. & Endl. (HERMANN *et al.*, 1998). Na última década, FERNANDEZ *et al.*, (2000) realizaram estudos citológicos e morfológicos e sugeriram o nome científico de *Smallanthus sonchifolius*, pois acreditam que *Smallanthus macroscyphus* é possivelmente seu progenitor (OLIVEIRA & NISHIMOTO, 2004).

É uma espécie extremamente adaptável quanto ao clima, altitude e tipo de solo, apresentando carboidratos de reserva nos órgãos subterrâneos. Além disso, seus rizóforos contêm gemas que regeneram uma nova planta a cada ano, após o inverno (VILHENA *et al.*, 2000).

A planta de yacon é perene, com altura média de 1,5 m, suas folhas são pinatífidas na base dos caules e triangulares na parte apical (Figura 1– A). As flores de coloração amarela aparecem em grupos terminais e o sistema subterrâneo da

planta (Figura 1- B) é constituído de três partes distintas: os rizóforos, ricos em fibras não digeríveis, que representam um aglomerado de massa contendo gemas que dão origem a novas plantas; as raízes com função de absorção e fixação, e as raízes tuberosas ou raízes de reserva, que podem atingir mais de 20 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro e pesar até 2 kg. A coloração das raízes tuberosas depende dos ecotipos ou clones, podendo ser externamente marrom arroxeada ou purpúrea opaca e internamente branca, amarela, roxa ou alaranjada (MONTIEL, 1996; DOSTERT *et al.*, 2009).

Tanto os rizóforos como as raízes tuberosas são comestíveis, porém os rizóforos são mais fibrosos, menos suculentos e translúcidos que as raízes, as quais são carnosas e refrescantes (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989; OHYAMA, 1990).

A maturidade é alcançada entre 06 e 08 meses após o plantio, quando tem início a floração. Este estágio é seguido pelo período de maior acúmulo de frutooligossacarídeos (FOS) nos rizóforos e nas raízes tuberosas, passando, posteriormente, para a fase de senescência da parte aérea e dormência das gemas subterrâneas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989). Entre 08 e 09 meses após o plantio, faz-se a colheita das raízes com fins comerciais, e dos rizóforos a serem utilizados na propagação vegetativa em novos plantios (VILHENA, 2001).

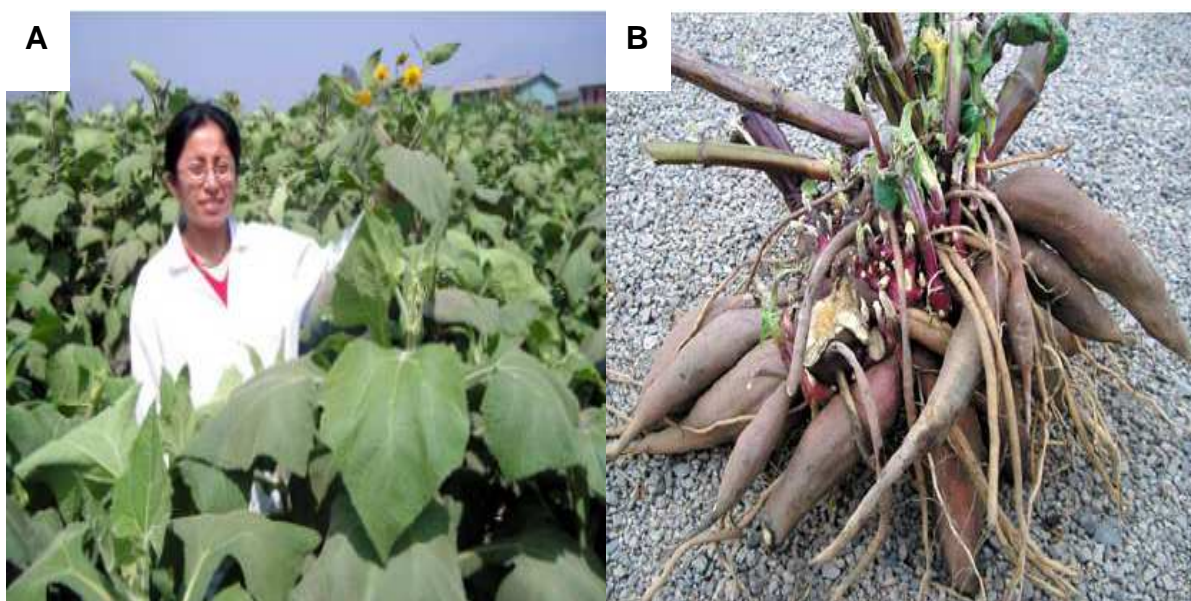


FIGURA 1- PARTE AÉREA (A) E PARTE SUBTERRÂNEA DA PLANTA DO YACON (B)

FONTE: MANRIQUE *et al.*, (2004, 2005).

Na Figura 2 é possível visualizar a estrutura das raízes de yacon descascadas, sua aparência externa é semelhante a uma batata-doce, mas a textura interna é macia, crocante e aquosa como a de jambo e pera e seu sabor adocicado é descrito como semelhante ao de uma maçã fresca (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989) ou ainda como melancia (ESTRELLA & LAZARTE, 1994).



FIGURA 2 – APARÊNCIA EXTERNA E INTERNA DE RAÍZES DE YACON

FONTE: MANRIQUE *et al.*, (2004).

Nos mercados andinos, o yacon é classificado como uma fruta e comercializado juntamente com as maçãs, abacates, abacaxis e não com as batatas ou tubérculos como se espera. O seu consumo é dado pela raiz “*in natura*” descascada, mas também é utilizada no preparo de saladas, bebidas, podendo ainda ser cozido ao vapor, assado, frito e também preparado em conserva (VALENTOVÁ *et al.*, 2001).

No Japão o yacon é processado sob forma de sucos, produtos de panificação, bebidas fermentadas, pós liofilizados e polpas (Figura 3). No Peru desde 2003 alguns supermercados comercializam xarope, suco, geleia, purê e as folhas de yacon para chá (MANRIQUE *et al.*, 2004). Além de alimento, o yacon também é considerado uma planta medicinal, pela capacidade da infusão de suas folhas secas em reduzir o

colesterol e diabetes, aplicação esta, muito difundida no Brasil e Japão (AYBAR *et al.*, 2001; ADAM *et al.*, 2005).

Têm sido realizados diversos estudos em relação às propriedades promotoras de saúde do yacon, como a caracterização da sua atividade antioxidante a partir dos seus compostos fenólicos (SIMONOVSKA *et al.*, 2003; TAKENAKA *et al.*, 2003) e a redução dos níveis de glicose no sangue, relacionado aos FOS presentes (DA SILVA *et al.*, 2006; PEREIRA *et al.*, 2009).



FIGURA 3 – PRODUTOS DERIVADOS DE YACON COMERCIALIZADOS NO BRASIL, PERU E JAPÃO

FONTE: MANRIQUE *et al.* (2004).

5.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NUTRICIONAL DO YACON

O yacon é formado principalmente por água, como visualizado na Tabela 1, ela está presente em proporções acima de 70%, e deve-se a este fator o baixo valor calórico desta raiz tuberosa. Sua raiz contém entre 10-14% de matéria seca, sendo

esta composta por 0,3-3,7% de proteínas e 70-80% de carboidratos, grupo formado por monossacarídeos (frutose e glicose), sacarose, inulina, traços de amido e principalmente os FOS (LACHMAN *et al.*, 2003).

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO YACON (BASE ÚMIDA)

	Yacon		
	Raízes tuberosas	Folhas	Haste
Água	70-93	10,47	-
Proteínas	0,4- 2,0	21,48	9,73
Carboidratos	(g. 100g ⁻¹) 12,5	-	-
Lipídeos	0,1 - 0,3	4,2	1,98
Cinzas	0,3 – 2, 0	12,52	9,60
Fibras	0,3 – 1,7	11,63	23,82
Cálcio	23	1805	967
Fósforo	21	543	415
Ferro	0,3	10,82	7,29
Cobre	0,963	<0,5	<0,5
Manganês	0,541	3,067	<0,5
Zinco	0,674	6,20	2,93
Retinol	10	-	-
Tiamina	0,01	-	-
Ácido ascórbico	13,10	-	-
Carotenóides	0,02	-	-
Riboflavina	0,11	-	-
Niacina	0,34	-	-

FONTE: Adaptado de VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ (2003).

- componente não determinado pelo autor.

A qualidade dos carboidratos depende do cultivar, da época de cultivo e da colheita, do tempo e da temperatura na pós-colheita (SEMINARIO & VALDERRAMA, 2005). Diferentemente de outros órgãos de reserva, que acumulam carboidratos na

forma de amido, o yacon armazena essencialmente FOS (40-70% em base seca) sendo que os demais carboidratos estão na seguinte proporção: 5-15% de sacarose, 5-15% de frutose e menos de 5% de glicose (MANRIQUE & PÁRRAGA, 2005; NARAI-KANAYAMA *et al.*, 2007).

Os frutanos do yacon são em grande parte representados pela inulina, que é um polissacarídeo formado por moléculas de frutose, unidas por ligações frutossil-frutose β (2 \rightarrow 1). As cadeias de frutose têm a particularidade de terminar em uma unidade de glicose unida por ligações glicosídicas α (2 \rightarrow 1) como a sacarose. A inulina caracteriza-se pelo grau de polimerização que varia de 10 a 60 unidades sendo considerada um carboidrato de cadeia curta e de baixo grau de polimerização, geralmente 12. Além do seu benefício à saúde como prebiótico e fibra alimentar, a inulina apresenta também propriedades tecnológicas como adoçante de baixa caloria, substituto de gordura e modificador de textura (GOTO *et al.*, 1995; DEN HOND *et al.*, 2000).

Os frutanos têm sido utilizados como substitutos da sacarose, sendo considerados dietéticos e exercendo uma grande influência na flora intestinal humana, pois os seres humanos não dispõem das enzimas capazes de hidrolisar as ligações tipo β (2 \rightarrow 1) da molécula de inulina. Por essa razão ela é classificada como fibra alimentar ou mais recentemente como prebiótico, pois ela não é digerida no trato gastrointestinal e quando transportada ao cólon é fermentada por microrganismos específicos da flora intestinal, especialmente *Lactobacillus* e *Bifidobacterium* (PEDRESCHI *et al.*, 2003; VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ, 2003).

Apesar do conteúdo de proteínas, lipídios, vitaminas e minerais não ser significativo, não se pode afirmar o mesmo para o teor de vitamina C e potássio, este último com quantidades significativas que podem variar de 1-2% do peso seco (SEMINARIO & VALDERRAMA, 2005; MANRIQUE & PÁRRAGA, 2005).

Compostos fenólicos (203 mg. 100⁻¹g), triptofano (14,6 \pm 7,1 μ g. g⁻¹) e ácido clorogênico (48.5 \pm 12.9 μ g. g⁻¹) foram identificados nesta raiz tuberosa, sendo que o triptofano e o ácido clorogênico foram considerados os principais antioxidantes (YAN *et al.*, 1999; TAKENAKA *et al.*, 2003, SIMONOVSKA *et al.*, 2003). Cinco ácidos fenólicos foram isolados de yacon, entre eles encontravam-se o ácido clorogênico, ferúlico e caféico (TAKENAKA *et al.*, 2003, VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ, 2003).

Em estudo realizado por Valentová e colaboradores (2003), foi encontrada atividade antioxidante derivada de dois extratos folhas de yacon em acetato de etila,

atribuída ao conteúdo fenólico e o efeito de cito proteção em frente a danos oxidativos induzidos por hidroperóxido de terc-butila em hepatócitos de ratos.

O yacon também tem sido reportado como uma boa fonte das enzimas polifenol oxidase e peroxidase, responsáveis pelas reações de escurecimento em frutas e hortaliças, formando rapidamente pigmentos escuros ao serem cortados, prejudicando sua aparência e a de seus produtos (VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ, 2003).

5.3. POTENCIAL E VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO YACON

A cultura andina atribui propriedade antidiabética ao yacon, assim como o alívio de problemas renais e gastrointestinais e também o rejuvenescimento da pele, sendo ele utilizado puro ou como adoçante natural na forma de xarope (ADAM *et al.*, 2005).

A principal funcionalidade apresentada pelo yacon, é sua potencial ação prebiótica. Prebióticos são definidos como ingredientes alimentares não digeríveis que afetam benéficamente o hospedeiro de maneira seletiva por estímulo do crescimento e/ou atividade de um número limitado de bactérias no cólon, melhorando assim a saúde do hospedeiro (GIBSON & ROBERFROID, 1995). Os frutooligossacarídeos preenchem perfeitamente os critérios de classificação, porque não podem ser hidrolisados e nem absorvidos pela parte superior do trato gastrointestinal, sendo seletivamente fermentados por um número potencial de microrganismos benéficos no cólon tornando assim a composição da microbiota do cólon mais saudável (GIBSON, 1999).

Geyer e colaboradores (2008) investigaram o efeito do yacon no tempo de trânsito colônico em humanos. O estudo em questão foi conduzido com voluntários saudáveis na forma de estudo duplo-cego controlado por placebo. A dose fornecida foi de 20 gramas ao dia por um período de 02 semanas. O tempo de trânsito reduziu significativamente e os autores concluíram que o yacon foi bem tolerado com um excelente perfil de efeitos benéficos.

Estudos relatam que além da ação prebiótica o yacon também apresenta atividade antioxidante, relacionada a compostos como flavonoides (SIMONOVSKA *et*

al., 2003; ARNAO *et al.*, 2011), ácidos fenólicos (TAKENAKA & ONO, 2003; TAKENAKA *et al.*, 2003; CASTRO *et al.*, 2012) e triptofano (YAN *et al.*, 1999); além de propriedades anti-inflamatórias (HONORÉ *et al.*, 2012), antiobesidade (GENTA *et al.*, 2009; HASANI-RANJBAR *et al.*, 2013), antibacterianas (LIN *et al.*, 2003; JOUNG *et al.*, 2010), antifúngicas (INOUE *et al.*, 1995; YUN *et al.*, 2012) e anticancerígenas (SIRIWAN *et al.*, 2011^{a, b}; MOURA *et al.*, 2012).

Em pesquisa conduzida por Genta e colaboradores (2005), foi realizado o estudo da toxicidade sub-crônica durante o período de 04 meses em ratos alimentados com raízes de yacon desidratadas, em proporções equivalentes a 340 e 6.800 mg de FOS por quilo de massa corpórea, não tendo sido observados efeitos tóxicos ou negativos e havendo uma tolerância dos animais estudados ao yacon.

O efeito da farinha de yacon na morfometria da mucosa intestinal, no balanço de cálcio e magnésio e na retenção de cálcio nos ossos em ratos em fase de crescimento foi avaliado por Lobo e colaboradores (2007), sendo relatados resultados positivos na absorção intestinal de minerais, nas propriedades biomecânicas e de massa óssea e não foi observado nenhum distúrbio gastrointestinal nesses animais.

Até o ano de 2011 foi apenas reportado um caso de efeitos adversos sérios causados pelo consumo de yacon, ocasião onde houve reação anafilática em uma mulher de 55 anos de idade após a ingestão de yacon no ano de 2010 na Coreia, sendo a anafilaxia confirmada por teste cutâneo e testes intradérmicos (OJANSIVU *et al.*, 2011).

Seguindo a tendência mundial de consumo de produtos naturais e dietéticos e pelas diversas vantagens relacionadas ao consumo de yacon, a procura por este alimento vem sendo crescente, porém, sua disponibilidade é afetada por seu elevado percentual de umidade, e uma estrutura com tecidos internos delicados que aumentam a incidência de quebras durante a colheita, embalagem e transporte (LACHMAN *et al.*, 2003; MANRIQUE & PÁRRAGA, 2005).

Uma vez que o yacon é uma cultura sazonal, é importante a criação de alternativas de processamento que prolonguem a estabilidade e a disponibilidade deste alimento (SCHER *et al.*, 2009). A desidratação se apresenta como uma das alternativas mais viáveis e utilizadas, por reduzir consideravelmente a atividade da água, minimizando assim as alterações físicas, químicas e microbiológicas durante o armazenamento de alimentos perecíveis (HATAMIPOUR *et al.*, 2007).

5.4. DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS

Sabe-se há muito tempo, que existe uma relação entre o conteúdo de água de um alimento e sua perecibilidade (MADIGAN *et al.*, 2004). Uma das principais causas da deterioração de alimentos frescos e conservados é a quantidade de água presente neles, sendo o termo atividade de água (Aa) desenvolvido para indicar a intensidade com qual a água associa-se com constituintes aquosos dentro do alimento (DAMODARAN *et al.*, 2010). Na Figura 4, é possível ver a relação entre a atividade de água de um alimento e as reações deteriorativas ligadas a esta, a partir disto, se pode afirmar que a retirada de umidade de um alimento elimina a possibilidade de deterioração microbiológica e reduz apreciavelmente a velocidade de outros mecanismos de deterioração, como as reações enzimáticas (SINGH & HELDMAN, 1998; KARATHANOS, 1999).

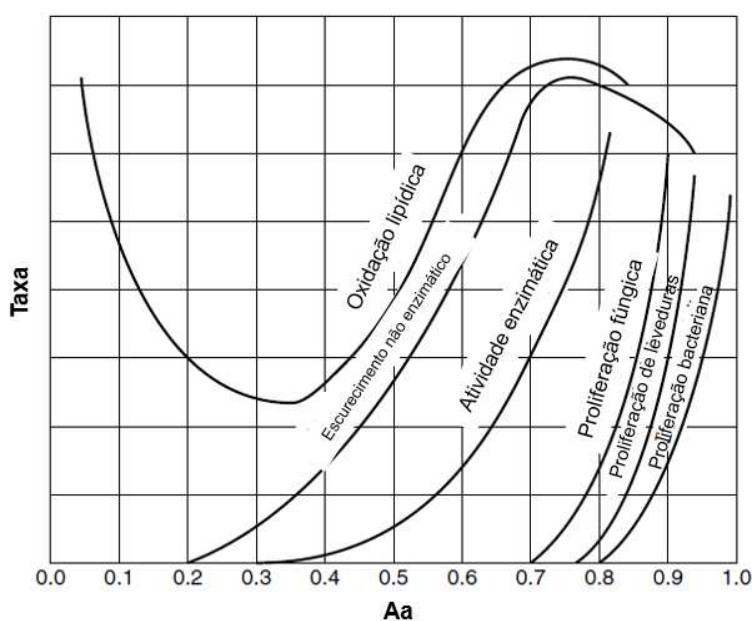


FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE A ATIVIDADE DE ÁGUA E REAÇÕES DETERIORATIVAS EM ALIMENTOS

FONTE: ADAPTADO DE TOLEDO, (2007).

A interrupção do crescimento microbiano pode ser obtida em duas situações-limite: na ausência total de solutos, água pura, cuja Aa é 1, e em uma Aa

suficientemente baixa, cujo valor é diferente para cada microrganismo (DAMODARAN *et al.*, 2010). A diminuição da atividade de água pode ser obtida com a desidratação deste alimento, contribuindo conseqüentemente para sua conservação e uso prolongado.

Dos diversos processos de conservação de alimentos utilizados, a secagem, desidratação ou dessecação é, sem dúvida, um dos mais antigos, tendo como objetivo básico a remoção parcial de água de um sólido em condições controladas até um nível onde os danos por microrganismos sejam evitados (ANDRADE *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2003). Suas vantagens são várias, dentre as quais se destaca a redução da massa da fruta ou hortaliça de 50 a 80%, aumentando a eficiência do transporte e armazenamento (GOMES *et al.*, 2007).

A secagem de um alimento consiste na transferência da umidade na forma de vapor para uma fase gasosa não saturada. Esse processo ocorre sob determinada condição de pressão de vapor do líquido presente no alimento for maior que a pressão parcial do vapor do mesmo líquido na fase gasosa (SAHIN & DINCER, 2005).

Dois processos simultâneos podem ser observados nesse tipo de procedimento: transferência de calor, através da vaporização do líquido e transferência de massa do líquido ou vapor presente no interior do material para a atmosfera na forma de vapor. Porém o controle de secagem depende das condições internas de transferência de massa, das características do sólido ou das condições externas, tais como temperatura e velocidade do gás de secagem (JANGAM & MUJUMDAR, 2010).

Dentre as diversas tecnologias que podem ser usadas na desidratação de alimentos, a escolha é orientada pela natureza do material a ser desidratado, pela forma que se deseja dar ao produto processado, pelo fator econômico e pelas condições de operação (EVANGELISTA, 1994). Entre as técnicas mais utilizadas no processamento de frutas e hortaliças está a secagem convectiva ou por ar quente, onde o material a ser desidratado, geralmente em fatias ou pequenos pedaços, é submetido a uma corrente de ar quente paralela ou perpendicular ao leito de sólidos (RATTI, 2001; ORDÓÑEZ *et al.*, 2007).

A secagem convectiva de frutos e vegetais é um dos processos que mais consome tempo e energia na indústria de alimentos e pode comprometer a qualidade do produto final, gerando encolhimento do material devido ao colapso celular seguido de perda de água, dureza excessiva, dificuldade de reidratação e alterações

desfavoráveis nas propriedades físicas e nutricionais (SUNJKA & RAGHAVAN, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2006).

A transformação de líquidos e materiais semissólidos em espumas é reconhecida como uma maneira eficiente de redução do tempo de secagem, e vem ganhando maior atenção por sua habilidade em desidratar materiais de difícil secagem, a fim de produzir produtos com propriedades desejáveis, retendo seus compostos voláteis que são na maioria das vezes perdidos durante a secagem de materiais que não estão na forma de espuma (FALADE *et al.*, 2003).

Diversos estudos sobre processos de desidratação de yacon podem ser encontrados. Lago e colaboradores (2012) obtiveram yacon em pó a partir da secagem convectiva da polpa encapsulada por amido nativo e VASCONCELOS *et al.* (2010) através da secagem convectiva das raízes. A secagem das fatias é a metodologia mais explorada, entre os trabalhos encontrados: desidratação osmótica em solução de sacarose por Maldonado e colaboradores (2008), em estufa a vácuo por Reis e colaboradores (2012), em estufa e secador solar (CASTRO *et al.*, 2012); por bomba de calor (SHI *et al.*, 2013); por técnica osmo-convectiva (PERUSSELO *et al.*, 2014; KOTOVICZ *et al.*, 2014) e por convecção e liofilização (BERNSTEIN *et al.*, 2014). Apesar das diversas técnicas aplicadas, durante a pesquisa realizada para a revisão bibliográfica, não foram encontradas publicações indicando o emprego da metodologia de secagem por camada de espuma para esse fim.

5.5. DESIDRATAÇÃO EM CAMADA DE ESPUMA – “FOAM-MAT DRYING”

A secagem por camada de espuma é relativamente antiga, mas teve atenção renovada por sua habilidade em transformar matérias-primas de difícil secagem em produtos com qualidade e características finais desejáveis, como fácil reidratação, preservação da cor e sabor e retenção de compostos voláteis que geralmente são perdidos se aplicado outro método de desidratação (RAJKUMAR & KAILAPPAN, 2006; KUDRA & RATTI, 2008).

Pelo baixo custo operacional, facilidade de implantação e manutenção da qualidade do produto final, este método vem sendo estudado e testado em diferentes alimentos como café (CHANDAK & CHIVATE, 1974), leite (SOCHANSKI *et al.*, 1990),

sucos de banana (SANKAT & CASTAIGNE, 2004), maçã (RAHARITSIFA & RATTI, 2010), manga (KADAM *et al.*, 2010^a), tangerina (KADAM *et al.*, 2011), abacaxi (KADAM *et al.*, 2012) e pitanga (CHAVES *et al.*, 2013), extrato hidrossolúvel de soja (AKINTOYE & OGUNTUNDE, 1991), feijão (FALADE *et al.*, 2003), ovos (MUTHUKUMARAN *et al.*, 2008), tomate (DATTATREYA & BALASUBRAMANIAN, 2011), inhame (FALADE & ONYEOZIRI, 2012), iogurte (KRASAEKOOPT & BHATIA, 2012), spirulina (PRASETYANINGRUM & DJAENI, 2012), molho mexicano (ESCOBEDO-AVELLANEDA *et al.*, 2013), camarão (AZIZPOUR *et al.*, 2014) e outros produtos (RATTI & KUDRA, 2006).

O processo de secagem por camada de espuma se dá pela transformação de um alimento líquido ou pastoso em espuma através da incorporação de ar e adição de agentes espumantes e/ou estabilizantes. A espuma formada é então desidratada e o produto seco é convertido a um fino pó que é facilmente reconstituído em água (BRYGIDYR *et al.*, 1977; WIDYASTUTIL & SRIANTA, 2011). A exemplo da secagem de suco de maçã (Figura 5), de um modo geral, a desidratação de uma camada de espuma é mais rápida quando comparada a uma camada de líquido, pois ocorre um aumento na área superficial da interface líquido-gás, permitindo assim uma rápida retirada de água através do movimento interno de umidade (FALADE *et al.*, 2003; WILSON *et al.*, 2012).

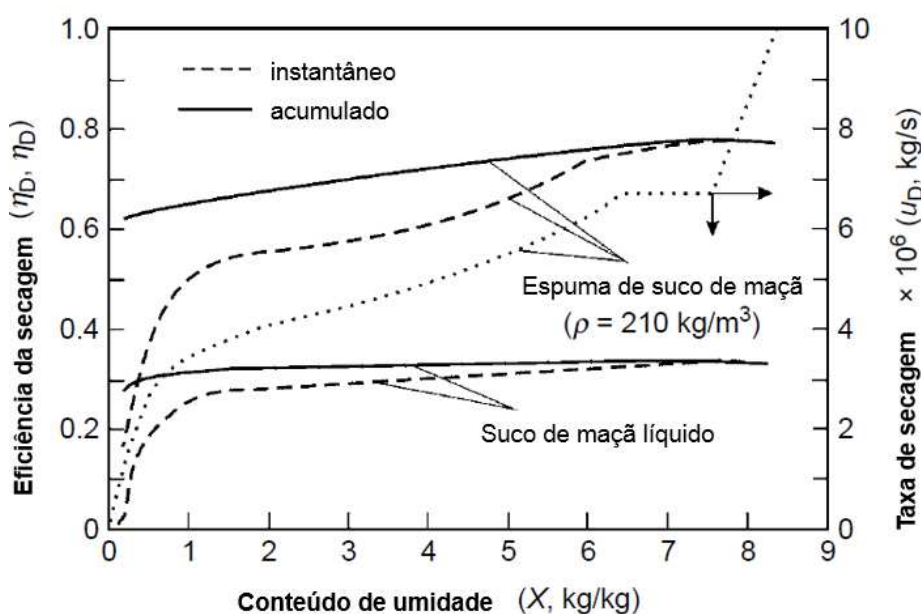


FIGURA 5 – TAXA E EFICIÊNCIA DE SECAGEM VERSUS CONTEÚDO DE UMIDADE PARA SUCO DE MAÇÃ LÍQUIDO E EM FORMA DE ESPUMA DESIDRATADOS POR SECAGEM CONVECTIVA A 55°C E CAMADA COM ESPESSURA DE 19 mm

FONTE: ADAPTADO DE RATTI, (2009).

Não são todos os alimentos que apresentam capacidade de formação de espuma, principalmente os com baixo teor de proteína em sua composição, fazendo com que se torne necessária a inclusão de um agente espumante ou estabilizante. Estes agentes são adicionados em diferentes concentrações e sua eficácia pode ser mensurada através da capacidade de formação e estabilidade da espuma (FALADE & OKOCHA, 2012).

Para um eficiente processo de secagem, as espumas devem se manter mecânica e termodinamicamente estáveis, pois se colapsarem ocorre uma desestruturação celular com conseqüente ineficiência na retirada de água da superfície, resultando em produtos com cor, textura, sabor e valor nutricional comprometidos (BAG *et al.*, 2011; KRASAEKOOPT & BHATIA, 2012). Entre os fatores responsáveis pela geração e estabilidade das espumas estão a composição química do alimento; o percentual de sólidos solúveis totais; a concentração e o tipo do agente espumante (albumina de ovo, leite, isolado proteico de soja) e/ou estabilizante (gelatina, carboximetilcelulose, goma xantana); tempo de batimento; método de incorporação de ar, entre outros. Afim de se obter espumas estáveis é importante uma extensa pesquisa e análise visando selecionar as melhores condições do processo (KARIM & WAI, 1999; BALASUBRAMANIAN *et al.*, 2012).

As espumas são descritas em base de sua aparência, rendimento (fração de volume ar), estabilidade e reologia, sendo as áreas mais estudadas nas espumas alimentícias o rendimento (capacidade de formação de espuma) e a estabilidade (CAMPBELL & MOUGEOT, 1999). A capacidade de formação de espuma de uma determinada solução é definida através do volume da espuma formada sob condições fixas (tempo de batimento, temperatura, etc.) ou pelo tempo necessário para se obter determinado volume de espuma (MARINOVA *et al.*, 2009).

Após a formação da espuma, diversos processos ocorrem levando a sua destruição, e são eles: volume de líquido drenado, coalescência das bolhas e o desproporcionamento (DENKOV, 2004; MURRAY & ETTPELLAIE, 2004). A estabilidade está relacionada com a capacidade da espuma em manter algumas de suas propriedades constantes com o tempo (volume e/ou tamanho das bolhas e/ou conteúdo de líquido) (DENKOV *et al.*, 2005). Dependendo de uma propriedade em particular e a escala de tempo de interesse, algum desses processos pode ser de maior importância, sendo a medida da drenagem, também conhecida como separação

gravitacional, ou sinérese, uma das formas mais utilizadas de se determinar a estabilidade (SAINT-JALMES *et al.*, 2005).

As espumas alimentícias podem ser consideradas um sistema bifásico onde uma fase gasosa (bolha) está dispersa numa fase líquida contínua (CALVERT & NEZHATI, 1987; VERNON-CARTER *et al.*, 2001). Quando a fração do volume de gás é maior, as bolhas apresentam um formato poliédrico distorcido separado por uma fina camada da fase líquida. Como é possível visualizar na Figura 6, filmes adjacentes se interceptam formando a borda Plateau, e a fase contínua é interconectada através de uma rede de bordas Plateau e de uma camada fina conhecida como lamela (NARSIMHAN, 1991; WANG & NARSIMHAN, 2004). As espumas são inerentemente instáveis, pois quando em repouso, toda a energia que foi adicionada durante sua formação (aplicação de alta pressão ou batimento) é liberada (KARIM & WAI, 1999^a). O processo de instabilidade se inicia pela drenagem da fase contínua através da camada fina entre as bolhas. Como resultado, a lamela de espuma favorece a transferência de gás através dela, o que leva ao crescimento das bolhas maiores devido ao detrimento das menores, fenômeno conhecido como desproporcionamento ou amadurecimento de Ostwald. Esse processo continua com a coalescência das bolhas (a camada lamelar entre as duas bolhas entra em colapso, e as suas bolhas se unem formando uma bolha maior), e termina com a separação de fases (LOMAKINA & MÍKOVÁ, 2006; RAHARITSIFA *et al.*, 2006).

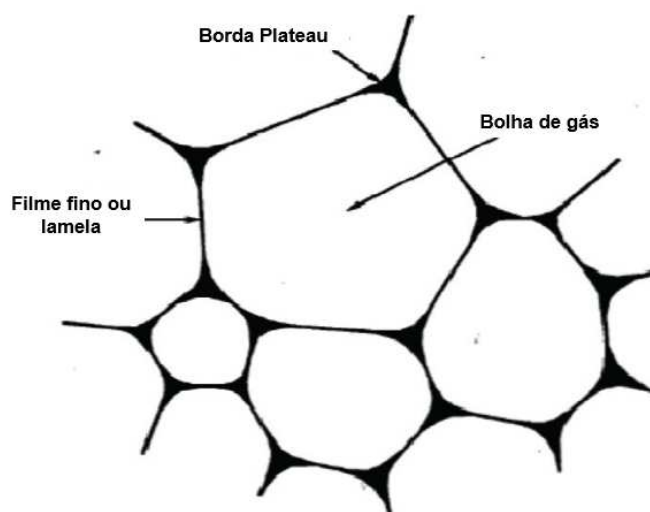


FIGURA 6 – ESTRUTURA DE UMA ESPUMA

FONTE: WILDE & CLARKE, (1996).

As espumas se comportam como sólidos elásticos a pequenas tensões e fluem como líquidos viscosos a grandes tensões (HÖHLER *et al.*, 1999; VERNON-CARTER *et al.*, 2001). Além do mais, já foi demonstrado que as espumas exibem valor de tensão limite, que é a quantidade mínima de tensão requerida para a espuma começar a fluir (a transição de tensão entre o comportamento sólido-elástico e líquido-viscoso), e este valor está relacionado com a força das estruturas que seguram a rede de bolhas do material (PERNELL *et al.*, 2000; KAMPF *et al.*, 2003; RAHARITSIFA *et al.*, 2006). Também tem sido afirmado, que o valor de tensão limite em espumas representa a energia necessária para que a rede de bolhas passe de um estágio estável para outro, sendo este relacionado com o conceito empírico de robustez da espuma (KHAN *et al.*, 1988; GENOVESE *et al.*, 2003).

Embora as geometrias tradicionais possam ser problemáticas para espumas, a metodologia tipo “vane” é estabelecida como uma maneira simples e precisa para a determinação do valor de tensão limite (PERNELL *et al.*, 2000). Essa técnica é particularmente tolerante a presença de bolhas relativamente grandes e os efeitos da depreciação das mesmas; apresentando sobretudo duas vantagens principais: insignificante compressão da espuma durante a análise, por causa da sua pequena área de contato que é projetada na vertical (Figura 7- A), e minimização dos efeitos de deslizamento na parede produzido pelo colapso de espuma (Figura 7- B) (PERNELL *et al.*, 2000; GENOVESE *et al.*, 2003; DAVIS & FOEGEDING,2004).

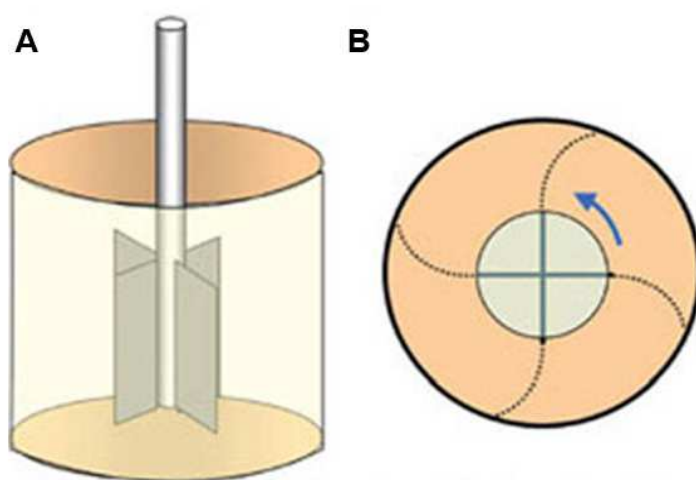


FIGURA 7 – GEOMETRIA DOS ROTORES TIPO “VANE”: VISTA LATERAL (A) E VISTA SUPERIOR DEMONSTRANDO O DESLOCAMENTO DA AMOSTRA PELO MOVIMENTO DOS ROTORES (B)

FONTE: MOONAY, (2011).

Enquanto a capacidade de formação de espuma e a estabilidade são propriedades comumente mensuradas para a caracterização de espumas, a medida do valor de tensão limite também é muito importante, por estar relacionado a estabilidade da espuma, o volume de ar incorporado e ao tamanho e formato das bolhas (HERZHAFT, 1999; PERNELL *et al.*, 2000). Como o tamanho das bolhas faz parte do entendimento da estabilidade e valor de tensão limite das espumas, a medida do seu tamanho é necessária para o entendimento destas propriedades e sua correlação com o processo de desestabilização das mesmas (DICKINSON *et al.*, 2002; RAIKOS *et al.*, 2007).

5.6. CINÉTICA E MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM

O fenômeno de secagem fundamenta-se na retirada de umidade do interior do alimento pelo ar de secagem (Figura 8), sendo necessário o conhecimento do conteúdo inicial e final (equilíbrio) de umidade do material, da relação da água com a estrutura sólida e do transporte da água do interior do material até a sua superfície (PARK *et al.*, 2001).

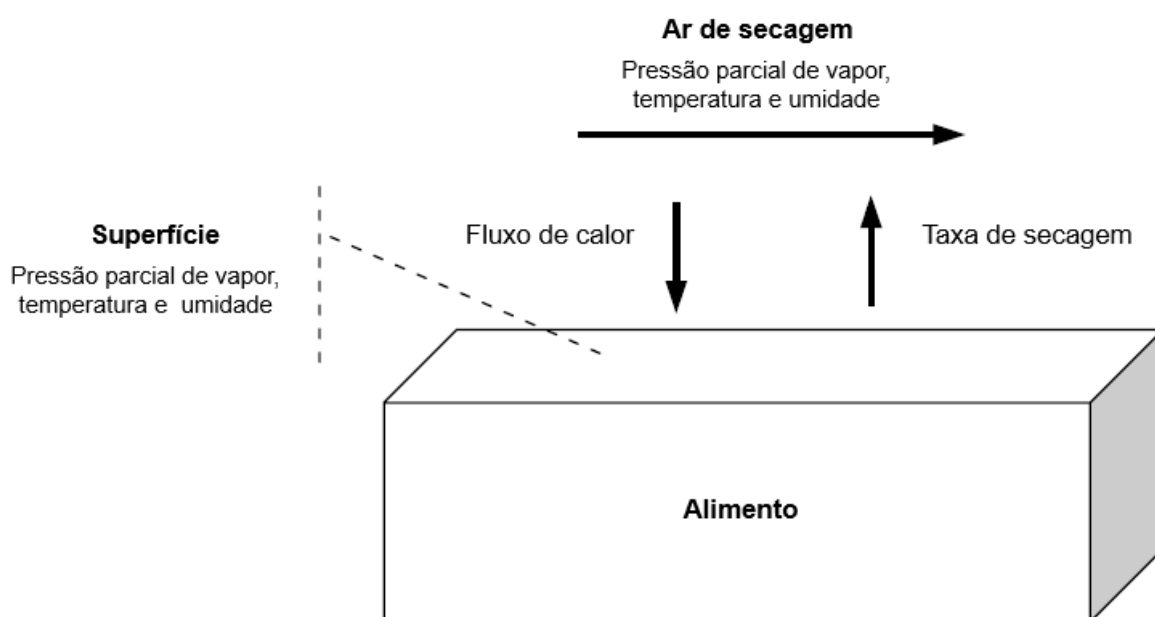


FIGURA 8 – ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E CALOR DURANTE SECAGEM À TAXA CONSTANTE

FONTE: ADAPTADO DE RATTI, (2009).

Quando um material atinge a condição de equilíbrio com o meio circundante, define-se o que conteúdo de umidade final seja seu conteúdo de umidade de equilíbrio. No processo de desidratação, isto representa o conteúdo de umidade do produto que é alcançado ao fim da secagem para uma dada condição de temperatura. Dados experimentais são usualmente representados como curvas de secagem ou curvas de taxa de secagem. As curvas de secagem se referem ao comportamento do material que foi seco, e são obtidas pelos dados de conteúdo de umidade de um produto submetido à secagem, em que a massa da amostra é registrada continuamente em função do tempo. Por sua vez, as curvas de taxa de secagem são obtidas derivando-se os dados de umidade em função do tempo de secagem (PARK *et al.*, 2007).

Na Figura 9, é possível visualizar o comportamento típico da curva de taxa de secagem de um material quando submetido à desidratação em condições constantes. No início, há um curto período de pré-aquecimento do material até que ocorra a evaporação da água em taxa suficiente para dissipar todo o calor transferido ao sólido pela corrente de ar e manter uma temperatura constante de evaporação (área A). Depois de atingida a temperatura de equilíbrio na superfície, se estabelece o período de taxa constante (área B), no qual a quantidade de água disponível no interior do sólido é grande, fazendo com que o movimento de água em seu interior ocorra com velocidade suficiente para manter as condições de saturação na superfície, e a evaporação continua nessa temperatura até a superfície da partícula não compensar a taxa de evaporação, quando a temperatura da partícula começa a aumentar devido à falta de água para evaporar, quando então se atinge o período de taxa de secagem decrescente (áreas C e D), em que a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa e o movimento do líquido do interior do sólido é insuficiente para manter a taxa de evaporação na superfície deste, portanto, a migração interna de água é o fator limitante, e também a temperatura da partícula aproxima-se daquela da corrente do ar com redução da evaporação e a transferência de calor entre o gás e a partícula cai (FELLOWS, 2000).

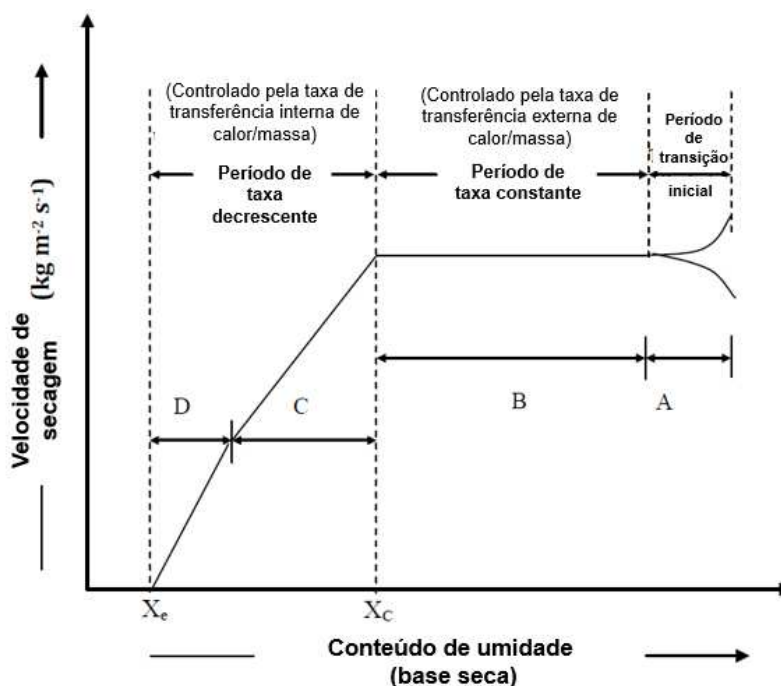


FIGURA 9 – CURVA TÍPICA DE TAXA DE SECAGEM SOB CONDIÇÕES CONSTANTES
 FONTE: ADAPTADO DE JANGAM *et al.*, (2010).

Durante a desidratação de materiais biológicos, o período de pré-aquecimento é insignificante em relação ao período total de secagem, enquanto que o período de taxa constante de secagem é dificilmente observado (JANGAN *et al.*, 2010).

A secagem é um processo térmico com alto consumo de energia onde a transferência de calor e massa ocorrem simultaneamente e seu comportamento está relacionado à predição do tempo de secagem, que representa um dado fundamental para o dimensionamento e a otimização de uma planta industrial envolvendo este processo (RATTI, 2001; SAHIN & DINCER, 2005; BRENNAN, 2006).

A cinética de secagem de alimentos é um fenômeno complexo que requer representações que simplifiquem a previsão do comportamento da secagem e também a otimização dos seus parâmetros (KARATHANOS & BELESSIOTIS, 1999). Desta forma, modelos matemáticos dos processos de secagem são utilizados para o desenho de novos sistemas, para a melhoria dos já existentes ou mesmo para o seu controle; podendo descrever o fenômeno e fornecer as informações necessárias sobre umidade e temperatura (ÖZDEMIR & DEVRES, 1999).

A maior parte dos modelos aplicados para secagem em camada de espuma, é baseada na teoria difusional (segunda Lei de Fick.), expressa na Equação 1,

considerando-se: difusividade de umidade constante, distribuição inicial de umidade uniforme e uma geometria em forma de placa plana infinita (CRANK, 1975).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (1)$$

Em que RU é a razão de umidade adimensional, D_{eff} é a difusividade efetiva ($m^2.s^{-1}$) e L é a espessura da placa plana (m).

Apesar da grande variedade de modelos matemáticos propostos para a descrição do processo de secagem de alimentos, os mais utilizados são os modelos de secagem em camada delgada, que têm a capacidade de descrever o fenômeno de uma maneira unificada, independentemente dos mecanismos de controle (AKPNAR *et al.*, 2003). Tais modelos podem ser classificados como teóricos, semi-teóricos (Page, Logarítmico, Dois termos, Dois termos exponencial, Aproximação por difusão, Henderson e Pabis, entre outros) e empíricos (Wang e Singh) (MCMINN, 2006; DOYMAZ, 2007).

O método empírico é um método de abordagem com base em dados experimentais e na análise adimensional. Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem; omitem os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm significado físico; conseqüentemente, não oferecem uma visão apurada dos processos importantes que ocorrem durante o fenômeno, embora descrevam as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (MADAMBA, 2003).

Por sua vez, muita ênfase tem se dado aos modelos semi-teóricos, que se baseiam, de modo geral, na Lei de Newton para resfriamento aplicada à transferência de massa. Quando se aplica esta lei, presume-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja apenas à superfície do produto (ZANOELO *et al.*, 2007).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na Usina Piloto B e laboratório de Análise de Alimentos, do Departamento de Engenharia Química, no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Campus de Curitiba.

O fluxograma (Figura 10) fornece uma visão geral sobre a execução do projeto.

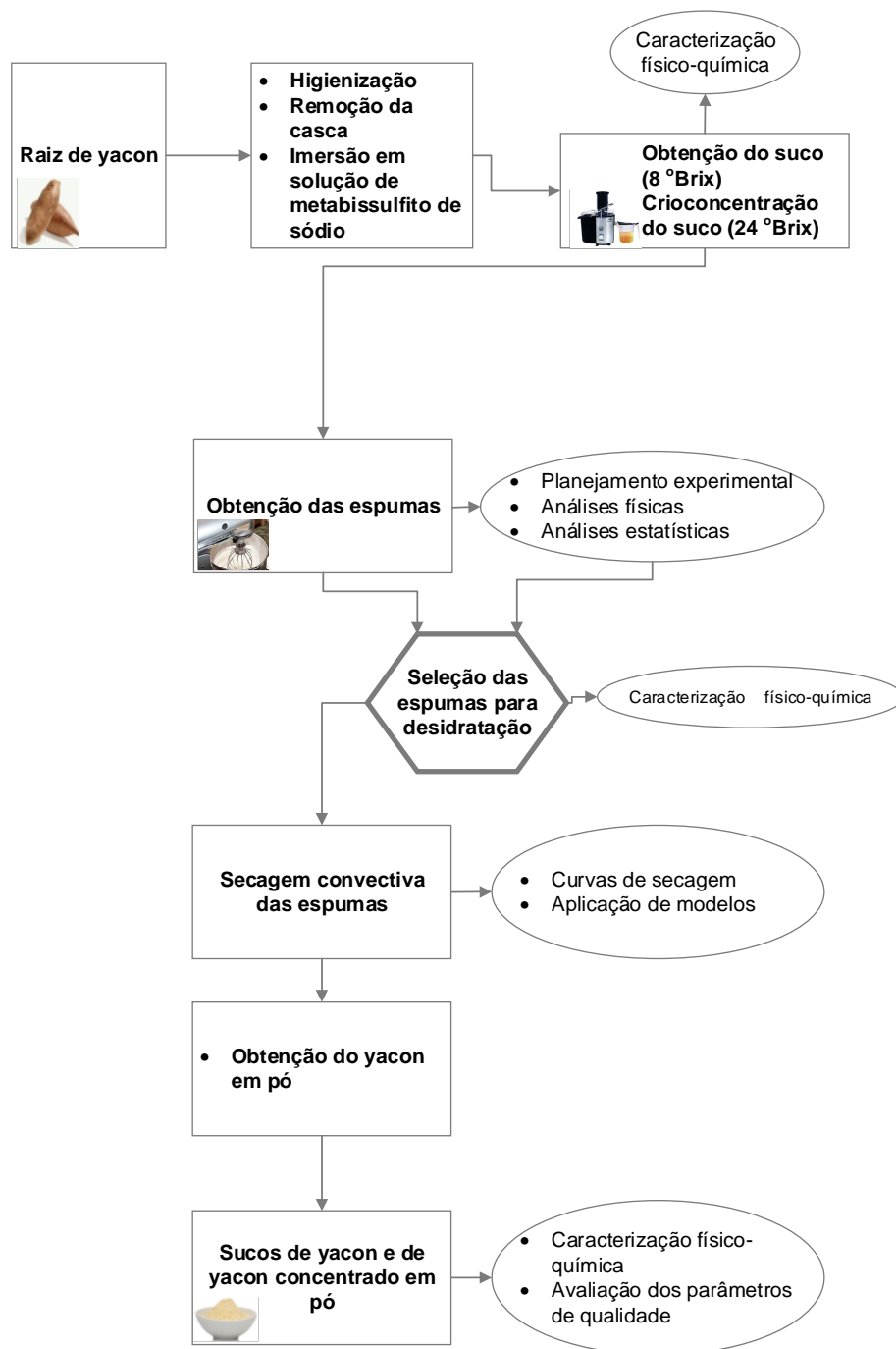


FIGURA 10 – FLUXOGRAMA GERAL DE EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Fonte: O autor (2015).

6.1. MATÉRIA-PRIMA

As raízes de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) foram adquiridas no Mercado Municipal de Curitiba-PR e armazenadas sob refrigeração (± 10 °C) até a extração do suco. A seleção da matéria-prima baseou-se no tamanho e textura das raízes, na cor e uniformidade da casca e na ausência de rachaduras, danos mecânicos e doenças aparentes.

6.2. EXTRAÇÃO E ARMAZENAMENTO DO SUCO DE YACON

As raízes tuberosas foram lavadas em água corrente, imersas em água clorada (2 ml.l⁻¹) por 15 minutos para higienização, descascadas com auxílio de descascador manual e então mergulhadas em solução aquosa de 500 mg.l⁻¹ de metabissulfito de sódio por 1 minuto afim de evitar o escurecimento enzimático durante o manuseio (VASCONCELOS *et al.*, 2010).

Para a extração do suco, as raízes foram processadas em centrífuga de alimentos, e à polpa obtida foi adicionado metabissulfito de sódio (300 mg.l⁻¹ de polpa) afim de limitar o escurecimento enzimático do suco durante as etapas de armazenamento, formação de espuma e desidratação (MAIA *et al.*, 2001).

O teor de sólidos solúveis totais (SST) foi medido com o auxílio de um refratômetro (RL3, PZO, Brochowska, Polônia). As amostras foram acondicionadas e armazenadas sob congelamento (-18°C) até o momento da elaboração das espumas.

Para avaliar a influência do teor de sólidos solúveis nas características da espuma, parte do suco foi concentrada por crioconcentração, através da metodologia modificada de Wiecheteck e colaboradores (2005) e depois armazenada sob as mesmas condições apresentadas para o suco. O teor de sólidos solúveis totais foi padronizado para o suco de yacon em 8°Brix e para o suco concentrado em 24°Brix.

6.3. PREPARO DAS ESPUMAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON

Para avaliar os efeitos da concentração de agente espumante (ovoalbumina ou emulsificante) e do tempo de batimento nas características das espumas de suco e suco concentrado de yacon, para cada agente espumante utilizado, um delineamento 2^2 com quatro repetições no ponto central foi aplicado (Tabela 2), com experimentos realizados em duplicata, totalizando 64 ensaios.

As espumas de suco de yacon (SY) e de suco de yacon concentrado (SYC) foram obtidas com a adição de ovoalbumina em pó (Cami, Mizumoto Alimentos Ltda, Guapirama, Paraná, Brasil), e de um composto emulsificante/estabilizante a base de monoglicerídeos de ácidos graxos e monoestearato de sorbitano (Emustab[®], Duas Rodas Industrial Ltda, Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil), nas concentrações pré estabelecidas. Após a homogeneização completa dos agentes, a solução foi submetida a incorporação mecânica de ar por batimento em uma batedeira doméstica (360W de potência) em velocidade máxima, por tempos pré-determinados. As concentrações máximas e mínimas de agentes espumantes/estabilizantes e os tempos de batimento foram obtidos através de testes preliminares (dados não publicados).

Neste trabalho, cada tratamento foi identificado pelo agente espumante, seguido de sua concentração e do tempo de incorporação de ar. Por exemplo, OVO-10-5, significa uma espuma formada por 10% de ovoalbumina e 5 minutos de batimento, ou EMU-10-20, formada por 10% de emulsificante e 20 minutos de batimento.

TABELA 2 – MATRIZ DO PLANEJAMENTO FATORIAL PARA ELABORAÇÃO DAS ESPUMAS

Ensaio	Fase líquida	Agente espumante	Concentração (%)	Tempo de batimento (minutos)
01	Suco de yacon	Ovoalbumina	10	5
02	Suco de yacon	Ovoalbumina	20	5
03	Suco de yacon	Ovoalbumina	15	12,5
04	Suco de yacon	Ovoalbumina	15	12,5
05	Suco de yacon	Ovoalbumina	15	12,5
06	Suco de yacon	Ovoalbumina	15	12,5
07	Suco de yacon	Ovoalbumina	10	20
08	Suco de yacon	Ovoalbumina	20	20
09	Suco de yacon	Emulsificante	5	5
10	Suco de yacon	Emulsificante	5	20
11	Suco de yacon	Emulsificante	7,5	12,5
12	Suco de yacon	Emulsificante	7,5	12,5
13	Suco de yacon	Emulsificante	7,5	12,5
14	Suco de yacon	Emulsificante	7,5	12,5
15	Suco de yacon	Emulsificante	5	20
16	Suco de yacon	Emulsificante	10	20
17	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	10	5
18	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	20	5
19	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	15	12,5
20	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	15	12,5
21	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	15	12,5
22	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	15	12,5
23	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	10	20
24	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	20	20
25	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	5	5
26	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	5	20
27	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	7,5	12,5
28	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	7,5	12,5
29	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	7,5	12,5
30	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	7,5	12,5
31	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	5	20
32	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	10	20

FONTE: O autor (2015).

6.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E DE ESTABILIDADE DAS ESPUMAS

Além da caracterização e avaliação da influência das variáveis estudadas nas propriedades das espumas formadas, as análises permitiram a escolha daquelas que seguiram para os ensaios de desidratação convectiva por camada de espuma.

6.4.1. Densidade

A densidade da espuma foi determinada pela medida do seu peso e calculada pela relação da sua massa pelo volume, de acordo com a metodologia descrita por Oguntunde e Adejo (1992).

6.4.2. Volume da fração de ar

A partir do valor da densidade (ρ_E), o volume da fração de ar (\emptyset) de cada espuma foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$\emptyset = 1 - \frac{\rho_E}{\rho_L} \quad (2)$$

Sendo esta equação válida se a densidade do ar é negligenciada em relação à densidade do líquido (ρ_L) (RAHARITSIFA *et al.*, 2006). Para este trabalho, a densidade estabelecida para o suco foi de $1,054 \text{ g.cm}^{-3}$ e para o suco concentrado de $1,122 \text{ g.cm}^{-3}$.

6.4.3. Percentual de expansão

O percentual de expansão ou “*overrun*” de cada espuma foi calculado a partir dos valores de densidade dos sucos e das suas respectivas espumas, conforme a Equação 3 (CRUZ, 2013).

$$\% \text{ expansão} = \frac{\left(\frac{1}{\rho \text{ espuma}} - \frac{1}{\rho \text{ suco}} \right)}{\frac{1}{\rho \text{ suco}}} \times 100 \quad (3)$$

6.4.4. Estabilidade física

O teste de estabilidade consistiu em avaliar o volume de líquido drenado por um período de 120 minutos para cada espuma (RAHARITSIFA *et al.*, 2006).

O índice de estabilidade foi calculado através da Equação 4.

$$\text{Índice de estabilidade} = \frac{V \text{ espuma}}{V_0 \text{ espuma}} \quad (4)$$

Onde, o volume da espuma (v espuma) é calculado pela diferença entre o volume inicial da espuma e o líquido drenado na proveta e v_0 corresponde ao volume inicial da espuma no tempo 0 (MARINOVA *et al.*, 2009).

6.4.5. Ensaio rotacional de valor de tensão limite

O teste de valor de tensão limite foi realizado através da reometria rotacional com rotores do tipo “*vane*” e com releitura em 10 e 20 minutos (PERNELL *et al.*, 2000; LUCK *et al.*, 2002; DAVIS & FOEGEDING, 2004; YANG *et al.*, 2009). Logo após o

tempo de batimento, cada espuma foi cuidadosamente transferida para béqueres de vidro (± 50 ml) e estes foram encaminhados ao reômetro Brookfield R/S plus (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Middleboro, Massachusetts, Estados Unidos). Os rotores tipo “vane” foram inseridos na espuma até estarem alinhados com a superfície da espuma; o rotor iniciou o movimento com velocidade de 0,3 rpm por um período de 120 segundos, enquanto o torque produzido pelo seu movimento era mensurado. O valor de tensão limite (τ) foi calculado a partir do valor de torque máximo (M_0), através da Equação (5).

$$\tau = \frac{M_0}{\left[\frac{h}{d} + \frac{1}{6}\right] \left(\frac{\pi d^3}{2}\right)} \quad (5)$$

Onde h corresponde ao comprimento do “vane” (40 mm) e d ao diâmetro (20 mm).

6.4.6. Análise por imagem

A análise por imagem das espumas foi realizada em microscópio óptico invertido Axio Vision LE-Observer D1 (Carl Zeiss Group, Aalen, Jena, Alemanha), acoplado a uma câmera AxioCam MR3. Cada amostra foi preparada, colocando-se a espuma recém preparada sobre uma lâmina de vidro e cobrindo-a com lamínula. Uma área da espuma de 1050 mm x 1450 mm foi observada com uma lente objetiva (10x) e fotografada nos tempos 0, 10 e 20 minutos (RAHARITSIFA *et al.*, 2006). Os parâmetros número e diâmetro das bolhas foram obtidos através da análise das imagens pelo software AxioVision SE64 (Carl Zeiss Microscopy, Tornwood, Nova Iorque, Estados Unidos).

6.5. ENSAIOS DE SECAGEM CONVECTIVA

Para avaliar os efeitos da temperatura do ar de secagem e da espessura da camada a ser desidratada no comportamento das curvas de secagem das espumas de suco e suco concentrado de yacon formadas por ovoalbumina e emulsificante, para cada agente aplicado, um delineamento 2^2 com quatro repetições no ponto central e em duplicata, totalizando 64 experimentos, como mostra a Tabela 3.

Imediatamente após a incorporação de ar, as espumas foram dispostas em leitos de metal não perfurado, com espessuras variando entre 0,5, 1,0 e 1,5 cm (Figura 11) e então encaminhadas para secagem (Figura 12) em estufa convectiva (Fabbe-Primar, São Paulo, Brasil), à temperatura controlada (50 °C, 60 °C e 70 °C) e velocidade do ar constante (4 m. s⁻¹), aferida por um anemômetro (Testo 405, Testo AG, Lenzkirch, Alemanha).

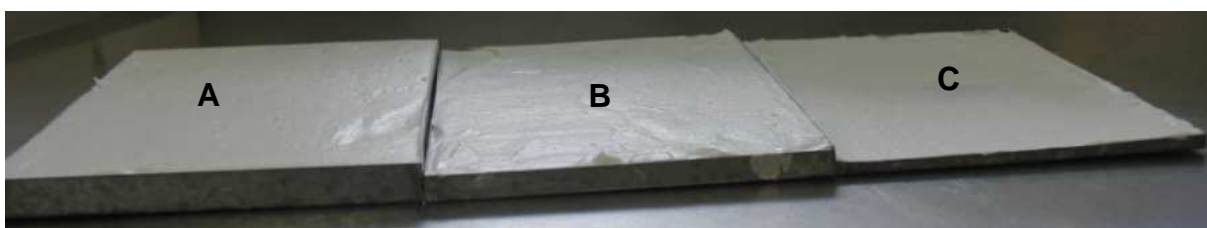


FIGURA 11- ESPUMAS DE SUCO DE YACON COM EMULSIFICANTE DISPOSTAS NOS LEITOS DE METAL COM ESPESSURAS DE 1,5 CM (A), 1,0 CM (B) E 0,5 CM (C)

FONTE: O autor (2015).

TABELA 3 – MATRIZ DO PLANEJAMENTO FATORIAL PARA DESIDRATAÇÃO DAS ESPUMAS

Ensaio	Espuma	Agente espumante	Espessura da camada (cm)	Temperatura do ar de secagem (°C)
01	Suco de yacon	Ovoalbumina	0,5	50
02	Suco de yacon	Ovoalbumina	1,5	50
03	Suco de yacon	Ovoalbumina	1,0	60
04	Suco de yacon	Ovoalbumina	1,0	60
05	Suco de yacon	Ovoalbumina	1,0	60
06	Suco de yacon	Ovoalbumina	1,0	60
07	Suco de yacon	Ovoalbumina	0,5	70
08	Suco de yacon	Ovoalbumina	1,5	70
09	Suco de yacon	Emulsificante	0,5	50
10	Suco de yacon	Emulsificante	1,5	50
11	Suco de yacon	Emulsificante	1,0	60
12	Suco de yacon	Emulsificante	1,0	60
13	Suco de yacon	Emulsificante	1,0	60
14	Suco de yacon	Emulsificante	1,0	60
15	Suco de yacon	Emulsificante	0,5	70
16	Suco de yacon	Emulsificante	1,5	70
17	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	0,5	50
18	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	1,5	50
19	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	1,0	60
20	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	1,0	60
21	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	1,0	60
22	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	1,0	60
23	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	0,5	70
24	Suco de yacon concentrado	Ovoalbumina	1,5	70
25	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	0,5	50
26	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	1,5	50
27	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	1,0	60
28	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	1,0	60
29	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	1,0	60
30	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	1,0	60
31	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	0,5	70
32	Suco de yacon concentrado	Emulsificante	1,5	70

FONTE: O autor (2015).

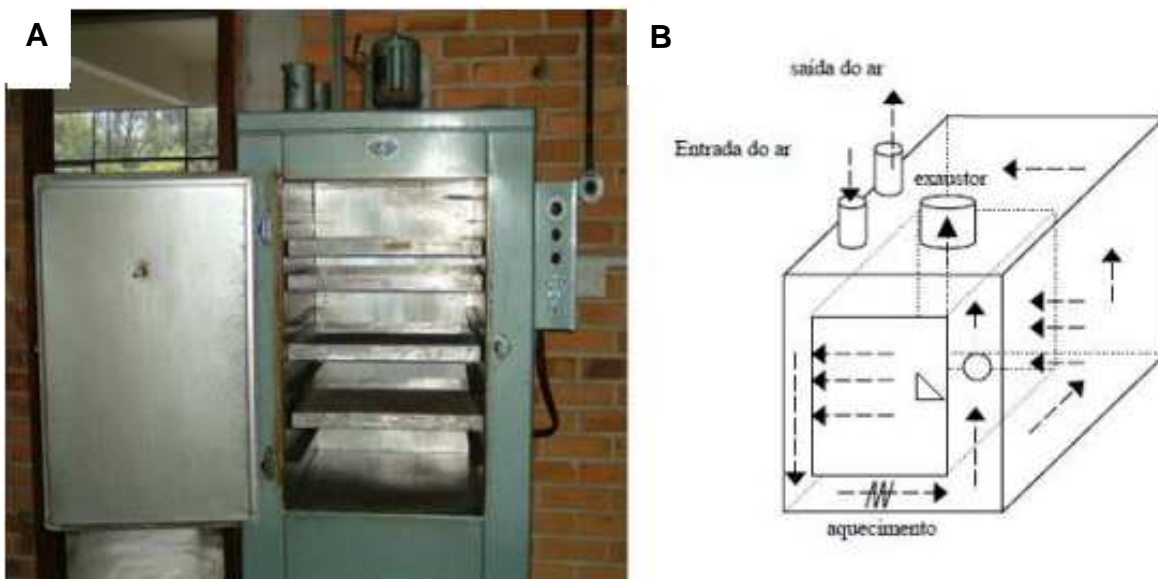


FIGURA 12- APARATO EXPERIMENTAL UTILIZADO NA SECAGEM CONVECTIVA: SECADOR DE BANDEJAS (A); ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO MESMO (B)

FONTE: MOURA, (2004)

A perda de umidade foi determinada por pesagem das amostras a cada 15 minutos, em balança eletrônica, tendo como critério para a finalização do processo a obtenção de massas iguais em três pesagens consecutivas. Todos os experimentos foram realizados em duplicatas, com triplicata em cada condição, sendo os valores médios utilizados.

Atingido o término do processo, a camada seca foi removida dos leitos de secagem, triturada com auxílio de um almofariz e pistilo e então peneirada para que as partículas estivessem padronizadas entre 250-500 μm para a realização das análises subsequentes (BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 2005).

As amostras trituradas foram acondicionadas em embalagens de polietileno, submetidas ao vácuo e armazenadas em freezer doméstico ($\pm 6^\circ\text{C}$) até o momento de sua utilização.

6.6. CINÉTICA E MODELAGEM DOS DADOS DE SECAGEM

6.6.1. Cálculo da razão de umidade

Os dados obtidos durante o acompanhamento da perda de umidade das espumas nas diferentes condições de secagem foram convertidos para razão de umidade (RU), através da Equação 6.

$$RU = \frac{(U - U_e)}{(U_o - U_e)} \quad (6)$$

Onde U é o conteúdo de umidade no tempo t; U_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio e U_o é a umidade inicial das espumas, todos em base seca.

6.6.2. Modelos de secagem

Para a seleção de um modelo adequado para a descrição do processo de secagem por camada de espuma de suco de yacon, as curvas de secagem obtidas foram ajustadas a 9 modelos de secagem em camada delgada. As equações de cada modelo de relação de umidade estão presentes na Tabela 4. As análises de regressão não-linear foram realizadas utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South America, Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos). Os ajustes dos modelos matemáticos testados foram avaliados por meio da comparação dos valores de coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado (ϕ^2) e raiz do quadrado médio residual (RQMR), de acordo com as Equações 7 e 8 respectivamente.

$$\phi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{\text{exp},i} - RU_{\text{pre},i})^2}{(N - n)} \quad (7)$$

$$RQMR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{pre,i})^2}{N}} \quad (8)$$

Em que $RU_{exp,i}$ é a i-ésima razão de umidade experimental; $RU_{pre,i}$, a i-ésima razão de umidade predita pelo modelo ajustado; N, o número de observações; e n, o número de parâmetros do modelo.

Os valores de RQMR representam a habilidade do modelo de se ajustar aos pontos, é frequentemente utilizada para medir a diferença entre os valores preditos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente. Essas diferenças individuais também atendem pelo nome de resíduos, e a RQMR serve para agrega-los em uma simples medida com poder preditivo. O melhor modelo, aquele que melhor se ajusta, consiste naquele que apresentar o menor valor de RQMR. Já para a escolha do mais apropriado, se deve escolher aquele com maior valor de R^2 e menor valor de ϕ^2 (ROBERTS *et al.*, 2008).

TABELA 4 – MODELOS DE SECAGEM EM CAMADA DELGADA E SUAS EQUAÇÕES

Modelo	Equação	Referências
Newton	$RU = \text{Exp}(-kt)$	LIU & BAKKER-ARKEMA, 1997
Henderson e Pabis	$RU = a \text{Exp}(-kt)$	PARK <i>et al.</i> , 2002
Logarítmico	$RU = a \text{Exp}(-kt) + c$	YALDIZ <i>et al.</i> , 2001
Page	$RU = \text{Exp}(-kt^n)$	ZHANG & LITCHFIELD, 1991
Midilli modificado	$RU = \text{Exp}(-kt^c) + (bt)$	MIDILLI <i>et al.</i> , 2002
Dois termos	$RU = a \text{Exp}(-kt) + b \text{Exp}(-nt)$	HENDERSON, 1974
Dois termos exponencial	$RU = a \text{Exp}(-kt) + (1-a) \text{Exp}(-kat)$	SHARAF-ELDEN <i>et al.</i> , 1980
Aproximação por difusão	$RU = a \text{Exp}(-kt) + (1-a) \text{Exp}(-kbt)$	YALDIZ & ERTEKIN, 2001
Wang e Singh	$RU = 1 + (at) + (bt^2)$	WANG & SINGH, 1978

* RU é a razão de umidade; k é constante de secagem por minuto; a, b, c, n são os coeficientes dos modelos e t é o tempo de secagem, em minutos.

FONTE: O autor (2015).

6.6.3. Cálculo da difusividade efetiva

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 9, aos dados experimentais da secagem das espumas de suco de yacon.

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

Onde RU é a razão de umidade, D_{eff} o coeficiente de difusão efetivo ($m^2 \cdot s^{-1}$), t o tempo (s) e L a espessura da camada de espuma (m).

A Equação 9 é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando-se a camada de espuma como uma placa plana, podendo ser reescrita como exposto na Equação 10.

$$D_{eff} = \frac{\ln RU - \ln \frac{8}{\pi^2}}{\left(\frac{\pi^2 t}{4L^2}\right)} \quad (10)$$

6.7. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SUCOS, ESPUMAS E SUCOS EM PÓ

A atividade de água foi feita por medida direta no equipamento Aqualab (Pullman, EUA), conforme especificações do fabricante.

A coloração foi determinada por colorimetria, em colorímetro (Color Quest II Spera – Hunter Lab, Reston, VA), com leitura direta dos valores. A cor então foi determinada pela escala de cores internacional (CIE – *Commission Internationale de l'Éclairage*) que utiliza as coordenadas: L^* que representa a luminosidade variando do branco (100) ao preto (0); a^* que representa a transição da cor verde ($-a^*$) para a

cor vermelha (+a*) e b* que representa a transição da cor azul (-b*) para a cor amarela (+b*).

A composição centesimal das amostras foi realizada segundo técnicas padronizadas pela AOAC (2000). A análise de proteínas foi realizada pelo método da digestão Kjeldahl, sendo o teor proteico calculado pela multiplicação do teor de nitrogênio pelo fator 6,225. A avaliação de lipídeos foi feita pela extração contínua em aparelho do tipo Soxhlet e a análise de cinzas ou resíduo mineral fixo foi feita por perda de massa através de incineração da amostra em forno mufla a 550°C. A umidade foi determinada por análise gravimétrica, em estufa regulada em 105°C. Os carboidratos totais foram calculados por diferença.

6.8. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SUCOS DE YACON EM PÓ

Afim de avaliar a influência das variáveis utilizadas no processo de secagem, foram realizadas análises sobre as propriedades físicas dos sucos em pó.

6.8.1. Solubilidade em água

Para determinação da solubilidade do pó de yacon em água, amostras de 1 g de pó foram diluídas por adição de 100 ml de água destilada sob agitação por 5 minutos. As soluções foram então centrifugadas a 2600 rpm por 5 minutos e alíquotas de 20,0 ml do sobrenadante transferidas para pesa-filtros previamente tarados e submetidas à secagem em estufa a 70°C. O percentual de solubilidade foi determinado a partir da diferença entre o peso final e o peso inicial do material no pesa-filtros, conforme a Equação 11 (FALADE & OKOCHA, 2012).

$$Solubilidade = \left[\frac{(m_{pf + amostra} - m_{pf \text{ vazio}})x(100 + m_{pó})}{(m_{amostra}xm_{pó})} \right] \quad (11)$$

Onde, $m_{(pf + amostra)}$ é a massa do pesa-filtro com a amostra do sobrenadante (g); $m_{(pf \text{ vazio})}$ é a massa do pesa-filtro vazio (g); $m_{pó}$ é a massa do pó que foi diluída (g) e $m_{amostra}$ é a massa da amostra sobrenadante (g)

6.8.2. Índice de absorção de água (IAA)

A capacidade de absorção de água foi avaliada pelo método adaptado de Sharma *et al.* (2011). Em um tubo de centrífuga com tampa foram introduzidos 1,25g de amostra, adicionados 15 ml de água e após agitação por 30 minutos, a solução foi centrifugada a 3.000 rpm durante 10 minutos. O líquido sobrenadante foi recolhido em pesa-filtro tarado e colocado na estufa a 105°C por 24 horas. O pó hidratado remanescente no tubo da centrífuga foi pesado. Determinou-se o índice de absorção de água (IAA) a partir do resíduo da evaporação do sobrenadante segundo a Equação 12.

$$\text{Índice de absorção de água (IAA)} = \frac{m_{rc}}{m_a - m_{re}} \quad (12)$$

Onde m_{rc} é a massa do resíduo da centrifugação (g); m_a é a massa da amostra (g) e m_{re} é a massa do resíduo da evaporação (g).

6.8.3. Densidade aparente

A densidade aparente (ρ_a) das partículas dos sucos em pó foi medida de acordo com a metodologia adaptada de Goula e Adamopoulos (2008). Aproximadamente 5 g do pó foram livremente dispensados no interior de uma proveta

graduada com capacidade de 25 ml (escala de 1 ml). A proveta e seu conteúdo foram manualmente batidos por repetidos movimentos verticais a uma altura de aproximadamente 14 ± 2 cm até que não fosse observada diferença no volume do pó. Através da relação entre a massa de pó conhecida (± 5 g) e o volume visualizado na proveta, o valor da densidade aparente foi calculado (Equação 13).

$$\rho_a = \frac{m_s}{v_s} \quad (13)$$

Onde: ρ_a corresponde à densidade aparente ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); m_s à massa do sólido (g) e v_s o volume ocupado pelo sólido (cm^3).

6.8.4. Densidade absoluta

A densidade absoluta (ρ_{abs}) das partículas dos sucos de yacon em pó foi calculada a partir da adaptação do método de Caparino *et al.* (2012). Aproximadamente 2,5 g do pó foram colocados em uma proveta vazia e o volume total foi preenchido com uma quantidade controlada de tolueno (utilizado por sua habilidade de penetração dos poros extremamente conectados à superfície do material sem haver a dissolução do mesmo). O valor da densidade absoluta foi calculado a partir da Equação 14.

$$\rho_{abs} = \frac{m_s}{v_t} \quad (14)$$

Onde: ρ_{abs} corresponde à densidade absoluta das partículas ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); m_s à massa do sólido (g) e v_t o volume de tolueno utilizado (cm^3).

6.8.5. Porosidade intragranular

A porosidade intragranular (ε) foi determinada pela razão entre a densidade absoluta das partículas (ρ_{abs}) e a densidade aparente (ρ_a) através da Equação 15 (CAPARINO *et al.*, 2012).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} \quad (15)$$

Onde ε corresponde à porosidade intragranular, ρ_a corresponde à densidade aparente dos sólidos do pó (g.cm^{-3}) e ρ_{abs} à densidade absoluta (g.cm^{-3}).

6.8.6. Higroscopicidade

O percentual de higroscopicidade foi determinado de acordo com metodologia proposta por Tonon e colaboradores (2008), com algumas adaptações.

Aproximadamente 10 g de cada amostra foram colocadas em recipientes abertos e então triplicatas de cada amostra foram dispostas em três diferentes dessecadores contendo solução saturada de cloreto de sódio (aproximadamente 75,5% de umidade) e armazenadas por 07 dias em estufas do tipo BOD reguladas a $\pm 25^\circ\text{C}$.

O percentual de higroscopicidade (% HG) de 1g de umidade adsorvida por 100g de matéria seca ($\text{g. } 100 \text{ g}^{-1}$) foi calculado a partir da Equação 16.

$$HG = \frac{\Delta m / (m + m_1)}{1 + (\Delta m / m)} \quad (16)$$

Onde Δm corresponde ao aumento do peso do pó após alcançado o equilíbrio; m à massa inicial do pó e m_1 ao conteúdo de água livre do pó antes da exposição à umidade do ar (% base úmida).

6.9. PARÂMETROS DE COR

A análise colorimétrica dos pós foi realizada a partir da metodologia apresentada no item 6.7.

6.10. MICROESTRUTURA

A morfologia das partículas foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os pós foram fixados em suportes com fita dupla face de cobre, metalizados a vácuo com partículas de ouro e então visualizados com microscópio eletrônico de varredura Vega3 LMU (Tescan Orsay Holding, Brno, República Tcheca), operando a uma pressão controlada de 15 kV. As micrografias foram fotografadas a magnificações de 250 e 1300 vezes.

6.11. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para a avaliação da influência das variáveis nas características estudadas nas espumas formadas e posteriormente nos pós desidratados, quando diferenças estatísticas foram detectadas pela ANOVA unifatorial, a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) foi aplicada para avaliar o efeito das variáveis independentes nas respostas analíticas. Os efeitos isolados dos fatores e sua interação linear bem como sua significância estatística foram calculados. A Equação 17 mostra a relação dos fatores para cada variável de resposta.

$$E(y) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 \quad (17)$$

Onde b_0 é uma constante, b_1 e b_2 são os coeficientes da regressão que evidenciam os efeitos isolados dos fatores e b_3 é o coeficiente de regressão da

interação entre as variáveis aplicadas. Apenas coeficientes de regressão que se mostraram significativos quando a ANOVA foi aplicada é que permaneceram no modelo final apresentado.

A qualidade estatística dos modelos propostos foi avaliada pela porcentagem de variabilidade explicada pela equação de regressão linear múltipla (R^2), pelo coeficiente de determinação ajustado aos dados experimentais (R^2_{adj}) e pela significância do modelo (p-valor) (GRANATO *et al.*, 2014).

A comparação dos valores médios entre os tratamentos foi realizada análise de variância ANOVA unifatorial, com teste de Tukey ($p < 0,05$).

A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada para a avaliação dos dados obtidos sobre o valor de tensão limite/ número e diâmetro das bolhas das espumas de suco e suco concentrado de yacon, durante os tempos 0, 10 e 20 minutos de repouso, bem como na avaliação da influência da variação dos parâmetros de secagem sobre a cor dos sucos em pó. A análise se baseou em correlações lineares e as variâncias foram computadas como soma dos quadrados/(n-1). Autovalores acima de 1,0 foram usados para explicar a projeção das amostras no fator-plano (CP1 x CP2) e fatores acima de 0,55 foram usados para projeção das variáveis (SOUZA & POPPI, 2012).

Para cada experimento as análises foram realizadas em triplicata. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South America, Toulssa, Oklahoma, Estados Unidos).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E DE ESTABILIDADE DAS ESPUMAS

7.1.1. Capacidade de formação, densidade, percentual de expansão da espuma e volume da fração de ar

O suco e o suco concentrado de yacon (SY e SYC) não apresentaram capacidade de formação de espuma sem a adição de um agente espumante e/ou estabilizante. Algumas matrizes alimentares não precisam da adição de tais agentes para a formação de espuma, mas isso se deve a composição específica de cada alimento. Durante o estudo com quiabo de Falade e Omojola (2010) não houve a necessidade de adição de qualquer agente pela composição rica em proteínas das sementes desse alimento. Já para a secagem de inhame, Falade e Onyeoziri (2012) relataram obrigatória a adição de monoestearato de glicerila (MSG) como agente estabilizante.

Pelo fato do yacon apresentar uma composição pobre em proteínas e rica em água e carboidratos, neste trabalho foi indispensável a adição de agentes para promover a formação e estabilidade das suas espumas. A clara de ovo exerce sua propriedade espumante por ação das suas proteínas, que se movem através da fase aquosa e são espontaneamente adsorvidas pela interface líquido-gasosa onde o filme viscoelástico é subsequentemente formado. O resultado da adsorção da proteína é a redução da tensão superficial, que melhora a capacidade de formação de espuma, além da capacidade de encapsular e reter o ar incorporado (DAVIS *et al.*, 2004). Já o agente emulsificante/estabilizante composto por monoglicerídeos de ácidos graxos e monoestearato de sorbitano diminui a tensão superficial, ajudando na formação da espuma e aumentando sua estabilidade cinética (CAMPBELL & MOUGEOT, 1999).

A densidade das espumas é uma propriedade muito importante em se avaliar, pois ela exerce grande influência na estabilidade bem como na eficiência do processo de desidratação. Espumas com menor densidade apresentam uma maior estabilidade

e também facilitam a retirada de água durante a secagem, podendo assim ser desidratadas a menores conteúdos de umidade mesmo a temperaturas mais brandas (KUDRA & RATTI, 2008).

Na Tabela 5, é visível que os dois agentes utilizados, em todas as concentrações e tempos de batimento, exerceram redução na densidade das espumas. A densidade das espumas de suco de yacon variou de $0,16 \text{ g.cm}^{-3}$ (EMU-10-20) a $0,83 \text{ g.cm}^{-3}$ (OVO-10-5) e para as espumas de suco concentrado de yacon de $0,18 \text{ g.cm}^{-3}$ (OVO-20-20) a $0,58 \text{ g.cm}^{-3}$ (OVO-10-5).

O valor da densidade de uma espuma é geralmente utilizado para a avaliação da influência das propriedades do método de obtenção da espuma, sendo esta propriedade relacionada com o rendimento (*“overrun”*) e volume de fração de ar. Quanto maior a quantidade de ar incorporado durante o batimento, menor a densidade da espuma; quanto maior o volume da fração de ar presente na espuma, maior o *“overrun”* (FALADE *et al.*, 2003).

Durante estudo com espumas de mamão destinadas a secagem por camada de espuma, Kandasamy e colaboradores (2012) obtiveram valores de densidade 0,65, 0,58 e $0,52 \text{ g.cm}^{-3}$ com concentrações de ovoalbumina entre 10, 15 e 20% respectivamente. Os valores encontrados neste trabalho também estão próximos aos preconizados por Hart e colaboradores (1963) que estabeleceram que para fins de secagem por camada de espuma, as espumas devem apresentar valores de densidade entre 0,2 e $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$, pois aquelas com menor densidade permanecem estáveis por um maior período, reduzindo assim o tempo de secagem.

TABELA 5 – DENSIDADE, “*OVERRUN*” E VOLUME DA FRAÇÃO DE AR PARA OS DIFERENTES TRATAMENTOS DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON E DE SUCO CONCENTRADO DE YACON

Tratamento	Espumas de suco de yacon			Espumas de suco concentrado de yacon		
	Densidade (g.cm ⁻³)	<i>Overrun</i> (%)	Volume da fração de ar	Densidade (g.cm ⁻³)	<i>Overrun</i> (%)	Volume da fração de ar
OVO-10-5	0,83 ±	25,75 ±	0,20 ±	0,58 ±	94,40 ±	0,48 ±
	0,01 ^a	1,32 ^d	0,01 ^d	0,01 ^a	1,71 ^h	0,01 ^h
OVO-20-5	0,63 ±	66,91 ±	0,40 ±	0,45 ±	147,49 ±	0,59 ±
	0,01 ^b	1,82 ^c	0,01 ^c	0,01 ^c	3,99 ^f	0,01 ^f
OVO-15-12,5	0,33 ±	215,14 ±	0,68 ±	0,26 ±	326,41 ±	0,76 ±
	0,01 ^f	6,04 ^f	0,01 ^f	0,01 ^g	5,06 ^b	0,01 ^b
OVO-10-20	0,44 ±	138,46 ±	0,58 ±	0,36 ±	210,60 ±	0,68 ±
	0,01 ^e	0,60 ^g	0,01 ^g	0,01 ^e	6,21 ^d	0,01 ^d
OVO-20-20	0,25 ±	318,26 ±	0,76 ±	0,18 ±	506,54 ±	0,83 ±
	0,01 ^c	10,86 ^b	0,01 ^b	0,01 ^g	8,20 ^g	0,01 ⁱ
EMU-5-5	0,43 ±	147,10 ±	0,60 ±	0,53 ±	109,97 ±	0,52 ±
	0,01 ^e	3,38 ^g	0,01 ^g	0,01 ^b	2,72 ^h	0,01 ^g
EMU-10-5	0,34 ±	213,24 ±	0,68 ±	0,40 ±	179,50 ±	0,64 ±
	0,01 ^f	6,25 ^f	0,01 ^f	0,01 ^d	1,65 ^e	0,01 ^e
EMU-7,5-12,5	0,22 ±	376,85 ±	0,79 ±	0,25 ±	351,61 ±	0,78 ±
	0,01 ^g	6,87 ^e	0,03 ^e	0,01 ^h	1,21 ^a	0,01 ^a
EMU-5-20	0,22 ±	375,79 ±	0,79 ±	0,34 ±	239,07 ±	0,70 ±
	0,01 ^g	3,19 ^e	0,01 ^e	0,01 ^f	0,79 ^c	0,01 ^c
EMU-10-20	0,16 ±	566,43 ±	0,85 ±	0,19 ±	498,04 ±	0,83 ±
	0,01 ^d	20,17 ^a	0,01 ^a	0,01 ^g	3,84 ^g	0,01 ⁱ

Os resultados estão apresentados como a média das triplicatas ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

FONTE: O autor (2015).

Através da aplicação da MSR para as respostas densidade, “*overrun*” e volume da fração de ar, foram obtidos modelos, que estão apresentados na Tabela 6, lembrando que permaneceram apenas os coeficientes de regressão que se mostraram significativos quando o teste ANOVA foi aplicado. O coeficiente de determinação ou explicação R^2 quantifica a qualidade do ajuste, pois fornece uma medida da proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas, sendo que ele pode variar de 0 a 100% (RODRIGUES & IEMMA, 2005). Neste estudo, todos os modelos apresentam valores de R^2 e R^2 -

ajustado maiores que 0,70, ou seja, os modelos apresentados conseguem explicar mais de 70% da variabilidade das respostas. Observou-se também que a falta de ajuste para todas as respostas não foi significativa ($p > 0,05$) indicando que os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais, podendo ser utilizados para fins preditivos.

TABELA 6 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA AS RESPOSTAS DENSIDADE, “OVERRUN” E VOLUME DA FRAÇÃO DE AR, DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON E SUCO CONCENTRADO DE YACON COM OVOALBUMINA OU EMULSIFICANTE COMO AGENTE ESPUMANTES

Resposta	Fase líquida	Agente espumante	Modelo matemático	R ²	R ² ajustado	p-valor (modelo)
Densidade	SY	Emulsificante	$Y = 0,5714 - 0,0197x_1 - 0,0155x_2 + 0,0004x_1 \cdot x_2$	0,871	0,859	$p < 0,001$
	SY	Ovoalbumina	$Y = 1,0905 - 0,0197x_1 - 0,0258x_2$	0,765	0,751	$p < 0,001$
	SYC	Emulsificante	$Y = 0,7067 - 0,0276x_1 - 0,0139x_2$	0,777	0,763	$p < 0,001$
	SYC	Ovoalbumina	$Y = 0,7111 - 0,011x_1 - 0,0108x_2 - 0,0004x_1 \cdot x_2$	0,754	0,711	$p < 0,001$
“Overrun”	SY	Emulsificante	$Y = 100,2549 + 4,7726x_2 + 1,9498x_1 \cdot x_2$	0,937	0,933	$p < 0,001$
	SY	Ovoalbumina	$Y = 19,1516 + 0,9242x_1 \cdot x_2$	0,841	0,826	$p < 0,001$
	SYC	Emulsificante	$Y = 101,7833 - 4,5859x_2 + 2,6010x_1 \cdot x_2$	0,876	0,868	$p < 0,001$
	SYC	Ovoalbumina	$Y = 112,4083 - 2,7857x_1 - 8,4433x_2 + 1,6190x_1 \cdot x_2$	0,901	0,891	$p < 0,001$
Volume da fração de ar	SY	Emulsificante	$Y = 0,4758 + 0,0187x_1 + 0,0147x_2 - 0,0003x_1 \cdot x_2$	0,871	0,859	$p < 0,001$
	SY	Ovoalbumina	$Y = -0,0348 + 0,0187x_1 + 0,2448x_2$	0,765	0,751	$p < 0,001$
	SYC	Emulsificante	$Y = 0,3701 + 0,0246x_1 + 0,0124x_2$	0,777	0,763	$p < 0,001$
	SYC	Ovoalbumina	$Y = 0,3662 + 0,0094x_1 + 0,0096x_2 + 0,0003x_1 \cdot x_2$	0,775	0,754	$p < 0,001$

FONTE: O autor (2015).

SY – Suco de yacon; SYC – Suco de yacon concentrado.

Para a densidade, os coeficientes negativos dos fatores concentração de agente espumante (x_1) e tempo de batimento (x_2) para as espumas de suco e suco concentrado de yacon indicam que quanto maior a concentração de agente espumante e maior o tempo de batimento, menor será o valor da resposta. O coeficiente de interação apenas é significativo nas espumas de SY com emulsificante, onde acarreta um aumento na densidade e nas espumas de SYC com ovoalbumina, onde a interação dos dois fatores acarreta uma redução na resposta.

Através desses resultados pode-se concluir que tanto a concentração do agente espumante, bem como o tempo de incorporação de ar, interferiram na redução

da densidade das espumas. Os resultados encontrados são semelhantes aos de Widyastutil e Srianta (2011) e Rajkumar e colaboradores (2007), que alegaram que as maiores concentrações de ovoalbumina utilizadas foram as que resultaram uma maior redução na densidade. Esses resultados indicam que além da diminuição da tensão interfacial e superficial, maiores concentrações dos agentes espumantes causam o aprisionamento de uma maior quantidade de ar entre as lamelas, gerando assim a redução na densidade das espumas. Além disso, com o aumento do tempo de batimento ocorre maior incorporação de ar, sendo esse também um fator decisivo na diminuição da densidade das espumas obtidas sendo os resultados similares aos encontrados por Krasaekoopt e Bhatia (2012) no estudo de espuma de iogurte e por Esther e colaboradores (2013) na secagem de grãos por camada de espuma.

O rendimento (*overrun*), ou percentual de expansão é uma das principais características estudadas para avaliar a eficiência do método utilizado para formação da espuma e é definido através do volume de espuma formada sob condições fixas (DAVIS *et al.*, 2005; MARINOVA *et al.*, 2009). Os percentuais de expansão alcançados neste trabalho variaram de 25,75 (OVO-10-5) a 566,43 (EMU-10-20) para as espumas formadas por suco de yacon e 94,40 (OVO-10-5) a 506,54 (OVO-20-20) para as espumas de suco concentrado de yacon (Tabela 5). Espumas com maior concentração de ovoalbumina podem apresentar maior percentual de expansão em visão de que o alto conteúdo proteico das moléculas atua como um filme viscoelástico coeso com a habilidade de ser adsorvido rapidamente pela interface ar-líquido durante o batimento (LOMAKINA & MÍKOVÁ, 2006). Em estudo com polpa de pitanga, Chaves e colaboradores (2013) utilizaram o mesmo agente emulsificante deste trabalho e concluíram que sua capacidade de expansão foi afetada diretamente por sua concentração, fator observado também por Chakraborty e colaboradores (2014) na utilização de monoestearato de glicerila no estudo da otimização das propriedades funcionais de espumas de batata destinadas a secagem.

Ao analisarmos os modelos gerados para esta característica, (Tabela 6) observa-se que para o agente emulsificante (SY e SYC), apenas o tempo de batimento e a interação entre os fatores foram significativos, porém apenas a interação é que teve influência positiva nos dois modelos, indicando que esta é a principal responsável pelo aumento do “*overrun*” das espumas de yacon formadas com emulsificante. Para a ovoalbumina (SY e SYC), a interação foi a única responsável pela influência positiva nas respostas. Um alto percentual de expansão indica que mais ar está preso na

espuma, e uma baixa concentração de agente espumante, não é capaz de formar uma espessura crítica da lamela adequada para manter as bolhas de ar formadas aprisionadas (KARIM & WAI, 1999^b). Então, quando se trabalha com maior tempo de incorporação de ar aliado a uma maior concentração de agente espumante, consegue-se atingir uma cobertura mais uniforme pelo agente, pois esta tem uma difusão limitada, atingindo condições ideais aonde o filme formado é capaz de manter as bolhas de ar aprisionadas, aumentando assim a expansão da espuma (STANLEY *et al.*, 1996).

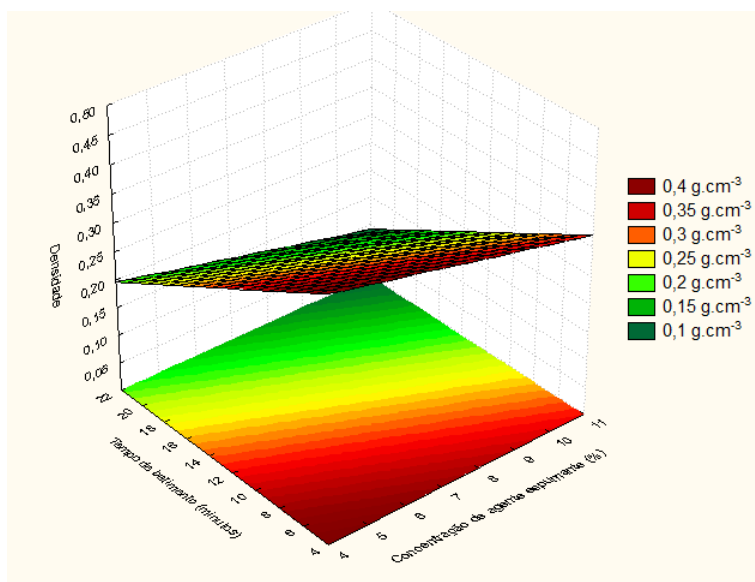
Outra importante propriedade física de espumas é a quantidade de gás que pode ser incorporado em sua estrutura, ou seu volume da fração de ar (ϕ), que também serve como parâmetro de qualidade de uma espuma (HERZAFT, 1999). Essa propriedade pode variar teoricamente de 0 (sem ar disperso) a 1 (apenas ar). A transição do volume de fração de ar de 0 para um valor próximo 0,64 é a responsável pela mudança na textura da espuma, que passa de líquida-viscosa para sua estrutura semissólida (MASON, 1999). Os menores valores de fração de ar para as espumas de suco e de suco concentrado de yacon são aquelas ligadas a amostra com 10% de ovoalbumina e apenas 5 minutos de batimento; já o maior valor foi obtido para espuma de suco (0,85) foi da amostra EMU-10-20, e para SYC as amostras OVO-20-20 e EMU-10-20 apresentaram o maior valor (0,83) não havendo diferença significativa ($p < 0,05$) entre elas. O volume da fração de ar segue a tendência oposta à densidade (Equação 2) e a ótima condição para se atingir uma maior atividade espumante pode ser determinada pelo maior valor de volume da fração de ar (RAHARITSIFA *et al.*, 2006).

Na análise dos resultados para o volume de fração de ar, os modelos gerados (Tabela 6) apresentam os coeficientes x_1 e x_2 variando positivamente com a resposta, indicando que tanto o aumento da concentração de agente espumante tanto um maior tempo de batimento causaram um aumento do volume da fração de ar, para os dois agentes espumantes estudados.

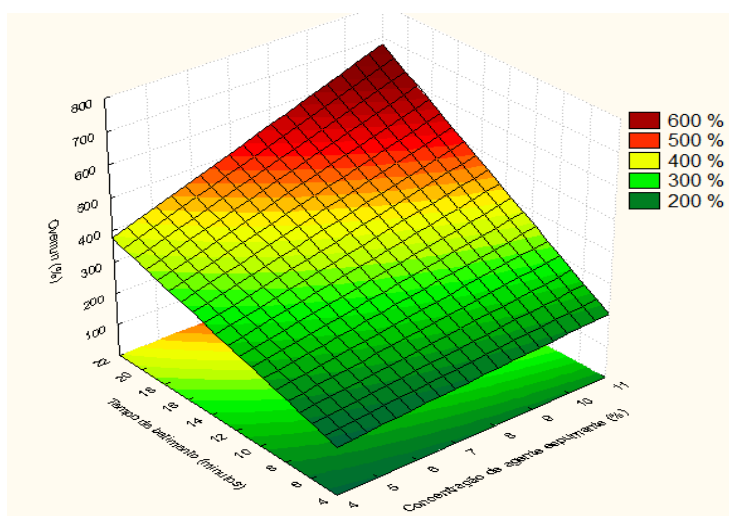
A partir das equações das respostas estudadas, foi possível a geração de gráficos de contorno da superfície de resposta que facilitam a visualização das melhores condições para as propriedades tecnológicas estudadas. De forma geral, todos indicaram que maiores concentrações de agente espumante e maiores tempos de batimento levaram a uma menor densidade, um maior percentual de expansão e um maior volume de fração de ar. Os modelos das espumas formadas por

emulsificante e suco de yacon foram os escolhidos para demonstrar esse comportamento pois apresentaram o maior coeficiente de determinação (R^2) para cada resposta analisada (Figura 13).

A



B



C

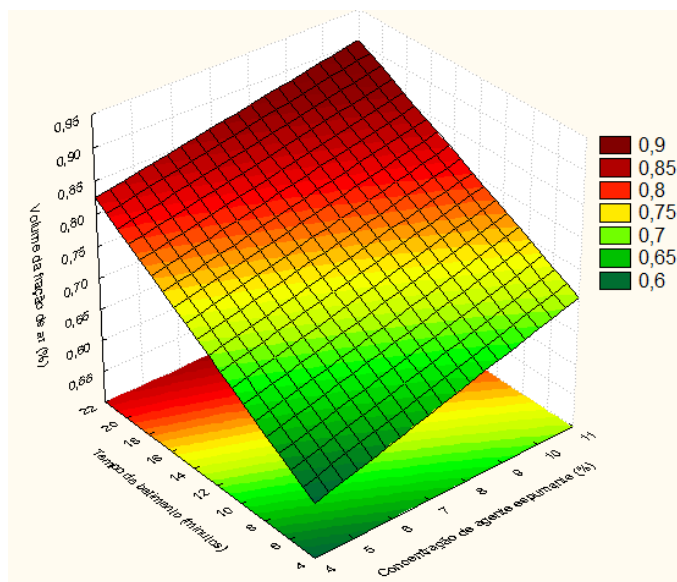


FIGURA 13 - GRÁFICOS DE CONTORNO DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA ESPUMAS FORMADAS COM EMULSIFICANTE E SUCO DE YACON - EFEITO SOBRE DENSIDADE (A), OVERRUN (B) E VOLUME DA FRAÇÃO DE AR (C)
 FONTE: O autor (2015).

7.1.2. Índice de estabilidade das espumas

A quantidade de líquido drenado reflete a capacidade de retenção de água de uma espuma. Uma das maneiras mais eficientes de determinação da estabilidade de uma determinada espuma é medindo a quantidade de líquido que é drenado dela, sendo este um processo dinâmico onde o fluido é escoado ao mesmo tempo com que as bolhas são desestabilizadas por coalescência e/ou desproporcionamento (KAMPF *et al.*, 2003; YANG *et al.*, 2009).

O líquido em espumas com altos valores de volume de fração de ar (ϕ) é distribuído através de filmes estreitos e bordas Plateau. Por causa do raio da curvatura da borda Plateau, a pressão interna é menor do que em filmes com pressão capilar. Essa diferença, conhecida como sucção da borda Plateau, leva a drenagem do líquido dos filmes estreitos para as bordas e finalmente, o líquido contido nelas é escoado pela ação da gravidade (NARSIMHAN, 1991; WANG & NARSIMHAN, 2004). A drenagem é acompanhada de um progressivo afinamento da lamela e pode então, aumentar a probabilidade do filme colapsar (BAG *et al.*, 2011).

No processo de secagem por camada de espuma, a obtenção de uma espuma com estrutura estável é a principal parte do processo, sendo desejável para que ocorra uma rápida secagem e uma fácil remoção do material seco da bandeja. Se a espuma se desestabiliza ou libera o líquido excessivamente, o tempo de secagem aumenta reduzindo assim a qualidade do produto (KARIM & WAI, 1999^a).

A estabilidade da espuma é influenciada pela densidade, espessura e permeabilidade da interface líquido-agente espumante, pela distribuição do tamanho das bolhas de ar e pela tensão superficial. Porém a natureza e concentração do agente utilizado é um dos principais fatores que alteram esta propriedade (KANDASAMY *et al.*, 2012).

Na Tabela 7, é possível observar que o agente emulsificante foi capaz de formar espumas com maior índice de estabilidade ao final do período de repouso, tanto a partir do suco quanto a partir do suco concentrado de yacon. No caso das espumas de suco de yacon, não houve diferença significativa entre as três últimas condições de preparo (EMU-7,5-12,5; EMU-5-20 e EMU-10-20), que formaram espumas 100% estáveis ao final dos 120 minutos. Ao aplicar o mesmo agente emulsificante utilizado no presente trabalho para a obtenção de espumas de polpa de pitanga roxa, Chaves

e colaboradores (2013) não obtiveram aumento da estabilidade ao ultrapassarem a adição do agente acima de 4%.

TABELA 7 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE (120 MINUTOS) DE ESPUMAS ELABORADAS COM SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON A DIFERENTES CONDIÇÕES DE PREPARO

Tratamento	Índice de estabilidade de espumas de suco (%)	Índice de estabilidade espumas de suco concentrado (%)
OVO-10-5	78,89 ± 0,56 ^d	80,83 ± 0,37 ^f
OVO-20-5	81,94 ± 1,09 ^c	87,5 ± 0,37 ^e
OVO-15-12,5	83,61 ± 1,21 ^c	90,83 ± 0,25 ^d
OVO-10-20	84,17 ± 0,37 ^c	90,28 ± 0,51 ^d
OVO-20-20	91,11 ± 0,55 ^b	95,83 ± 0,37 ^{b, c}
EMU-5-5	91,94 ± 0,67 ^b	91,94 ± 0,67 ^d
EMU-10-5	99,03 ± 0,14 ^a	94,17 ± 0,37 ^c
EMU-7,5-12,5	100 ^a	96,67 ± 0,41 ^b
EMU-5-20	100 ^a	95 ^{b, c}
EMU-10-20	100 ^a	100 ^a

* Os resultados correspondem a média ± desvio padrão. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.
 FONTE: O autor (2015).

Emulsificantes e proteínas apresentam sua atividade espumante pela redução da tensão interfacial das moléculas, e pelo fato dos emulsificantes se difundirem mais rapidamente que as proteínas, apresentam uma melhor capacidade de formação e manutenção da estabilidade de espumas (THAKUR *et al.*, 2003). Ao realizar uma pesquisa visando a caracterização das propriedades de espumas formadas por proteínas e por um agente emulsificante (monolaurato de sorbitano etoxilado), Sarker e colaboradores (1998) explicam que a melhor performance do agente emulsificante ocorreu por sua molécula apresentar uma maior superfície ativa, tendo sido adsorvido mais rapidamente que as moléculas de proteína.

Para as espumas de ovoalbumina, quanto maior a concentração de agente espumante e maior o tempo de batimento, maior foi a estabilidade obtida. Comportamentos similares foram encontrados nos trabalhos de Pernell e colaboradores (2002), Falade e colaboradores (2003), Rajkumar e colaboradores (2007) e Kandasamy e colaboradores (2012). Esse fenômeno pode ser atribuído a um aumento na viscosidade ou no valor de tensão limite da fase contínua e/ou a um aumento na força dos filmes adsorvidos pela interface ar-água (CARP *et al.*, 1997; VERNON-CARTER *et al.*, 2001). Neste contexto, a melhoria da estabilidade das espumas de ovoalbumina com o aumento do tempo de batimento e da concentração pode ser atribuído em parte a uma maior desnaturação da proteína e adsorção da interface, respectivamente (RAHARITSIFA *et al.*, 2006).

Na Figura 14 é possível visualizar a influência da concentração de sólidos solúveis totais dos sucos na estabilidade das espumas. Quando analisamos a atividade da ovoalbumina (A), o aumento da concentração do suco ocasionou de forma significativa o aumento do índice de estabilidade para todas as condições avaliadas. Porém quando avaliamos o emulsificante (B), em 03 condições visualizamos comportamento oposto.

A estabilidade é significativamente influenciada pelo conteúdo de sólidos totais da fase líquida (suco) e também pela natureza e concentração dos agentes formadores de espuma e estabilizantes. Geralmente quando o conteúdo de sólidos totais de uma espuma é baixo, será necessária a adição de maiores quantidades de agentes espumantes e estabilizantes (KADAM *et al.*, 2010). Esta afirmação é válida para a proteína empregada neste trabalho, sendo que o mesmo comportamento foi observado no estudo da secagem de feijão por Falade e colaboradores (2003); na elaboração de espumas de manga (RAJKUMAR *et al.*, 2007) e no processo de otimização da obtenção de espumas de polpa de marmelo (BAG *et al.*, 2011).

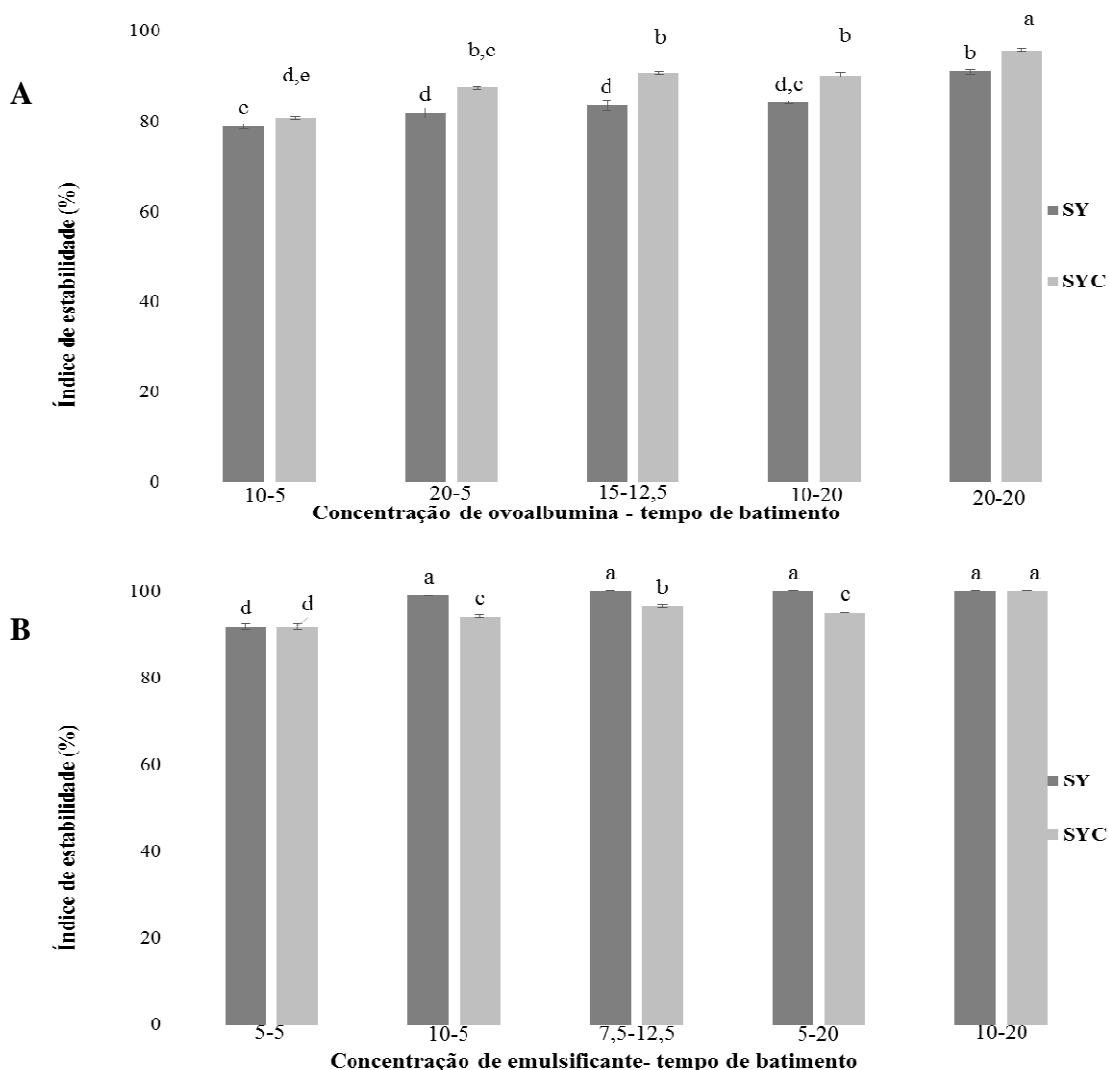


FIGURA 14 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE ESPUMAS DE OVOALBUMINA (A) E EMULSIFICANTE (B), OBTIDAS A PARTIR DE SUCO DE YACON (SY) E SUCO DE YACON CONCENTRADO (SYC)
 * Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Os dados são a média de triplicatas e as barras de erro demonstram os desvios padrões.

FONTE: O autor (2015).

7.1.3. Valor de tensão limite, número e diâmetro das bolhas de ar

A medida do valor de tensão limite também é uma característica muito importante para ser avaliada em espumas, pelo fato de estar relacionado a outras propriedades, como estabilidade e volume de ar incorporado (HERZHAFT, 1999; PERNELL *et al.*, 2000). O valor de tensão limite consiste na quantidade mínima de tensão requerida para a espuma começar a fluir (a transição de tensão entre o

comportamento sólido-elástico e líquido-viscoso), e este valor está relacionado com a força das estruturas que seguram a rede de bolhas do material (PERNELL *et al.*, 2000; KAMPF *et al.*, 2003; RAHARITSIFA *et al.*, 2006).

As espumas suportam uma pequena quantidade de estresse como materiais sólidos, porém fluem como líquidos sob cisalhamento (HÖHLER *et al.*, 1999; VERNON-CARTER *et al.*, 2001). Essa transição entre suas estruturas é dependente da estrutura da espuma, sendo particularmente importante pela influência que a estrutura das espumas fluidas exerce sob a estrutura das espumas sólidas formadas pelo processo de secagem (BARNES, 1999).

Embora as geometrias tradicionais possam ser problemáticas para espumas, a tipo “*vane*” é estabelecida como uma maneira simples e precisa para a determinação do valor de tensão limite (PERNELL *et al.*, 2000).

Essa técnica é particularmente tolerante a presença de bolhas relativamente grandes e os efeitos da depreciação das mesmas; apresentando, sobretudo duas vantagens principais: insignificante compressão da espuma durante a análise (por causa da sua pequena área de contato que é projetada na vertical), e minimização dos efeitos de deslizamento na parede (produzido pelo colapso de espuma) (PERNELL *et al.*, 2000; GENOVESE *et al.*, 2003; DAVIS & FOEGEDING, 2004). Ao analisar o valor de tensão limite por reologia tipo “*vane*” e reologia dinâmica em espumas de suco de maçã, foi constatado que o método tipo “*vane*” foi o que mostrou capacidade e sensibilidade de avaliar a influência da concentração do agente espumante utilizado (RAHARITSIFA *et al.*, 2006).

Análises de imagens digitais têm se tornado uma importante ferramenta em várias áreas da ciência, incluindo a de alimentos, por causa das valiosas informações quantitativas e numéricas que podem ser extraídas a partir delas (AGUILERA & STANLEY, 1999; RUSS, 2005). Existe uma ampla variedade de técnicas que podem ser aplicadas para caracterização da estrutura de espumas, entre elas a avaliação do número e tamanho das bolhas por microscopia ótica, que pode ser útil para melhor entendimento das suas propriedades bem como avaliar sua correlação com o processo de desestabilização das mesmas (DICKINSON *et al.*, 2002; RAIKOS *et al.*, 2007; GERMAIN & AGUILERA, 2014). O tamanho das bolhas pode ser quantitativamente avaliado a partir do diâmetro da bolha da imagem em 2D (YANG & FOEGEDING, 2011).

Para o tratamento dos dados de reologia (valor de tensão limite) e microscopia (número e diâmetro das bolhas) das espumas nos três tempos de análise (0, 10 e 20 minutos), foi aplicada a análise de componentes principais. Esta análise multivariada é importante no reconhecimento de padrões, visando reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados original, preservando a maior quantidade de informação (variância) possível através da representação do conjunto de dados em um novo sistema de eixos, denominados componentes principais (CP) (ZIELINSKI *et al.*, 2014).

Para espumas de suco de yacon, o componente principal 1 (CP1) explica 79,78% e o componente principal 2 (CP2) explica 15,01% da variância dos dados experimentais, ou seja, a ACP das espumas de suco de yacon explica as amostras em 94,79% (Figura 15 - A). Para as espumas de suco concentrado de yacon, CP1 explica 66,46% e CP2 26,18%, explicando 92,64% das amostras (Figura 15 - B). Segundo Rosenthal (1999), um resultado é adequado quando no mínimo 70-80% da variação entre os atributos sejam explicados pelos 03 primeiros componentes principais. Desta forma, neste trabalho foram utilizados os dois primeiros componentes principais para projeção das amostras.

Ao analisarmos a projeção dos atributos sobre o plano fatorial (Figura 15 – A e B), verifica-se que o CP1 foi representado pelos atributos valor de tensão limite e número de bolhas, e o CP2 pelo diâmetro médio das bolhas e valor de tensão limite. Quando os vetores estão próximos um do outro indicam correlação positiva entre os atributos avaliados, quando são ortogonais, possivelmente não há correlação linear entre as análises, e quando estão num ângulo de 180° entre si indicam correlação negativa. Esse comportamento pode ser claramente visível nas imagens obtidas por microscopia das espumas (Figura 17).

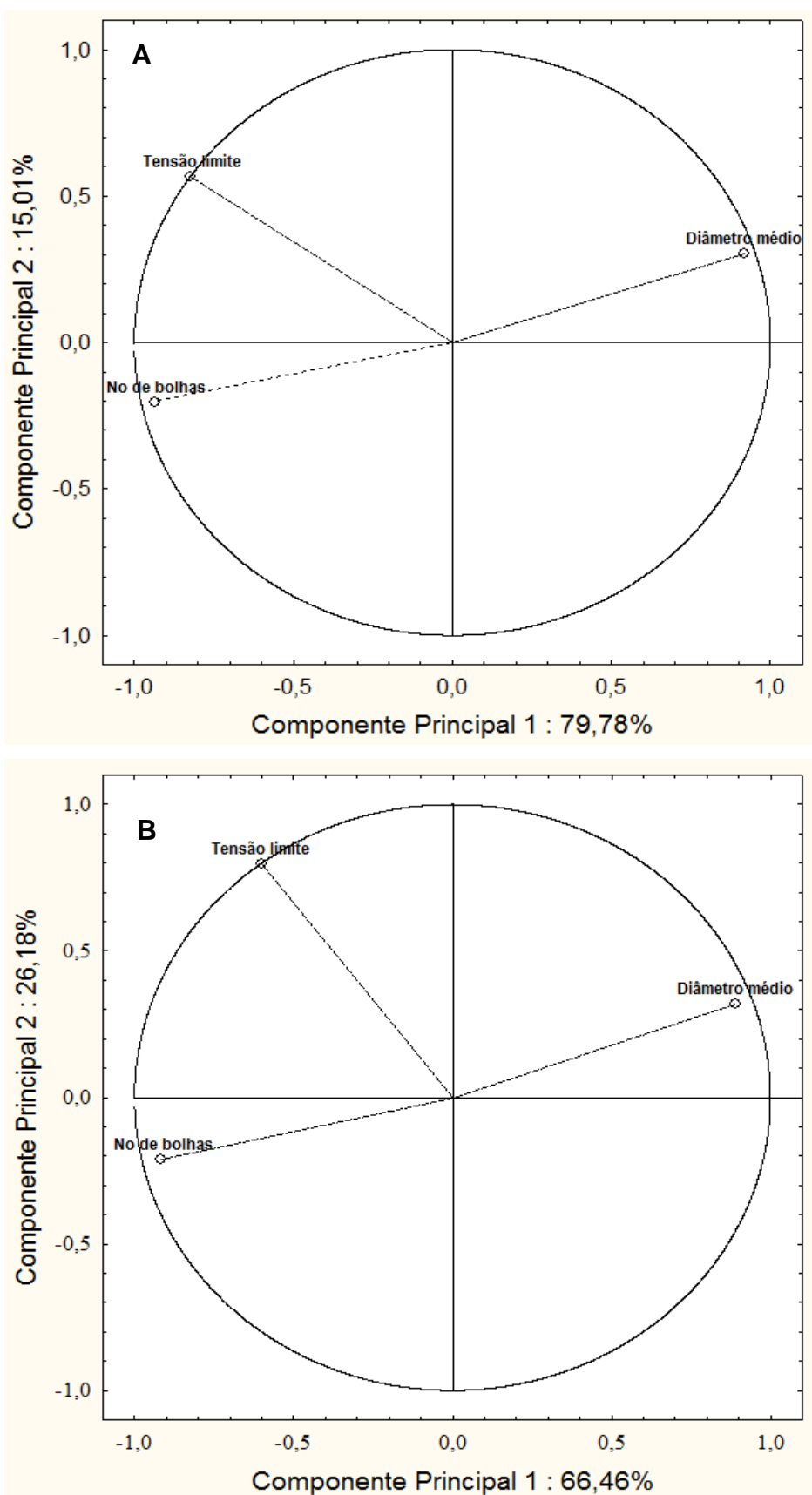


FIGURA 15 – PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS VALOR DE TENSÃO LIMITE, NÚMERO E DIÂMETRO DAS BOLHAS DE ESPUMAS DE SUCO DE YACON (A) E SUCO CONCENTRADO (B) SOBRE O PLANO FATORIAL (CP1 X CP2)

FONTE: O autor (2015).

Através da visualização das amostras sobre o plano fatorial (CP1 x CP2), tanto para espumas de suco (Figura 16- A) quanto para as de suco concentrado (Figura 16 - B), é possível visualizar claramente a separação pelo valor de tensão limite das amostras, sendo que as formadas por ovoalbumina apresentaram os maiores valores, com exceção da amostra OVO-20-5 no tempo de repouso de 0 minutos, que juntamente com a OVO-10-5 (repouso de 0 minutos), apresentou um menor valor de tensão limite como as espumas formadas pelo emulsificante. O maior valor de tensão limite para espumas de ovoalbumina também foi encontrado por Yang e colaboradores (2009), que atribuíram isso a baixa elasticidade interfacial das espumas de proteína. Em um estudo que examinou o efeito do tempo de batimento e da concentração de dois agentes espumantes (proteína da clara de ovo e proteína isolada do leite), foi constatado que as espumas de proteína da clara do ovo apresentaram valores de tensão limite significativamente maiores do que aquelas de proteína isolada do leite a mesma concentração e tempo de batimento (PERNELL *et al.*, 2002).

A avaliação do valor de tensão limite durante o período de repouso das espumas (0, 10 e 20 minutos) permite avaliar a influência do tempo sobre esta propriedade. O comportamento apresentado pela maioria das amostras foi de redução do seu valor (Tabela 8), como observado claramente pela amostra SY-OVO-20-20 nos tempos de repouso 0, 10 e 20 minutos, sendo a queda seguida pela diminuição do número de bolhas com o aumento no seu diâmetro (Figura 16 - A). A explicação pode ser dada pela influência que a estabilidade da espuma causa no seu valor de tensão limite (GARDINER *et al.*, 1998). O envelhecimento da espuma é causado principalmente pelo amadurecimento de Ostwald, assim, a espuma que não coalesce, é usualmente composta de bolhas maiores. E espumas com bolhas maiores apresentam um menor valor de tensão limite, mesmo quando não há a drenagem da fase líquida (MLEKO *et al.*, 2007).

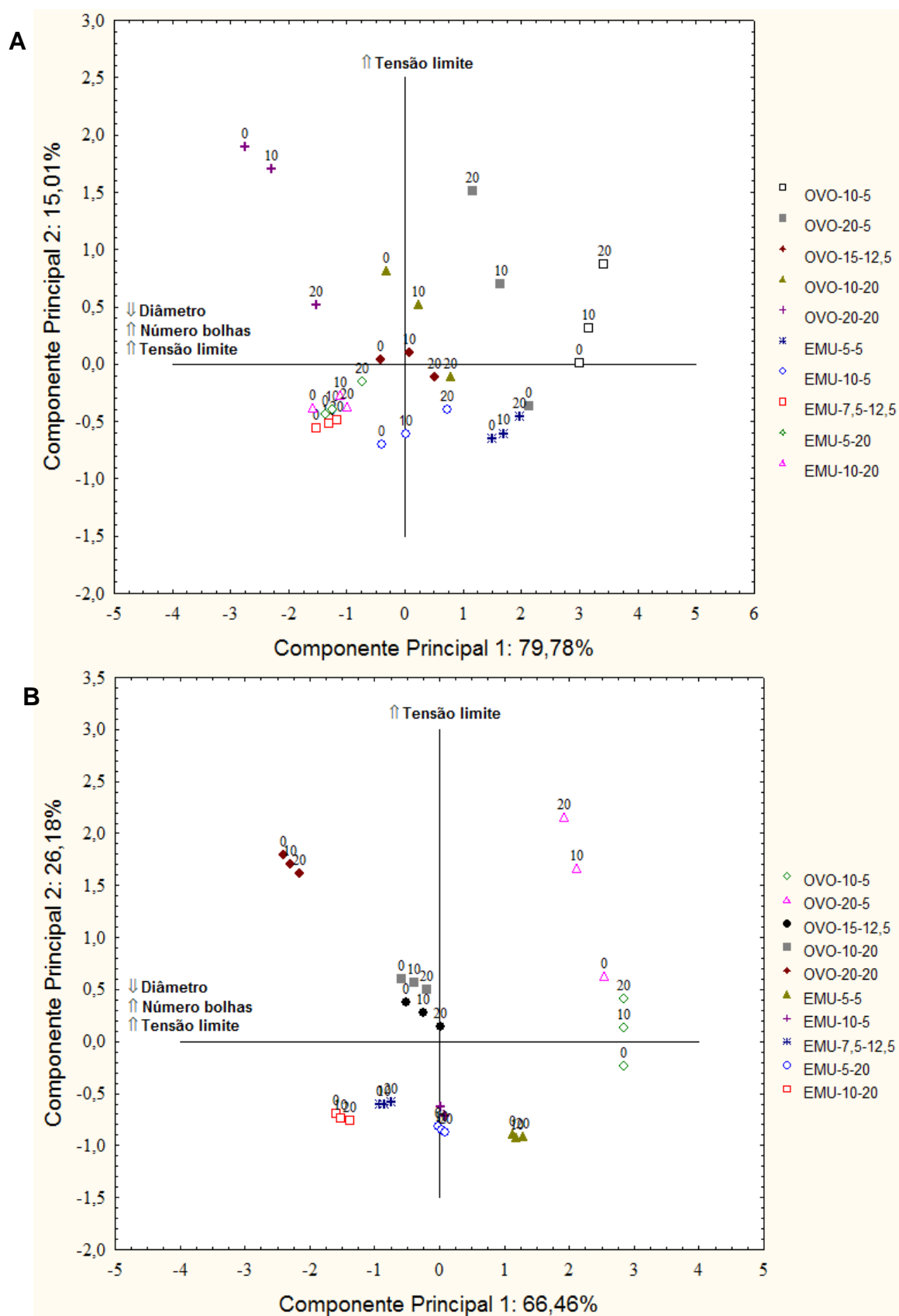


FIGURA 16 - PROJEÇÃO DAS ESPUMAS DE SUCO DE YACON (A) E SUCO CONCENTRADO DE YACON (B), FORMADAS POR OVOALBUMINA E EMULSIFICANTE SOBRE O PLANO FATORIAL (CP1 X CP2)

* Os números 0, 10 e 20 correspondem ao tempo de repouso das espumas em minutos.

FONTE: O autor (2015).

TABELA 8 – VALOR DE TENSÃO LIMITE, NÚMERO E DIÂMETRO MÉDIO DAS BOLHAS, NOS TEMPOS DE REPOUSO APÓS FORMAÇÃO

Tratamento	Tempo de repouso (minutos)	Valor de tensão limite (Pa)	Número de bolhas	Diâmetro médio das bolhas (μm)
SY-OVO-10-5	0	18.53 \pm 1.27c	32.5 \pm 1.4a	191.1 \pm 0.5c
	10	23.81 \pm 0.45b	29 \pm 1.2a,b	212.6 \pm 0.5b
	20	29.93 \pm 0.32a	27 \pm 0.6b	243.0 \pm 0.9a
SY-OVO-20-5	0	23.38 \pm 0.65c	61 \pm 1.7a	138.9 \pm 0.7b
	10	55.02 \pm 0.78b	59 \pm 0.58a	148.7 \pm 0.1a
	20	80.73 \pm 0.90a	58.5 \pm 0.29a	149.9 \pm 0.1a
SY-OVO-15-12,5	0	70.71 \pm 1.20a	225.2 \pm 1.6a	64.3 \pm 0.9b
	10	60.84 \pm 0.88b	169.7 \pm 1.5b	90.5 \pm 0.6a
	20	53.39 \pm 0.55c	164.5 \pm 1.1c	91.4 \pm 1.0a
SY-OVO-10-20	0	87.31 \pm 1.75a	169 \pm 1.1a	78.6 \pm 0.5c
	10	72.31 \pm 3.57b	153 \pm 1.1b	93.5 \pm 0.1b
	20	49.52 \pm 0.37c	137.5 \pm 0.9c	97.9 \pm 0.1a
SY-OVO-20-20	0	146.16 \pm 1.99a	386 \pm 1.7a	51.6 \pm 0.7b
	10	135.02 \pm 1.77b	359.5 \pm 2.0b	62.0 \pm 0.4a
	20	96.12 \pm 0.93c	359 \pm 1.7b	62.5 \pm 0.3a
SY-EMU-5-5	0	26.68 \pm 0.34a	92.5 \pm 1.4a	103.2 \pm 1.1c
	10	25.54 \pm 0.65a	90 \pm 0.6a	115.8 \pm 1.6b
	20	23.56 \pm 0.44b	84 \pm 1.1b	133.4 \pm 2.4a
SY-EMU-10-5	0	52.61 \pm 1.32a	279.5 \pm 1.4a	56.9 \pm 0.9b
	10	48.58 \pm 0.70b	248 \pm 1.1b	72.6 \pm 1.9a
	20	45.01 \pm 0.43c	107 \pm 1.7c	75.0 \pm 1.0a
SY-EMU-7,5-12,5	0	71.12 \pm 0.86a	421.5 \pm 1.5a	44.6 \pm 0.5b
	10	69.25 \pm 0.32a,b	387.5 \pm 1.0b	47.2 \pm 0.9b
	20	67.78 \pm 0.40b	381.25 \pm 0.8c	53.8 \pm 0.8a
SY-EMU-5-20	0	71.66 \pm 0.52a	397.5 \pm 1.4a	50.4 \pm 0.5c
	10	70.92 \pm 0.63a	392 \pm 1.7a	56.1 \pm 0.7b
	20	69.62 \pm 0.51a	312 \pm 3.5b	67.3 \pm 0.9a
SY-EMU-10-20	0	76.25 \pm 1.14a	400 \pm 0.6a	40.4 \pm 0.2c
	10	71.36 \pm 0.82b	376.5 \pm 2.0b	63.6 \pm 1.3b
	20	67.43 \pm 0.25c	374 \pm 1.1b	65.6 \pm 1.2a
SYC-OVO-10-5	0	20.67 \pm 0.72c	21.5 \pm 0.9a	244.8 \pm 0.2c
	10	33.56 \pm 1.15b	20.5 \pm 0.9a	260.3 \pm 1.2b
	20	43.71 \pm 0.63a	18.5 \pm 1.0a	271.4 \pm 0.7a
SYC-OVO-20-5	0	56.72 \pm 1.36c	19.5 \pm 0.3a	253.3 \pm 1.3b
	10	101.54 \pm 0.95b	19 \pm 0.6a	259.6 \pm 1.4a
	20	122.46 \pm 1.65a	19 \pm 0.6a	263.1 \pm 1.1a
SYC-OVO-15-12,5	0	102.83 \pm 0.75a	253.2 \pm 2.2a	55.8 \pm 1.4c
	10	95.32 \pm 1.06b	219.2 \pm 2.8b	61.1 \pm 1.2b
	20	85.4 \pm 0.99c	181.7 \pm 3.1c	64.8 \pm 0.7a
SYC-OVO-10-20	0	111.85 \pm 1.64a	248.5 \pm 0.9a	57.2 \pm 0.2c
	10	108.03 \pm 0.69a	218.5 \pm 2.0b	60.1 \pm 0.3b
	20	102.49 \pm 0.34b	187 \pm 1.1c	61.9 \pm 0.6a
SYC-OVO-20-20	0	183.77 \pm 1.96a	483 \pm 4.0a	39.2 \pm 1.5b
	10	178.53 \pm 0.46a	478.5 \pm 2.6a	43.0 \pm 1.6b
	20	172.95 \pm 1.13b	471 \pm 4.0a	50.4 \pm 1.1a
SYC-EMU-5-5	0	28.68 \pm 0.26a	139.5 \pm 0.9a	104.4 \pm 0.8c
	10	26.43 \pm 0.15b	137 \pm 1.7a,b	107.9 \pm 0.8b
	20	24.99 \pm 0.22c	132 \pm 1.7b	114.6 \pm 0.6a
SYC-EMU-10-5	0	56.85 \pm 0.51a	265.5 \pm 1.4a	66.1 \pm 0.1b
	10	53.19 \pm 0.93b	265 \pm 1.7a	67.7 \pm 0.4a
	20	52.50 \pm 0.86b	263.5 \pm 0.9a	68.1 \pm 0.5a
SYC-EMU-7,5-12,5	0	71.60 \pm 0.26a	431.7 \pm 1.9a	50.9 \pm 0.4c
	10	70.54 \pm 0.37a,b	426.7 \pm 1.2a	54.3 \pm 0.5b
	20	69.74 \pm 0.32b	407.2 \pm 2.6b	58.3 \pm 0.8a
SYC-EMU-5-20	0	50.44 \pm 0.16a	282.5 \pm 2.0a	62.1 \pm 0.1c
	10	48.21 \pm 0.16b	279 \pm 3.5a	63.4 \pm 0.2b
	20	46.25 \pm 0.21c	278.5 \pm 3.7a	68.1 \pm 0.2a
SYC-EMU-10-20	0	78.17 \pm 1.30a	577.5 \pm 2.0a	45.7 \pm 0.1c
	10	75.48 \pm 2.14a	571.5 \pm 2.6a	47.5 \pm 0.4b
	20	72.20 \pm 1.83a	551 \pm 0.6b	50.6 \pm 0.1a

* Os resultados compreendem a média \pm desvio padrão. Em cada coluna, letras diferentes entre os tempos para cada tratamento, demonstram diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.
 FONTE: O autor (2015).

Por sua vez, as espumas de suco e suco concentrado OVO-10-5 e OVO-20-5, demonstraram comportamento contrário às demais espumas, com aumento do valor de tensão com o passar do tempo. Porém, as características microscópicas das suas bolhas não sofreram alterações significativas, continuando a ser classificadas como espumas com bolhas de grande diâmetro e presentes em pequena quantidade (Figura 16 – A e B). Isso pode ser devido ao fato que o valor de tensão limite de uma espuma com alta sinérese é determinado predominantemente pelo processo de drenagem. A sinérese causa um aumento no volume de fração de ar da espuma e dessa forma aumenta o valor de tensão limite, pois o líquido sozinho é um material que apresenta baixa viscosidade (MLEKO *et al.*, 2007). Comportamentos similares foram encontrados em estudos da influência de diversos fatores (entre eles o tempo) sobre propriedades reológicas de espumas de ovoalbumina (LIANG & KRISTINSSON, 2005; MLEKO *et al.*, 2007).

A partir da análise de componentes principais, foi possível constatar que as espumas formadas por suco concentrado de yacon e ovoalbumina na máxima concentração, obtidas pelo maior tempo de incorporação de ar, se destacaram sobre as demais por apresentarem um maior valor de tensão limite. É possível através desta, também concluir que as espumas formadas por suco concentrado de yacon e emulsificante apresentaram como característica em destaque, uma maior quantidade de número de bolhas, que se manteve estável durante o período de repouso avaliado.

Na Figura 17, é possível visualizar o efeito do tempo de repouso sobre o tamanho das bolhas das espumas do tratamento SY-OVO-10-5. No tempo 0 (Figura 17 – A) vemos as bordas das bolhas bem definidas, onde cada uma apresenta seu filme interfacial. Já com o passar do tempo, as bolhas perderam seu formato arredondado e foram se tornando alongadas, o filme já não está bem definido e elas estão com as bordas encostadas umas com as outras (Figura 17 – B), possivelmente pela força exercida pelas bolhas vizinhas ou talvez pelo excesso de ar aprisionado na bolha (mais do que o filme interfacial consiga aguentar). Determinar qual mecanismo é o responsável pelo processo de desestabilização das bolhas é difícil pela simples observação da diferença do número de bolhas em relação ao tempo. Na distribuição do tamanho das bolhas, a coalescência leva ao aparecimento de bolhas maiores e uma diminuição da quantidade de bolhas. Por sua vez, o desproporcionamento pode resultar numa distribuição bimodal onde as bolhas maiores crescem à custa das menores (KARAKASHEV & GROZDANOVA, 2012).

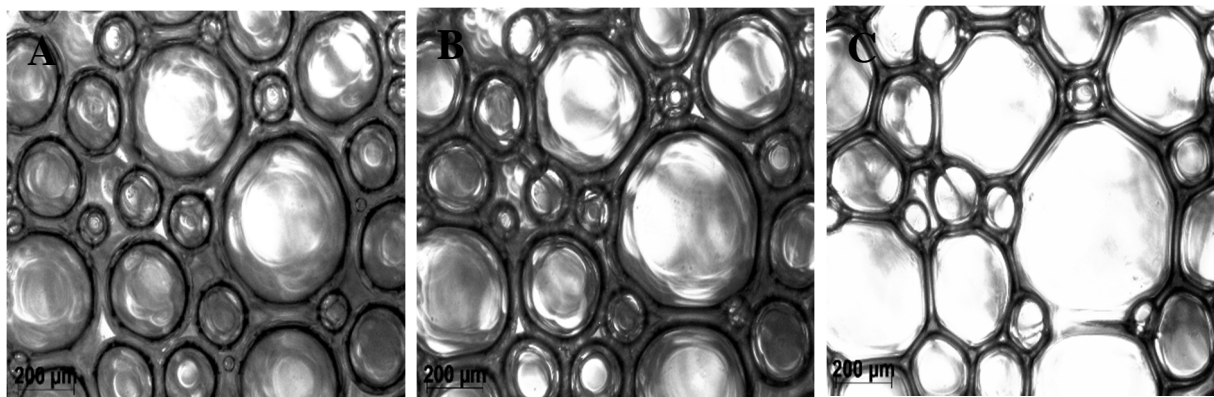


FIGURA 17 – FOTOMICROGRAFIA DAS BOLHAS DE AR, PARA O TRATAMENTO SY-OVO-10-5, NOS TEMPOS DE REPOUSO 0 (A), 10 (B) E 20 (C) MINUTOS

FONTE: O autor (2015).

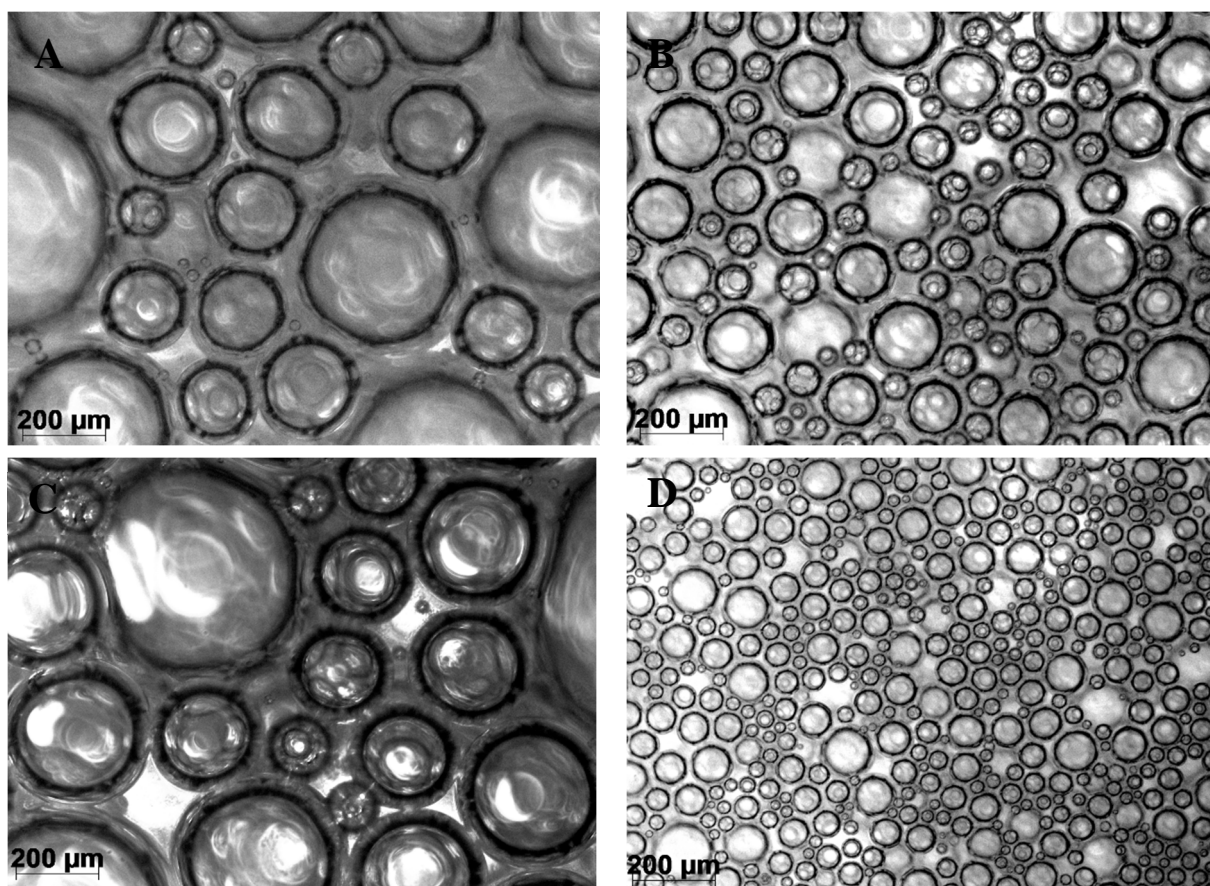


FIGURA 18 – FOTOMICROGRAFIA DE ESPUMAS DOS TRATAMENTOS SYC-OVO-10-5 (A), SYC-OVO-10-20 (B), SYC-OVO-20-5 (C) E SYC-OVO-20-20 (D)

FONTE: O autor (2015).

A fim de resumir como um todo, as observações obtidas através da análise por imagem das espumas, podemos considerar que essa técnica forneceu uma visualização muito útil das mudanças complexas que ocorreram na densidade e distribuição de tamanho das bolhas devido a diferença de tempo de incorporação de ar. No menor tempo de batimento, foi visualizada a predominância de uma menor quantidade de bolhas, mas com uma maior área, como pode ser visualizado na Figura 18 (A) e (C). Na medida em que o tempo de batimento aumentou, as bolhas maiores foram divididas em menores, resultando em um aumento no número de bolhas, porém com redução no tamanho médio dessas bolhas (Figura 18 (B) e (D)).

Generalizando, longos períodos de incorporação de ar resultaram em um maior número de bolhas, porém com menor tamanho, fator constatado também pela análise de componentes principais. Esses resultados podem ser comparados aos encontrados por Lau e Dickinson (2004) no estudo de espumas de ovoalbumina em soluções de açúcar concentradas. Kampf e colaboradores (2003) descreveram o mesmo comportamento em trabalho com espumas de clara de ovo, e Raharitsifa e colaboradores (2006) também concluíram que o número de bolhas cresceu e seu tamanho diminuiu com o aumento no período de incorporação de ar em espumas de suco de maçã preparadas com ovoalbumina e metilcelulose.

7.2. CARACTERÍSTICAS DA SECAGEM

As análises sobre as propriedades físicas das espumas de suco de yacon (concentrado e não concentrado) formadas por ovoalbumina e emulsificante indicaram que aquelas formadas pela combinação entre maior concentração de agente espumante e maior tempo de incorporação de ar foram as que apresentaram características mais adequadas para serem submetidas ao processo de desidratação.

Desta forma, as espumas SY-OVO-20-20; SYC-OVO-20-20; SY-EMU-10-20 e SYC-EMU-10-20 foram as utilizadas para o desenvolvimento dos estudos de secagem convectiva.

7.2.1. Cinética de secagem das espumas de suco e suco de yacon concentrado

As curvas de secagem das espumas formadas com emulsificante e ovoalbumina, com suco de yacon e suco de yacon concentrado estão representadas nas Figuras 19 e 20, itens A e B, respectivamente. Os dados estão dispostos na forma de razão de umidade adimensional pelo tempo de secagem em minutos. Como pode ser visualizado, em todas as condições aplicadas, o comportamento da secagem, demonstra que ela ocorre num período de taxa decrescente, o que indica a difusão como mecanismo físico mais provável a governar o movimento da umidade através da estrutura das amostras (MCMINN & MAGEE, 1999).

A ausência de um período de secagem à taxa constante pode ter ocorrido devido à natureza da umidade presente nas espumas, pois mesmo havendo água superficial livre, esta pode estar na forma de suspensão de células e de solução (açúcares e outras moléculas), apresentando pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura, fato também observado em estudos de secagem de banana em camada de espuma (THUWAPANICHAYANAN *et al.*, 2008).

Como esperado, o tempo de secagem foi menor quando temperaturas maiores de secagem foram empregadas, comportamento ocasionado pela elevação da taxa de secagem em virtude do aumento do potencial de transferência de calor entre o ar e a camada de espuma, evidenciando que a temperatura é um importante fator que afeta o processo (AKPNAR *et al.*, 2003). O mesmo comportamento foi observado por Azispour *et al.* (2014) ao investigarem os efeitos da temperatura na secagem de camarão em camada de espuma e por outros estudos publicados sobre secagem de alimentos em camada delgada (ERENTURK *et al.*, 2004; DOYMAZ, 2006; GOYAL *et al.*, 2007).

Por sua vez, o aumento da espessura, reduziu a taxa de difusão da umidade, devido ao longo percurso que a umidade teve que percorrer para chegar à superfície. Além disso, em camadas mais finas, a transferência de calor é mais eficiente e a rápida penetração de calor pode iniciar a difusão de umidade em menor tempo (DJAENI *et al.*, 2013). Comportamentos similares aos descritos neste trabalho foram relatados por Rajkumar *et al.* (2006) durante secagem de espuma de manga, por Vernon-Carter *et al.* (2001) para espumas de suco de tamarindo elaboradas com ovoalbumina e por Kandasamy *et al.* (2012) na produção de suco de mamão em pó.

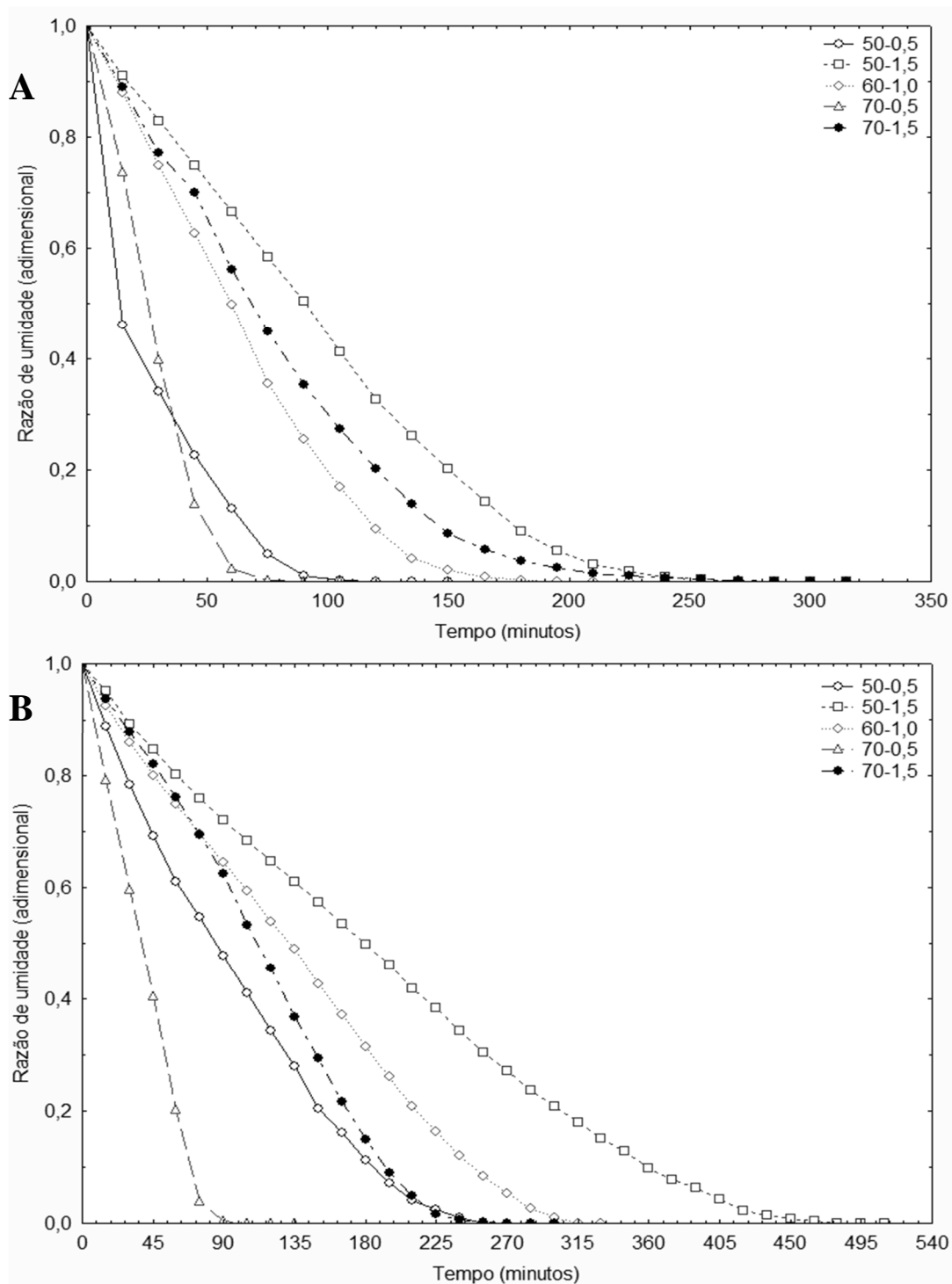


FIGURA 19 – CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO DE YACON ELABORADAS COM OVOALBUMINA (A) E EMULSIFICANTE (B)

* As condições de secagem estão dispostas na legenda do gráfico no formato temperatura – espessura da camada de espuma (cm).

FONTE: O autor (2015).

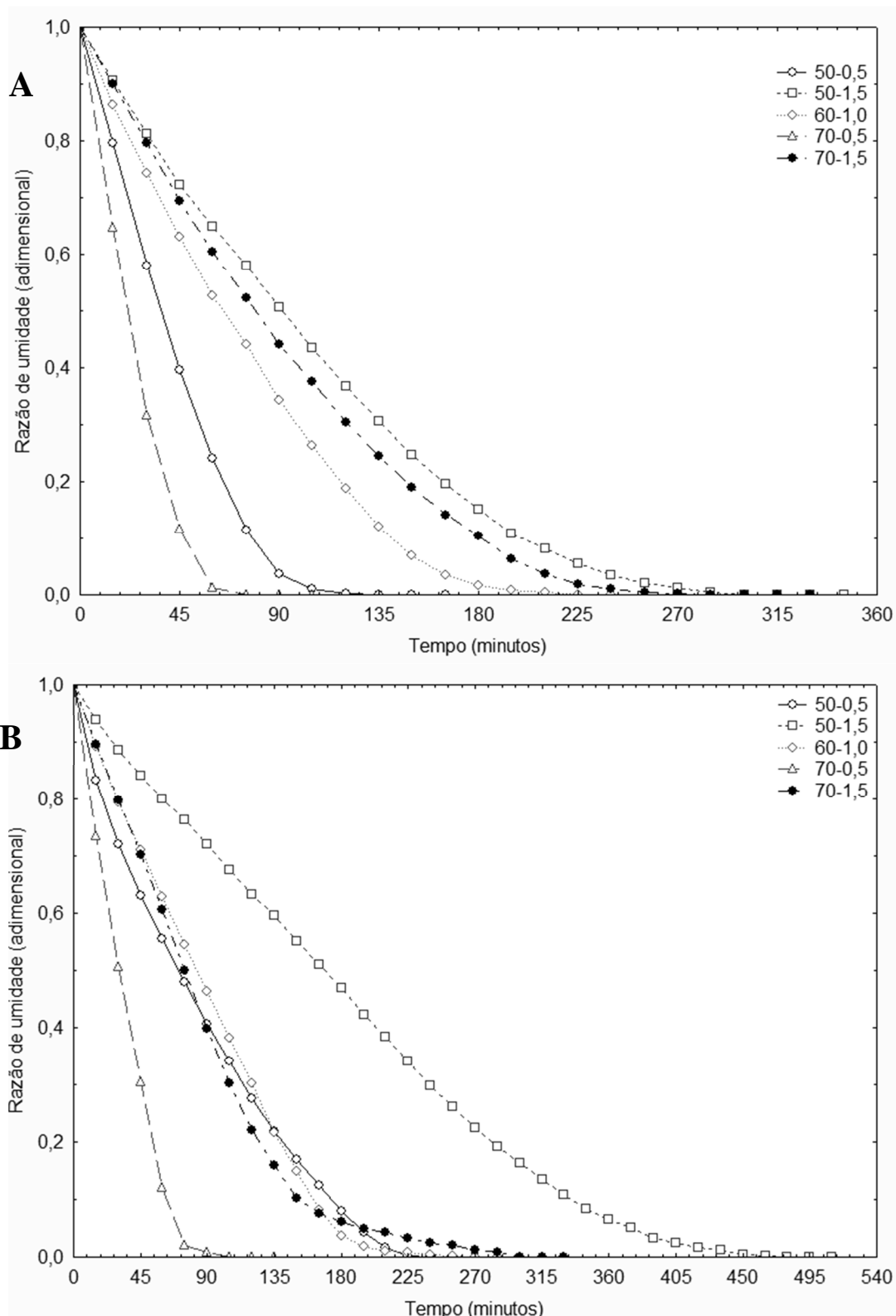


FIGURA 20 - CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON ELABORADAS COM OVOALBUMINA (A) E EMULSIFICANTE (B)

* As condições de secagem estão dispostas na legenda do gráfico no formato temperatura – espessura da camada de espuma (cm).

FONTE: O autor (2015).

Ao avaliar o efeito da concentração de sólidos solúveis totais do suco de yacon durante a secagem, para os dois agentes espumantes não se verificou influência no comportamento do processo (Figuras 19 e 20 – A e B).

Para as espumas elaboradas com ovoalbumina, foi verificado uma pequena diferença nos tempos de secagem, em geral, as espumas elaboradas com suco de yacon (Figura 19 – A) demoraram em média 15 a 30 minutos a mais para atingir a umidade de equilíbrio (U_e) do que aquelas formuladas com suco concentrado de yacon (Figura 20 - A). Esta diferença de tempo de secagem pode ter atribuída à diferença na composição das espumas e a influência que estes fatores exercem em sua estabilidade durante a secagem (RATTI & KUDRA, 2006). Como discutido no item 7.1.2 (Figura 14 – A), as espumas de suco concentrado de yacon apresentaram maiores valores de índice de estabilidade do que as obtidas com suco de yacon.

Por sua vez, as espumas obtidas com adição de emulsificante (Figuras 19 e 20 – B), nas menores temperaturas empregadas (50 e 60 °C), também demonstraram uma diminuição de 15-30 minutos do tempo de secagem com o aumento da concentração de sólidos solúveis totais do suco de yacon, mas na temperatura de 70°C, essas espumas levaram 15-30 minutos a mais para atingir a umidade de equilíbrio. Fator esse podendo ser influenciado pela diminuição da estabilidade desta espuma a maiores temperaturas e além disso, os sólidos dissolvidos na espuma podem dificultar o movimento de umidade, principalmente por difusão e capilaridade, reduzindo assim a taxa de secagem.

7.2.2. Modelagem dos dados de secagem

Os valores de coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado (ϕ^2) e raiz do quadrado médio residual (RQMR) para cada modelo aplicado aos resultados da razão de umidade obtidos pelo acompanhamento da desidratação das espumas de suco de yacon com ovoalbumina e emulsificante em diferentes condições estão dispostos na Tabela 9. Por sua vez, na Tabela 10, estão apresentados os valores para as espumas de suco concentrado de yacon.

TABELA 9 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS APLICADOS À DIFERENTES ESPUMAS DE SUCO DE YACON E CONDIÇÕES DE SECAGEM

Modelo	Condição de secagem	Espumas com emulsificante			Espumas com ovoalbumina		
		R ²	ϕ^2	RQMR	R ²	ϕ^2	RQMR
Newton	0,5cm – 50°C	0,983	0,0014	0,0364	0,992	9,94 x 10 ⁻⁵	0,0095
	1,5cm – 50°C	0,974	0,0010	0,0310	0,975	0,0017	0,0402
	1,0cm – 60°C	0,968	0,0002	0,0149	0,978	0,0014	0,0366
	0,5cm – 70°C	0,974	0,0015	0,0369	0,978	0,0013	0,0331
	1,5cm – 70°C	0,954	0,0003	0,0178	0,984	0,0019	0,0425
Henderson e Pabis	0,5cm – 50°C	0,986	0,0047	0,0651	0,993	1,36 x 10 ⁻⁵	0,0033
	1,5cm – 50°C	0,980	0,0079	0,0862	0,981	0,0081	0,0857
	1,0cm – 60°C	0,974	0,0053	0,0693	0,983	0,0062	0,0738
	0,5cm – 70°C	0,977	0,0056	0,0671	0,981	0,0044	0,0573
	1,5cm – 70°C	0,965	0,0010	0,0963	0,988	0,0058	0,0728
Logarítmico	0,5cm – 50°C	0,998	6,92 x 10 ⁻¹⁰	2,4 x 10 ⁻⁵	0,993	5,23 x 10 ⁻¹³	6,16 x 10 ⁻⁷
	1,5cm – 50°C	0,998	4,21 x 10 ⁻⁸	0,0002	0,993	7,28 x 10 ⁻⁹	7,93 x 10 ⁻⁵
	1,0cm – 60°C	0,992	5,66 x 10 ⁻¹¹	6,96 x 10 ⁻⁶	0,992	1,58 x 10 ⁻¹¹	3,58 x 10 ⁻⁶
	0,5cm – 70°C	0,988	2,01 x 10 ⁻¹⁴	1,19 x 10 ⁻⁷	0,988	1,47 x 10 ⁻¹⁵	3,03 x 10 ⁻⁸
	1,5cm – 70°C	0,989	6,05 x 10 ⁻⁸	0,0002	0,993	2,68 x 10 ⁻¹³	4,81 x 10 ⁻⁷
Page	0,5cm – 50°C	0,995	0,0024	0,0468	0,995	0,0008	0,0251
	1,5cm – 50°C	0,994	0,0043	0,0637	0,995	0,0019	0,0419
	1,0cm – 60°C	0,992	0,0041	0,0611	0,999	0,0009	0,0276
	0,5cm – 70°C	0,996	0,0011	0,0300	1,000	0,0001	0,0087
	1,5cm – 70°C	0,995	0,0040	0,0604	0,999	0,0005	0,0211
Midili modificado	0,5cm – 50°C	0,998	6,18 x 10 ⁻⁵	0,0072	0,996	1,03 x 10 ⁻⁵	0,0027
	1,5cm – 50°C	0,998	5,43 x 10 ⁻⁵	0,0070	0,998	0,0001	0,0101
	1,0cm – 60°C	0,986	0,0015	0,0364	0,999	9,73 x 10 ⁻⁵	0,0089
	0,5cm – 70°C	1,000	0,0002	0,0112	1,000	1,07 x 10 ⁻⁵	0,0026
	1,5cm – 70°C	0,903	0,0205	0,1326	0,999	8,37 x 10 ⁻⁵	0,0085
Dois termos	0,5cm – 50°C	0,986	0,0053	0,0651	0,997	0,0009	0,0244
	1,5cm – 50°C	0,980	0,0084	0,0862	0,981	0,0090	0,0857
	1,0cm – 60°C	0,974	0,0062	0,0714	0,983	0,0073	0,0738
	0,5cm – 70°C	0,977	0,0075	0,0671	0,981	0,0066	0,0573
	1,5cm – 70°C	0,965	0,0132	0,1035	0,988	0,0065	0,0728
Dois termos exponencial	0,5cm – 50°C	0,983	0,0015	0,0373	0,996	0,0005	0,0202
	1,5cm – 50°C	0,974	0,0011	0,0327	0,975	0,0019	0,0415
	1,0cm – 60°C	0,967	0,0003	0,0170	0,978	0,0017	0,0383
	0,5cm – 70°C	0,974	0,0018	0,0376	0,978	0,0015	0,0338
	1,5cm – 70°C	0,953	0,0003	0,0172	0,984	0,0022	0,0446

* continua na próxima página

TABELA 9 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS APLICADOS À DIFERENTES ESPUMAS DE SUCO DE YACON E CONDIÇÕES DE SECAGEM - continuação

Aproximação por difusão	0,5cm – 50°C	0,995	0,0027	0,0483	0,997	0,0008	0,0245
	1,5cm – 50°C	0,993	0,0056	0,0717	0,996	0,0035	0,0551
	1,0cm – 60°C	0,990	0,0045	0,0626	0,997	0,0020	0,0400
	0,5cm – 70°C	0,994	0,0022	0,0397	0,998	0,0006	0,0190
	1,5cm – 70°C	0,990	0,0072	0,0786	0,998	0,0013	0,0333
Wang e Singh	0,5cm – 50°C	0,999	$3,04 \times 10^{-6}$	0,0017	0,939	0,0009	0,0854
	1,5cm – 50°C	0,999	$7,64 \times 10^{-5}$	0,0085	0,997	0,0007	0,0256
	1,0cm – 60°C	0,998	$4,39 \times 10^{-5}$	0,0063	0,997	0,0005	0,0206
	0,5cm – 70°C	0,995	0,0004	0,0188	0,995	0,0002	0,0126
	1,5cm – 70°C	0,989	0,0024	0,0464	0,996	$1,47 \times 10^{-6}$	0,0012

FONTE: O autor (2015).

Todos os modelos aplicados apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de correlação acima de 90%. Porém o coeficiente de correlação não constitui sozinho um bom critério para a seleção de modelos não lineares, se tornando necessária a avaliação dos valores de qui-quadrado e raiz do quadrado médio residual para a escolha do modelo mais adequado (MADAMBA *et al.*, 1996).

De acordo com os resultados da análise estatística dos diferentes modelos de secagem em camada delgada utilizados (Tabelas 9 e 10), o modelo logarítmico foi o que apresentou maiores valores de R^2 aliados a menores valores de ϕ^2 e RQMR, podendo ser considerado o modelo que melhor descreve o processo de secagem de espumas de suco e suco concentrado de yacon nas condições aplicadas. Em outros trabalhos, o modelo logarítmico também foi o que melhor representou os processos de desidratação em camada delgada de damascos (DOYMAZ *et al.*, 2004; TOGRUL & PEHLIVAN, 2002), rosa-mosqueta (ERENTURK *et al.*, 2004), ameixas (GOYAL *et al.*, 2007) e lichias (JANJAI *et al.*, 2011).

A variação dos resultados da razão de umidade preditos pelo modelo logarítmico para as espumas de suco e suco concentrado de yacon com emulsificante e ovoalbumina estão expostos nas Figuras 21 e 22, respectivamente. Como pode ser observado nos gráficos, existe uma boa concordância entre os dados preditos pelo modelo e os observados durante o ensaio de secagem às diferentes condições aplicadas, pois a curva que representa o modelo logarítmico (traço vermelho) coincide com os pontos experimentais (pontos azuis).

TABELA 10 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS APLICADOS À DIFERENTES ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON E CONDIÇÕES DE SECAGEM

Modelo	Condição de secagem	Espumas com emulsificante			Espumas com ovoalbumina		
		R ²	ϕ^2	RQMR	R ²	ϕ^2	RQMR
Newton	0,5cm – 50°C	0,989	0,0020	0,0434	0,985	0,0014	0,0365
	1,5cm – 50°C	0,974	0,0015	0,0387	0,984	0,0019	0,0425
	1,0cm – 60°C	0,975	0,0023	0,0472	0,984	0,0015	0,0370
	0,5cm – 70°C	0,985	0,0015	0,0369	0,989	0,0012	0,0320
	1,5cm – 70°C	0,984	0,0012	0,0342	0,986	0,0020	0,0438
Henderson e Pabis	0,5cm – 50°C	0,990	0,0035	0,0556	0,987	0,0042	0,0594
	1,5cm – 50°C	0,979	0,0096	0,0950	0,988	0,0060	0,0741
	1,0cm – 60°C	0,980	0,0082	0,0859	0,987	0,0047	0,0644
	0,5cm – 70°C	0,986	0,0040	0,0562	0,990	0,0028	0,0458
	1,5cm – 70°C	0,988	0,0046	0,0650	0,989	0,0058	0,0726
Logarítmico	0,5cm – 50°C	0,998	$3,24 \times 10^{-10}$	$1,65 \times 10^{-5}$	0,993	$1,08 \times 10^{-14}$	$9,02 \times 10^{-8}$
	1,5cm – 50°C	0,996	$1,74 \times 10^{-7}$	0,0004	0,997	$5,31 \times 10^{-10}$	$2,15 \times 10^{-5}$
	1,0cm – 60°C	0,992	$5,66 \times 10^{-11}$	$6,96 \times 10^{-6}$	0,996	$5,37 \times 10^{-11}$	$6,65 \times 10^{-6}$
	0,5cm – 70°C	0,992	$2,08 \times 10^{-14}$	$1,21 \times 10^{-7}$	0,994	$7,43 \times 10^{-15}$	$6,81 \times 10^{-8}$
	1,5cm – 70°C	0,993	$4,23 \times 10^{-11}$	$6,06 \times 10^{-6}$	0,997	$3,24 \times 10^{-12}$	$1,68 \times 10^{-6}$
Page	0,5cm – 50°C	0,994	0,0025	0,0470	0,999	0,0004	0,0188
	1,5cm – 50°C	0,995	0,0039	0,0604	0,998	0,0020	0,0427
	1,0cm – 60°C	0,996	0,0024	0,0468	0,997	0,0015	0,0368
	0,5cm – 70°C	0,998	0,0005	0,0209	1,000	0,0002	0,0127
	1,5cm – 70°C	0,999	0,0001	0,0106	0,998	0,0016	0,0380
Midili modificado	0,5cm – 50°C	0,998	$3,84 \times 10^{-5}$	0,0057	0,999	$4,12 \times 10^{-5}$	0,0056
	1,5cm – 50°C	0,998	0,0002	0,0146	0,999	0,0001	0,0107
	1,0cm – 60°C	0,996	0,0003	0,0159	0,998	$8,22 \times 10^{-5}$	0,0082
	0,5cm – 70°C	0,998	$6,12 \times 10^{-5}$	0,0065	1,000	$8,19 \times 10^{-6}$	0,0023
	1,5cm – 70°C	0,999	0,0001	0,0101	0,998	$5,31 \times 10^{-5}$	0,0068
Dois termos	0,5cm – 50°C	0,990	0,0039	0,0556	0,987	0,0053	0,0594
	1,5cm – 50°C	0,979	0,0102	0,0950	0,988	0,0066	0,0741
	1,0cm – 60°C	0,980	0,0091	0,0859	0,987	0,0054	0,0644
	0,5cm – 70°C	0,986	0,0053	0,0562	0,990	0,0042	0,0458
	1,5cm – 70°C	0,988	0,0051	0,0650	0,989	0,0065	0,0734
Dois termos exponencial	0,5cm – 50°C	0,989	0,0021	0,0432	0,985	0,0016	0,0371
	1,5cm – 50°C	0,973	0,0016	0,0393	0,984	0,0020	0,0431
	1,0cm – 60°C	0,975	0,0027	0,0494	0,984	0,0016	0,0378
	0,5cm – 70°C	0,984	0,0018	0,0376	0,989	0,0014	0,0324
	1,5cm – 70°C	0,984	0,0014	0,0359	0,986	0,0022	0,0452

* continua na próxima página

TABELA 10 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS APLICADOS À DIFERENTES ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON E CONDIÇÕES DE SECAGEM - continuação

Aproximação por difusão	0,5cm – 50°C	0,995	0,0025	0,0459	0,998	0,0010	0,0268
	1,5cm – 50°C	0,994	0,0062	0,0753	0,997	0,0025	0,0467
	1,0cm – 60°C	0,993	0,0042	0,0598	0,996	0,0020	0,0411
	0,5cm – 70°C	0,997	0,0011	0,0278	0,999	0,0003	0,0143
	1,5cm – 70°C	0,998	0,0005	0,0218	0,997	0,0020	0,0418
Wang e Singh	0,5cm – 50°C	0,998	0,0006	0,0237	0,997	$1,44 \times 10^{-6}$	0,0011
	1,5cm – 50°C	0,998	0,0003	0,0179	1,000	$1,54 \times 10^{-5}$	0,0038
	1,0cm – 60°C	0,997	0,0004	0,0184	0,999	$1,51 \times 10^{-5}$	0,0036
	0,5cm – 70°C	0,997	$5,23 \times 10^{-8}$	0,0002	0,995	$8,31 \times 10^{-5}$	0,0079
	1,5cm – 70°C	0,995	$8,2 \times 10^{-6}$	0,0027	0,999	$1,72 \times 10^{-7}$	0,0004

FONTE: O autor (2015).

Outra forma de se verificar o ajuste do modelo aplicado aos dados experimentais, é a partir da comparação entre os valores de razão de umidade coletados durante os experimentos pelos valores preditos pela modelagem. A linha de ajuste entre os dados observados *versus* os preditos apresenta uma inclinação de praticamente 45°, tanto para as espumas obtidas com suco de yacon (Figura 23) quanto as com suco concentrado de yacon (Figura 24), o que denota o excelente ajuste do modelo logarítmico aos dados experimentais, auxiliando a afirmação de que este modelo pode ser utilizado para a representação do processo de secagem das espumas de yacon por camada de espuma utilizadas neste trabalho.

Os parâmetros obtidos pela aplicação do modelo logarítmico aos dados de secagem das espumas de suco de yacon e suco concentrado de yacon estão expressos na Tabela 11. Tanto para as espumas de suco quanto as de suco concentrado, observou-se que a magnitude da constante de secagem (k) aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem e reduziu com o aumento da espessura da camada de espuma. Quando avaliou-se a influência da concentração de sólidos solúveis totais do suco no valor da constante, observou-se um comportamento inversamente proporcional, onde o valor de k reduziu com o aumento da concentração de sólidos solúveis totais. Segundo Babalis e Belessiotis (2004) o valor de k pode ser utilizado como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada à difusividade efetiva e à difusão líquida que controla o processo.

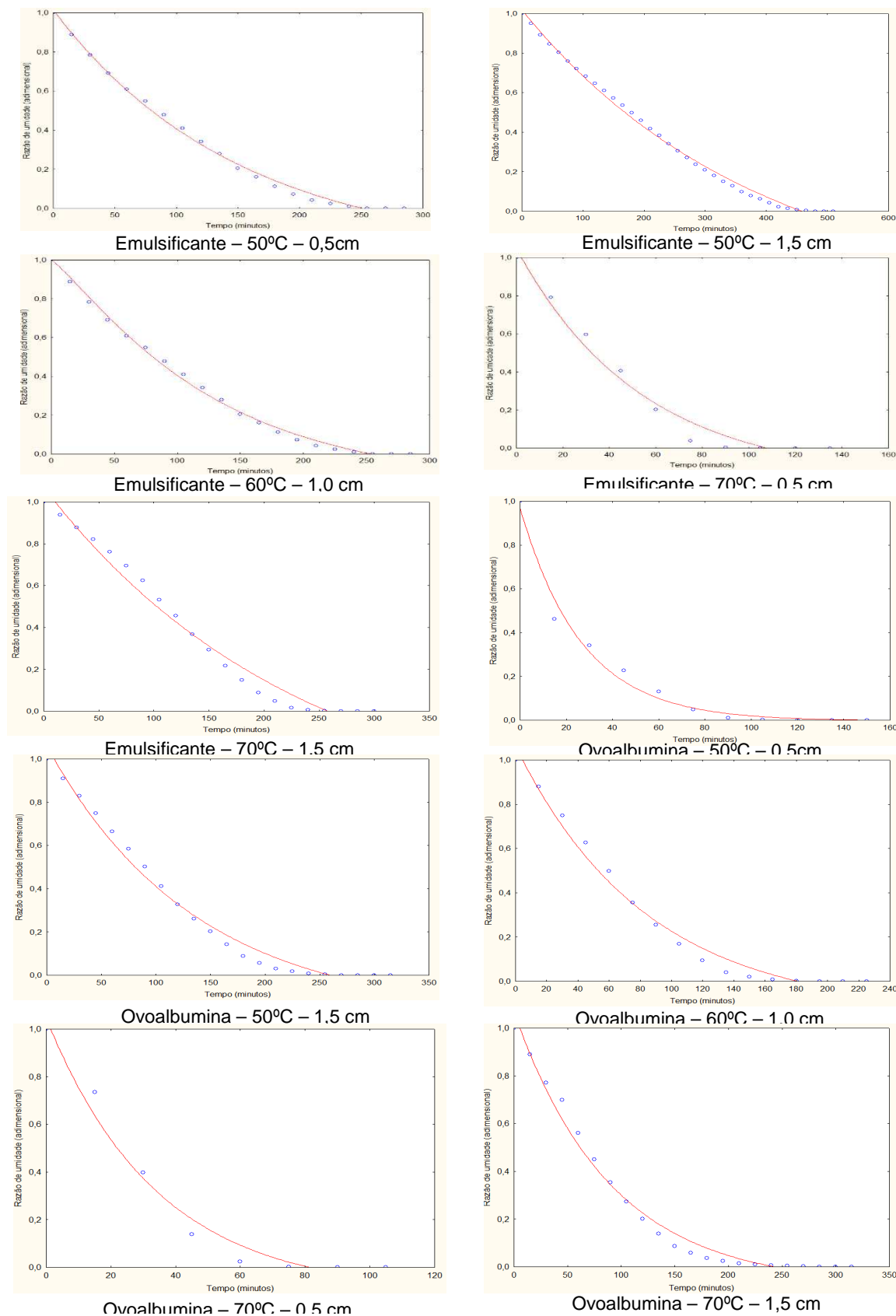


FIGURA 21 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO LOGARÍTMICO EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE UMIDADE DURANTE A SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUÇO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA

FONTE: O autor (2015).

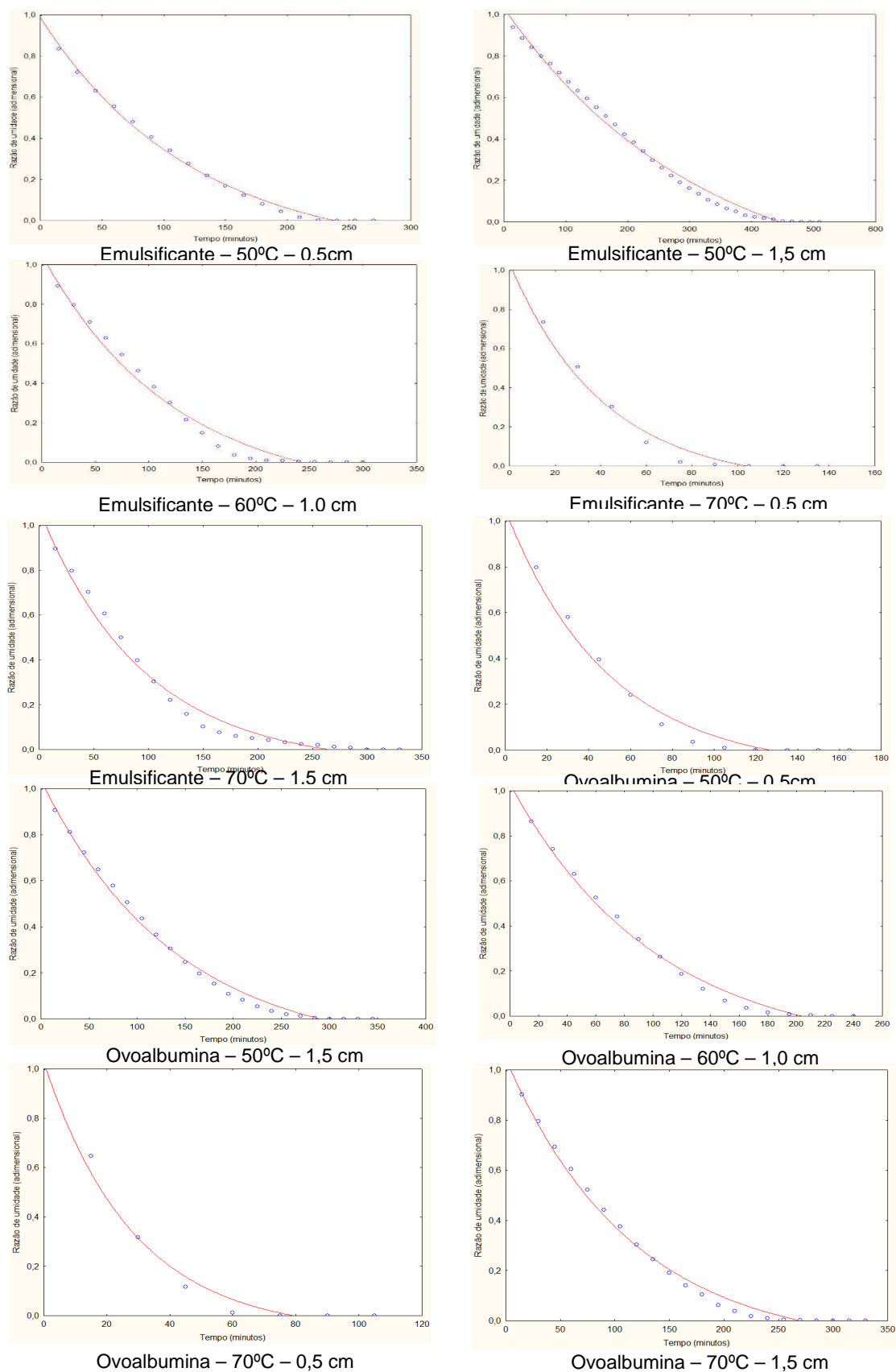


FIGURA 22 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO LOGARÍTMICO EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE UMIDADE DURANTE A SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUÇO CONCENTRADO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA

FONTE: O autor (2015).

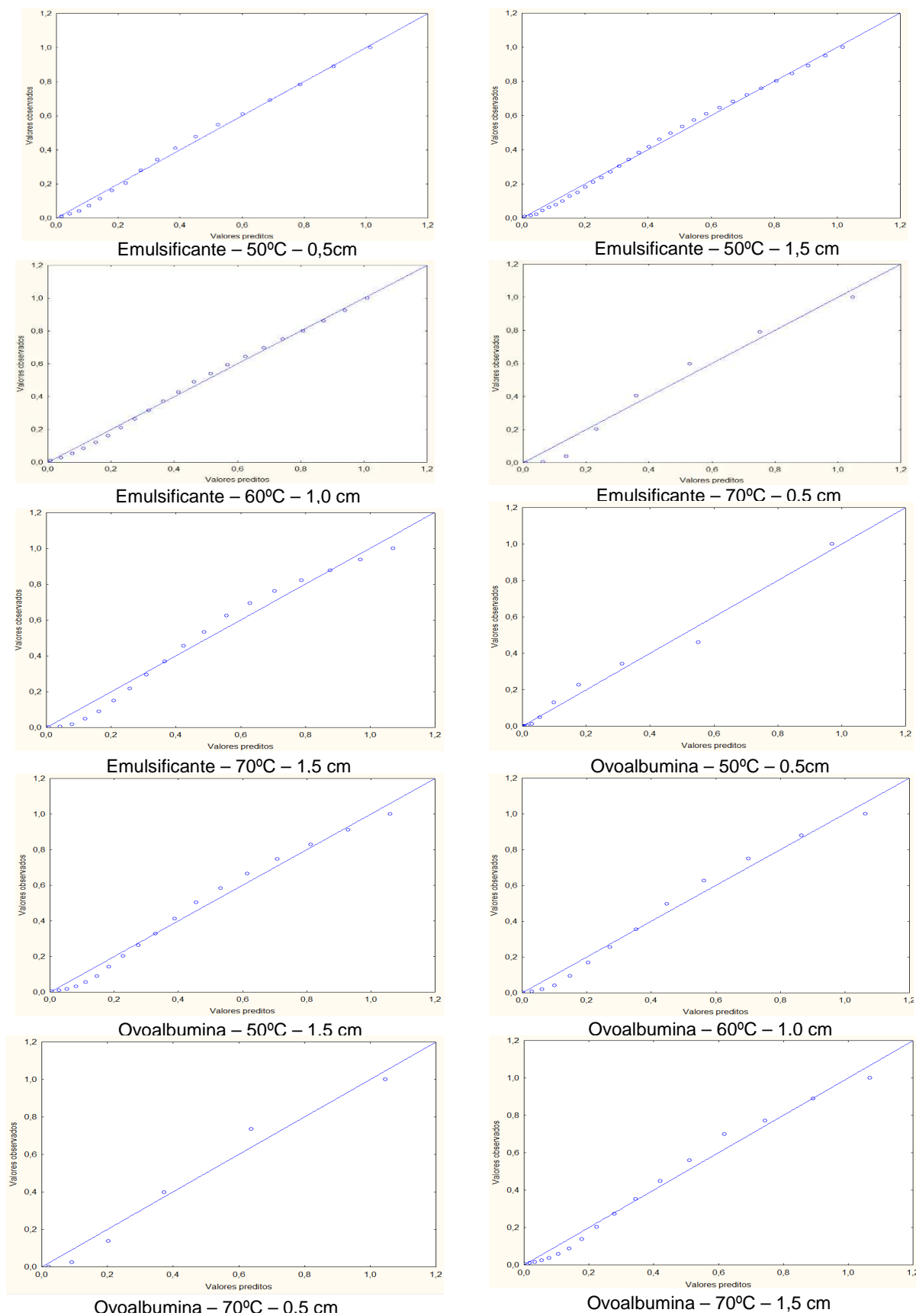


FIGURA 23 – VALORES OBSERVADOS *VERSUS* VALORES PREDITOS PELO MODELO LOGARÍTMICO PARA AS CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA

FONTE: O autor (2015).

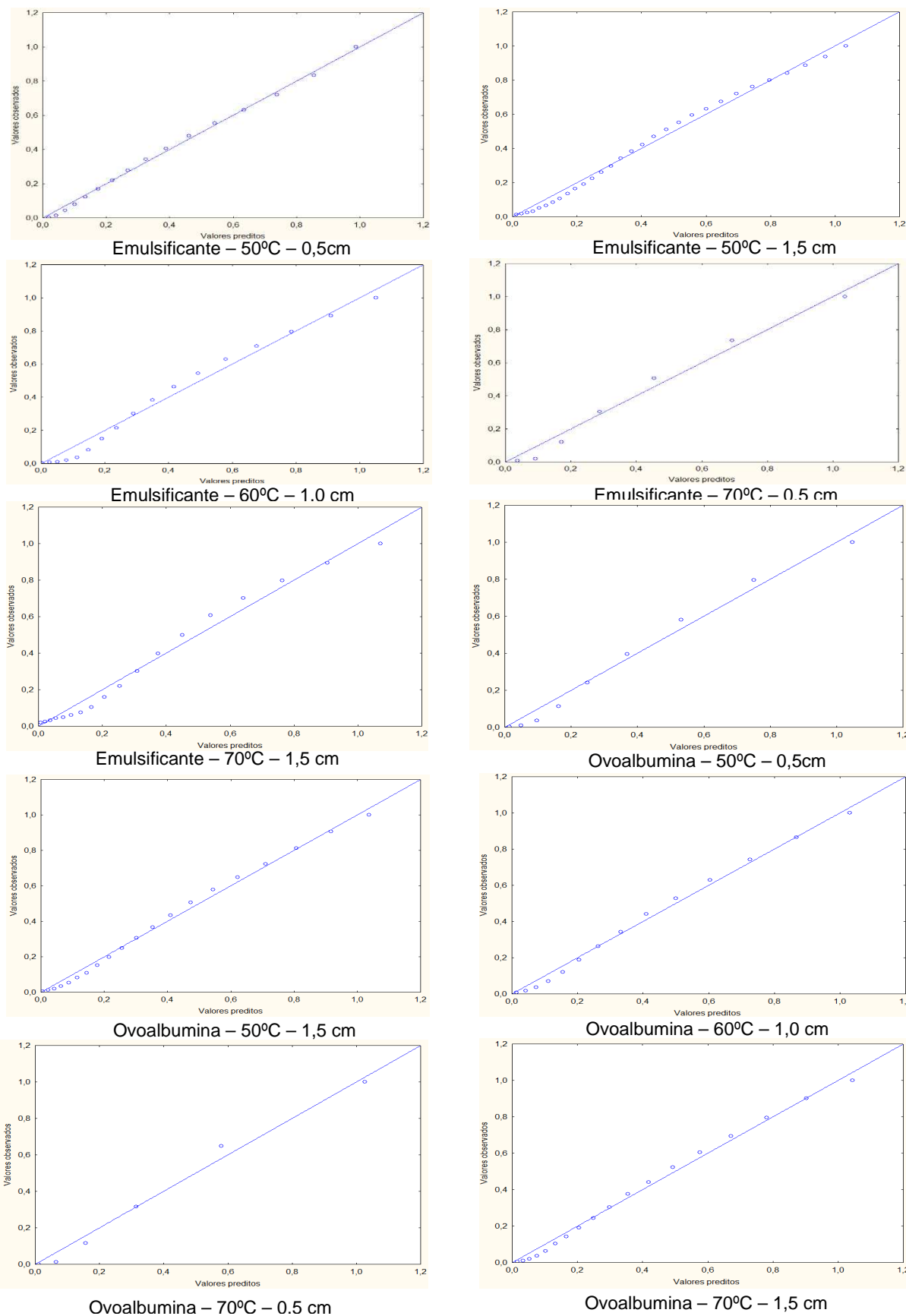


FIGURA 24 - VALORES OBSERVADOS *VERSUS* VALORES PREDITOS PELO MODELO LOGARÍTMICO PARA AS CURVAS DE SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON COM EMULSIFICANTE E COM OVOALBUMINA

FONTE: O autor (2015).

TABELA 11 – PARÂMETROS DO MODELO LOGARÍTMICO APLICADO AOS DADOS DE DESIDRATAÇÃO DE ESPUMAS DE SUÇO E SUÇO CONCENTRADO DE YACON SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

	Condições de secagem (espessura da camada/ temperatura)	Espumas com emulsificante			Espumas com ovoalbumina		
		Constantes			Constantes		
		a	c	k	a	c	k
Espumas de suco de yacon	0,5cm – 50°C	1,2484	-0,2341	0,0067	0,9726	0,003	0,0375
	1,5cm – 50°C	1,4666	-0,4487	0,0026	1,2433	-0,1822	0,0074
	1,0cm – 60°C	1,2191	-0,1676	0,0082	1,2020	-0,1383	0,0119
	0,5cm – 70°C	1,2097	-0,1614	0,0187	1,1542	-0,1079	0,0291
	1,5cm – 70°C	1,6046	-0,5345	0,0043	1,1449	-0,0774	0,0111
Espumas de suco concentrado de yacon	0,5cm – 50°C	1,1540	-0,1661	0,0081	1,1337	-0,0864	0,0202
	1,5cm – 50°C	1,3680	-0,3352	0,0032	1,1845	-0,1472	0,0072
	1,0cm – 60°C	1,1538	-0,1676	0,0093	1,1923	-0,1616	0,0098
	0,5cm – 70°C	1,1268	-0,0901	0,0243	1,0949	-0,0672	0,0252
	1,5cm – 70°C	1,1420	-0,0717	0,0104	1,1571	-0,1130	0,0086

FONTE: O autor (2015).

7.2.3. Difusividade efetiva

Sendo uma importante propriedade de transporte, o coeficiente de difusão efetivo é necessário no desenho e otimização de qualquer processo que envolva movimento interno de umidade (PRASAD *et al.*, 2010). Essencialmente, ele representa a interação de todos os parâmetros que exercem influência no fenômeno de transferência de massa. Assim como uma propriedade intrínseca dos materiais biológicos, a variação observada durante o processo de secagem é uma função complexa, dependente da temperatura do processo, do conteúdo inicial de umidade do material, dos parâmetros físicos inter-relacionados (porosidade, densidade) e da interação entre os componentes do material (amido, proteína, gordura) com a água (KARATHANOS *et al.*, 1990).

O ajuste linear obtido a partir da representação gráfica do logaritmo da razão de umidade pelo tempo de secagem das espumas de suco e suco concentrado de yacon com emulsificante e com ovoalbumina (Figuras 25 e 26 – A e B), permitiu a obtenção dos valores utilizados para o cálculo da difusividade efetiva pela segunda Lei de Fick (Equação 10).

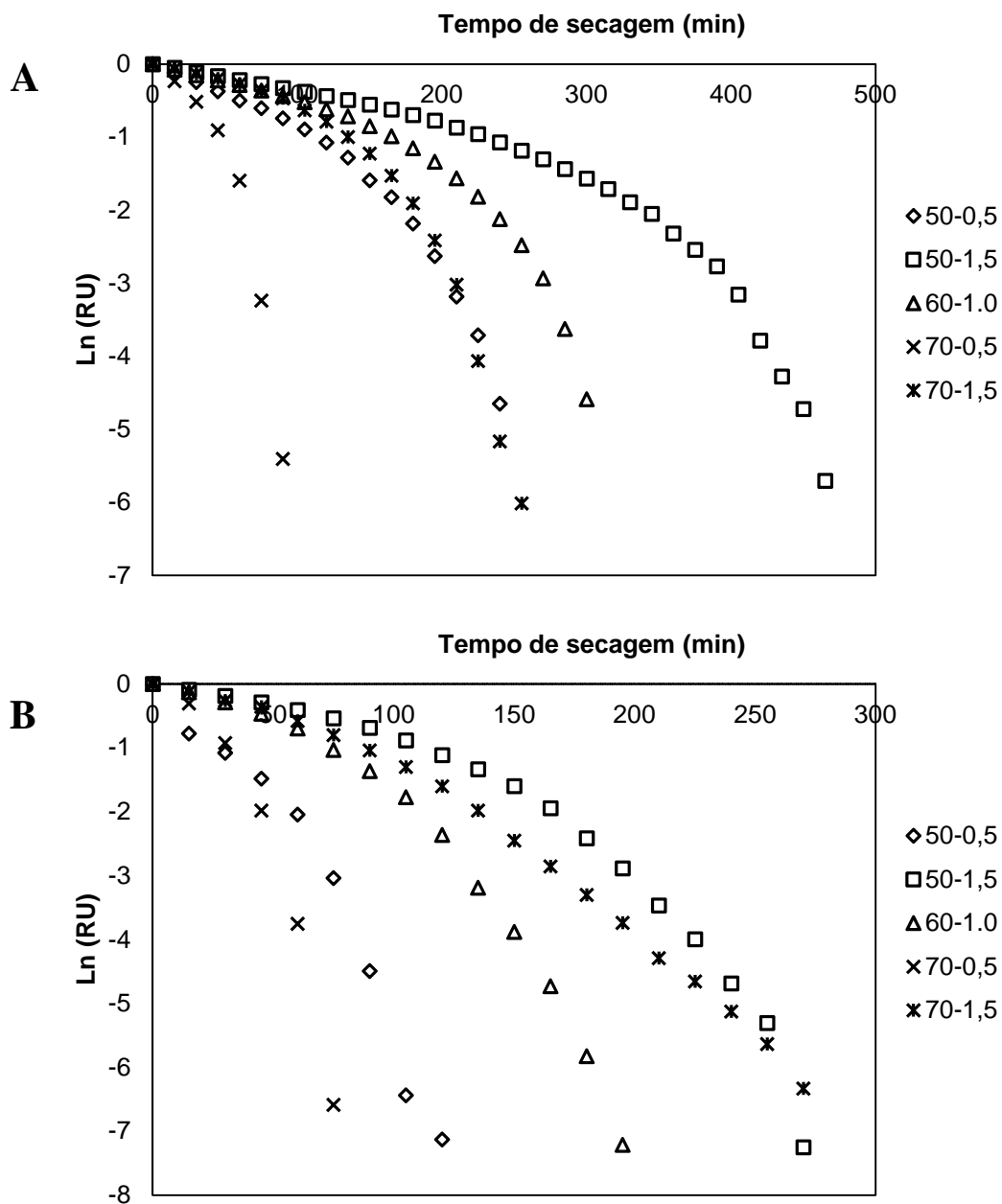


FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DO LOGARITMO DA RAZÃO DE UMIDADE PELO TEMPO DE SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUÇO DE YACON OBTIDAS COM EMULSIFICANTE (A) E OVOALBUMINA (B) SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

FONTE: O autor (2015).

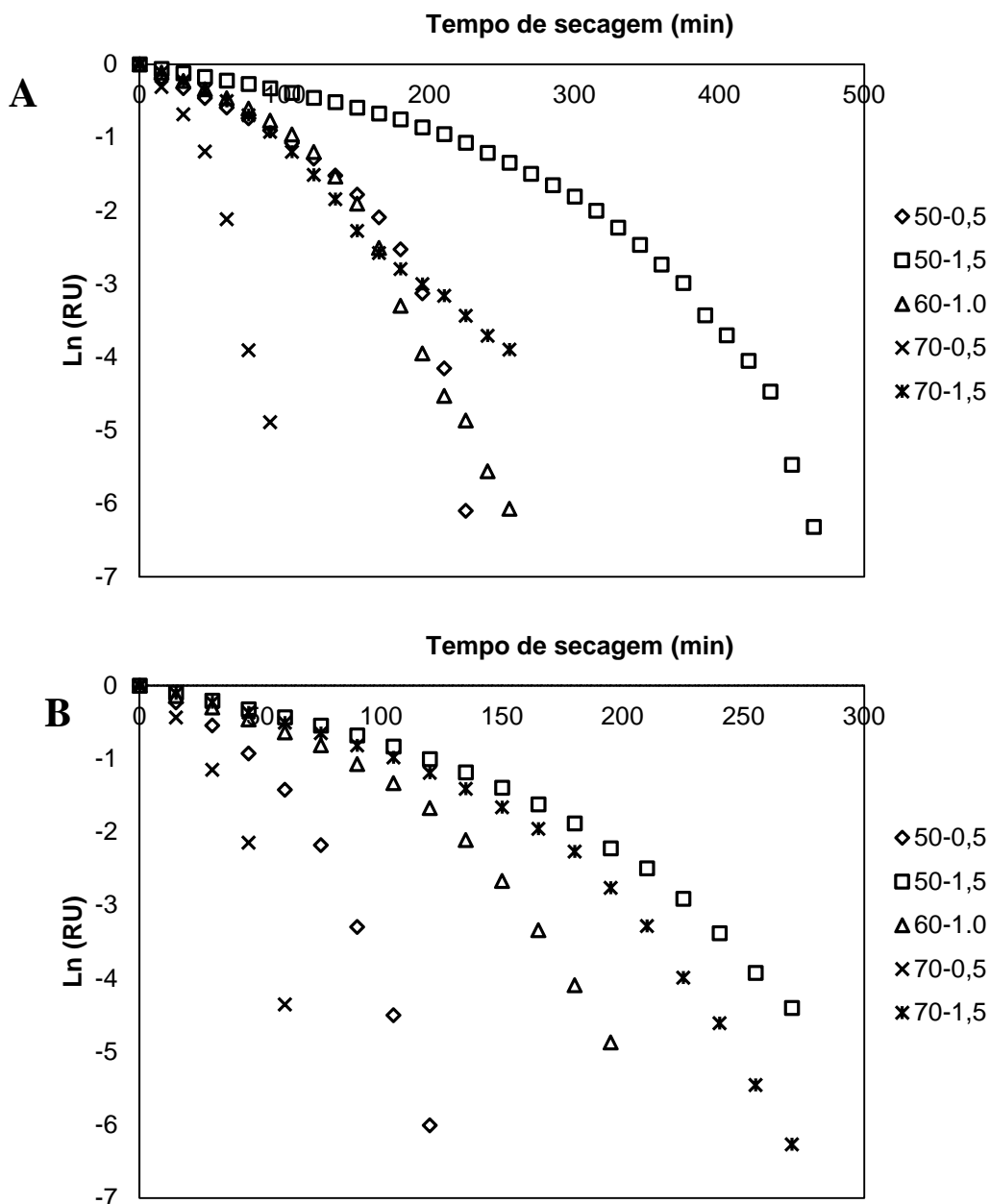


FIGURA 26 - REPRESENTAÇÃO DO LOGARITMO DA RAZÃO DE UMIDADE PELO TEMPO DE SECAGEM DAS ESPUMAS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDAS COM EMULSIFICANTE (A) E OVOALBUMINA (B) SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

FONTE: O autor (2015).

Os valores obtidos de difusividade efetiva (D_{eff}) para as espumas de suco de yacon com emulsificante variaram entre $0,347$ e $2,562 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e para as com ovoalbumina entre $1,274$ e $3,956 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, estas apresentando maiores valores (Tabela 12). Os valores encontrados neste estudo estão de acordo com a faixa relatada para alimentos, que varia de 10^{-12} a $10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (MCMINN & MAGEE, 1999).

Quando se fala dos valores de difusividade efetiva das espumas de suco concentrado, aquelas formadas por emulsificante apresentaram valores entre 0,399 e $3,327 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e as formadas por ovoalbumina valores entre 0,839 e $3,657 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tabela 12), e quando esses valores são comparados aos obtidos para as espumas de suco de yacon observou-se uma leve redução da difusividade efetiva para as espumas de ovoalbumina e um leve aumento para as espumas com emulsificante.

TABELA 12 -VALORES DE DIFUSIVIDADE EFETIVA DAS ESPUMAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON SUBMETIDAS À DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

	Condições de secagem (espessura da camada/ temperatura)	Difusividade efetiva x 10^{-11} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	
		Espuma com emulsificante	Espuma com ovoalbumina
Espumas de suco de yacon	0,5cm – 50°C	0,347	1,274
	1,5cm – 50°C	1,509	3,458
	1,0cm – 60°C	0,909	2,104
	0,5cm – 70°C	0,876	1,358
	1,5cm – 70°C	2,562	3,956
Espumas de suco concentrado de yacon	0,5cm – 50°C	0,399	0,839
	1,5cm – 50°C	1,625	2,925
	1,0cm – 60°C	1,522	1,834
	0,5cm – 70°C	1,029	1,452
	1,5cm – 70°C	3,327	3,657

FONTE: O autor (2015).

Menores valores de difusividade efetiva para as espumas formadas por emulsificante (composto essencialmente por ácidos graxos) podem ser explicados pela influência que a composição química do produto exerce sobre que essa propriedade, em particular o percentual de gordura do produto (MARINOS-KOURIS & MAROULIS, 1995). Jason (1958) estudou o efeito do conteúdo de gordura na difusão de umidade no músculo de peixes e Alzamora e Chirife (1980) o efeito do conteúdo de óleo na transferência de água durante a secagem de abacate. Ambos os autores encontraram uma correlação negativa entre o percentual de gordura e a difusividade efetiva destes alimentos, sendo este efeito atribuído à característica hidrofóbica das

moléculas de óleos e gorduras, que impõe resistência à transferência de umidade (McMINN & MAGEE, 1999).

O comportamento observado durante a secagem das espumas de suco e suco concentrado de yacon, indica que o aumento da temperatura do ar de secagem causou uma elevação dos valores da difusividade efetiva, podendo ser causado pelo aumento da pressão de vapor no interior da espuma submetida a maiores temperaturas (SHIBY & MISHRA, 2007). Com o aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida de resistência do fluido ao escoamento, variações desta propriedade implicam alterações na difusão da água nos capilares da matriz sólida da amostra de modo a favorecer a movimentação deste fluido no produto (GONELI *et al.*, 2009).

A influência do aumento das temperaturas de desidratação na difusividade também foi encontrada em trabalhos envolvendo bagaço de coco (JENA & DAS, 2007), fatias de manga (JAYA & DAS, 2003) e banana (SILVA *et al.*, 2009), esses pesquisadores verificaram que em seus processos de secagem, a grandeza foi fortemente influenciada pela temperatura, sendo esta diretamente proporcional.

Mediante os resultados, verificou-se que o valor da D_{eff} foi influenciado também pela espessura da camada de espuma, onde o aumento deste parâmetro resultou em um aumento na D_{eff} . Comportamento similar foi encontrado por Nguyen e Price (2007) em estudo de secagem de fatias de banana de 10 e 20 mm e por Silva e colaboradores (2009) ao variarem a espessura de fatias de banana entre 5 e 10 mm.

7.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUCOS, ESPUMAS E SUCOS EM PÓ

Finalizado o processo de secagem, foi verificado que apenas as espumas formadas por ovoalbumina puderam ser convertidas ao suco em pó. Aquelas formadas por emulsificante formaram uma camada viscosa e pegajosa sobre os leitos de secagem. Este efeito pode ser atribuído à composição do emulsificante, essencialmente por ácidos graxos (monoestearato de sorbitano), cujo ponto de fusão é em torno de 45-50°C, o que pode ter levado à perda de estabilidade da espuma

durante a secagem e mudado o seu comportamento físico (BENNION & BAMFORD, 1997; GUNSTONE & PADLEY, 1997).

O mesmo comportamento encontrado neste trabalho foi relatado durante a utilização deste mesmo agente emulsificante para secagem em camada de espuma de polpa de araçá-boi (SOARES, 2009) e polpa de pitanga roxa (BARRETO, 2011).

A fim de facilitar as discussões subseqüentes, quando se fala de suco de yacon em pó, refere-se aos obtidos a partir da secagem de espumas de suco e suco concentrado de yacon formadas com ovoalbumina, como exemplo às da Figura 27 – A e B, onde estão expostas as espumas desidratadas, recém removidas das fôrmas e grosseiramente trituradas.

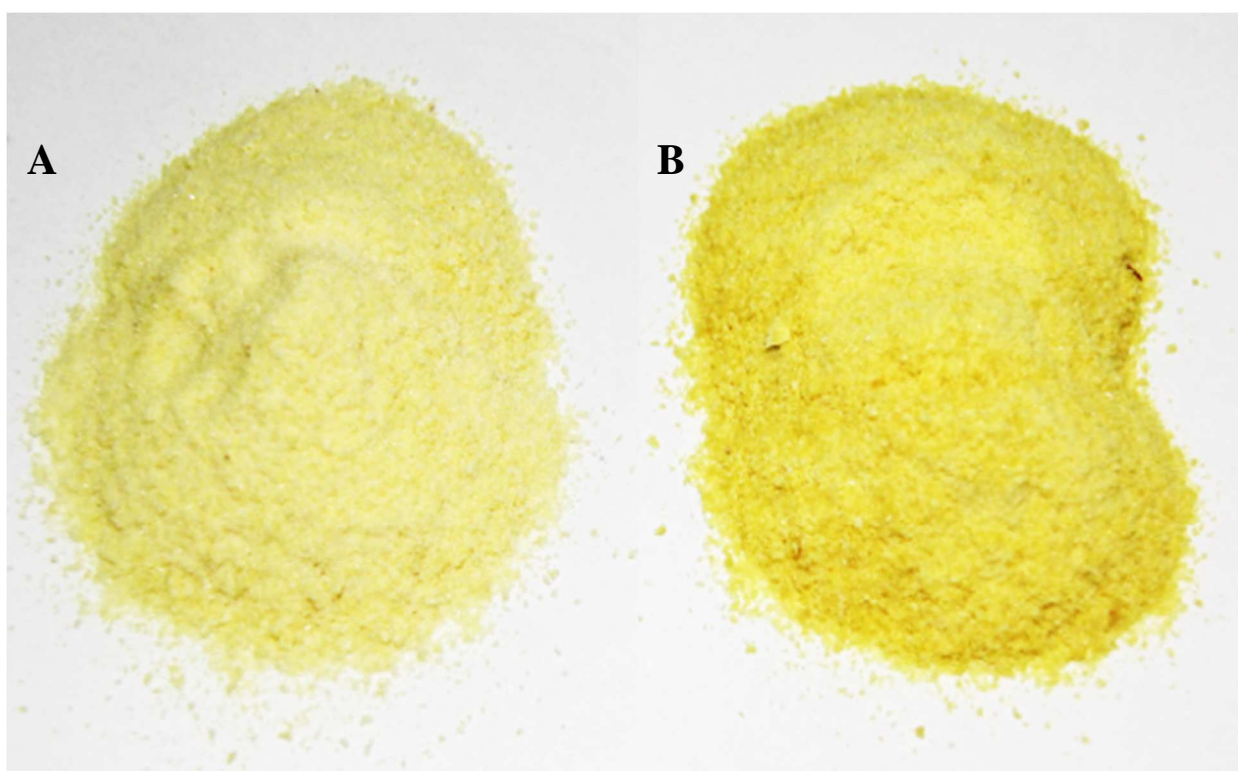


FIGURA 27- PÓS DE SUCO DE YACON (A) E DE SUCO DE YACON CONCENTRADO (B), OBTIDOS PELA SECAGEM DE ESPUMAS DE SUCO COM OVOALBUMINA A UMA ESPESSURA DE 1,0 CM E TEMPERATURA DE 60°C

Fonte: O autor (2015).

A composição físico-química das espumas foi analisada com o intuito de comparação para avaliar a influência das condições de secagem aplicadas sobre estas características. A composição aproximada das espumas de suco e suco concentrado de yacon apresentaram valores elevados para umidade e Aa, com percentual de proteína maior para a amostra de espuma elaborada com suco de yacon e de carboidratos maior para a com suco concentrado de yacon, fator esperado, por se tratar de uma amostra com maior teor de sólidos solúveis totais (Tabela 13).

TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON E SUAS RESPECTIVAS ESPUMAS

Amostra	Características físico-químicas					
	Umidade (g.100 g ⁻¹)	Aa	Cinzas (g.100 g ⁻¹)	Proteína (g.100 g ⁻¹)	Lipídeos (g.100 g ⁻¹)	Carboidratos (g.100 g ⁻¹)
Espuma de suco de yacon	77,31 ± 0,08	0,98 ± 0,001	1,12 ± 0,01	13,5 ± 0,06	0,02 ± 0,001	8,16 ± 0,04
Espuma de suco de yacon concentrado	64,02 ± 0,11	0,96 ± 0,001	1,76 ± 0,01	11,5 ± 0,23	0,02 ± 0,001	23,03 ± 0,11

FONTE: O autor (2015).

O percentual de umidade dos sucos em pó variou de 6,58% (SY - 1,5cm - 50°C) à 3,51% (SY - 0,5cm - 70°C), valores semelhantes a produtos comerciais de baixa umidade como café solúvel (4,18 - 5,25%) e sopa de tomate em pó (3,4 - 4,0%), indicando uma disponibilidade muito pequena de água para a ocorrência de reações químicas e crescimento microbológico (JAYA & DAS, 2004). A partir da desidratação de fatias de yacon e posterior moagem, Pereira e colaboradores (2013) elaboraram um produto com 8,09% de umidade depois de 96 horas de secagem à 55°C, tempo 16 vezes maior do que a desidratação da camada de 1,5 cm de espuma de suco de yacon à 50°C que gerou partículas de pó com 6,58% de umidade, demonstrando a capacidade de rápida retirada de umidade do processo por camada de espuma utilizado neste trabalho.

O conteúdo de umidade de um alimento está inteiramente ligado à sua estabilidade, porém ele não pode estar relacionado apenas com o conteúdo quantitativo de água, mas também com a disponibilidade desta água para ser utilizada

nas reações (LEWICKI, 2004). Este parâmetro é conhecido como atividade de água e é definido como a razão entre o vapor de pressão da água do alimento pela pressão de vapor da água pura à mesma temperatura (BERK, 2009).

A atividade de água é um importante fator que influencia significativamente a vida útil dos alimentos, a diminuição do seu valor evita o desenvolvimento de microrganismos, diminui a velocidade de reações enzimáticas e retarda o escurecimento não enzimático (BELITZ *et al.*, 2009). Todas as amostras apresentaram valores de *Aa* inferiores à 0,25 (Tabela 14), muito inferiores às das espumas (0,96 - 0,98), o que é bastante favorável à estabilidade dos sucos em pó, indicando que o risco de deterioração do produto é mínimo, uma vez que para valores de *Aa* entre 0,2 e 0,3 não há risco de proliferação microbiana e há redução das taxas de atividade oxidativa e enzimática (RAO *et al.*, 2005).

Os resultados obtidos para a *Aa* dos sucos de yacon em pó estão de acordo com outros trabalhos que envolveram o processo de desidratação por camada de espuma. Como exemplos tem-se a secagem de suco de guavira que gerou pós com *Aa* na faixa de 0,2-0,3 (BREDA *et al.*, 2012); a secagem de espumas de iogurte com ovoalbumina às temperaturas de 50, 60 e 70°C que resultaram em produtos finais com *Aa* entre 0,32-0,35 (KRASAEKOOPT & BHATIA, 2012) e a secagem de espumas de figo da Índia à 90°C que gerou pós com 0,31 de *Aa* (LISBÔA *et al.*, 2012).

O resíduo mineral fixo (também conhecido como cinzas) é o produto inorgânico que permanece após a queima da matéria orgânica da amostra, que é transformada em dióxido de carbono, água e óxido nítrico (CECCHI, 2009). Os elementos minerais se apresentam sob a forma de óxidos, sulfatos, fosfatos, fosfatos, silicatos e cloretos, dependendo das condições de incineração e da composição do alimento (CAMPBELL-PLATT, 2009). A determinação do resíduo mineral fixo (RMF) fornece uma indicação da riqueza dos elementos minerais da amostra, mas não necessariamente apresenta a mesma composição que a matéria mineral presente originalmente no alimento, pois pode haver perda por volatilização ou alguma interação entre os constituintes da amostra (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

As amostras de suco de yacon em pó apresentaram percentual de RMF variando entre 4,37 e 5,08 e as de suco concentrado em pó, valores ligeiramente maiores, entre 5,38 e 5,73 (Tabela 14). Segundo Chitarra e Chitarra (2005) os frutos, hortaliças e tubérculos apresentam conteúdo relativamente elevado de minerais, no caso dos tubérculos de yacon, notadamente cálcio e fósforo. Mas é importante se

considerar que nos valores obtidos há também a participação do conteúdo mineral presente na ovoalbumina utilizada como agente espumante, cujo valor médio era de 6,0% (informação fornecida pelo fabricante).

TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

	Condições de secagem (espessura da camada/ temperatura)	Características físico-químicas					
		Umidade (%)	Aw	Cinzas (%)	Proteína (%)	Lipídeos (%)	Carboidratos (%)
Pós de suco de yacon	0,5cm – 50°C	6,24 ± 0,16 ^a	0,19 ± 0,001 ^a	4,53 ± 0,11 ^a	47,72 ± 0,09 ^a	0,28 ± 0,01 ^a	41,23 ± 0,20 ^a
	1,5cm – 50°C	6,58 ± 0,04 ^a	0,19 ± 0,001 ^a	4,37 ± 0,09 ^a	47,50 ± 0,29 ^a	0,25 ± 0,01 ^a	41,30 ± 0,25 ^a
	1,0cm – 60°C	5,50 ± 0,03 ^d	0,15 ± 0,001 ^d	4,49 ± 0,09 ^a	48,20 ± 0,53 ^a	0,2 ± 0,01 ^a	41,63 ± 0,45 ^a
	0,5cm – 70°C	3,51 ± 0,02 ^b	0,10 ± 0,001 ^b	5,08 ± 0,31 ^a	49,19 ± 0,23 ^a	0,27 ± 0,01 ^a	42,06 ± 0,52 ^a
	1,5cm – 70°C	4,09 ± 0,05 ^c	0,12 ± 0,001 ^c	4,63 ± 0,13 ^a	49,49 ± 0,15 ^a	0,28 ± 0,01 ^a	41,51 ± 0,20 ^a
	Pós de suco de yacon concentrado	0,5cm – 50°C	4,91 ± 0,09 ^c	0,20 ± 0,001 ^c	5,68 ± 0,06 ^a	29,37 ± 0,09 ^a	0,30 ± 0,01 ^a
1,5cm – 50°C		6,19 ± 0,05 ^a	0,22 ± 0,001 ^a	5,38 ± 0,12 ^a	29,13 ± 0,55 ^a	0,28 ± 0,02 ^a	59,00 ± 0,62 ^a
1,0cm – 60°C		5,70 ± 0,07 ^b	0,21 ± 0,001 ^b	5,50 ± 0,14 ^a	30,29 ± 0,36 ^a	0,32 ± 0,02 ^a	58,19 ± 0,49 ^a
0,5cm – 70°C		4,11 ± 0,05 ^e	0,12 ± 0,001 ^e	5,67 ± 0,06 ^a	30,13 ± 0,61 ^a	0,27 ± 0,01 ^a	59,82 ± 0,55 ^a
1,5cm – 70°C		4,31 ± 0,14 ^d	0,17 ± 0,001 ^d	5,73 ± 0,05 ^a	31,03 ± 0,44 ^a	0,26 ± 0,01 ^a	58,69 ± 0,32 ^a

* Os resultados compreendem a média ± desvio padrão. Para amostras do mesmo suco, em cada coluna, letras diferentes para cada tratamento, demonstram diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

FONTE: O autor (2015).

Devido à necessidade de adição de ovoalbumina para a formação e manutenção da estabilidade das espumas de suco de yacon durante a secagem, os sucos em pó apresentaram valores significativos de proteína (Tabela 14), que não são encontrados naturalmente nas raízes, cujo valor médio encontra-se entre 0,2 – 2,0 % (VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ, 2003). A legislação brasileira por meio da RDC 3.029 de 06 de abril de 1999 determina que um alimento para ser considerado suplemento proteico deve conter no mínimo 10 g de proteína por porção consumida. Se considerarmos uma porção de 25 g (02 colheres de sopa) deste suco em pó, uma

sugestão para sua utilização, seria para fins de suplementação, se for levado em conta apenas seu teor de proteínas.

O baixo teor lipídico das amostras secas foi influenciado pela composição do yacon e da ovoalbumina, que são alimentos com baixo teor de gordura. A composição média da ovoalbumina é de 0,35% (informação fornecida pelo fabricante) e a de tubérculos de yacon é entre 0,1 e 0,3% (VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ, 2003), portanto não teria como a mistura destes dois compostos resultar em um produto com elevado perfil lipídico.

As amostras de suco concentrado em pó apresentaram maiores concentrações de carboidratos do que as de suco em pó (Tabela 14). Esta variação é devido à diferença de concentração de sólidos solúveis totais do suco (8ºBrix) e do concentrado (24ºBrix). No caso do yacon, onde sua composição de hidratos de carbono é composta essencialmente por FOS e inulina (entre 40-70%) (DELGADO *et al.*, 2012), é importante que o suco em pó apresente um elevado teor de carboidratos, pois isso pode ser indício da funcionalidade que os pós obtidos possam desempenhar quando consumidos diretamente ou como ingredientes em formulações. A funcionalidade dos sucos em pó só pode ser confirmada a partir da quantificação dos oligofrutanos que indicará de fato o conteúdo real destes compostos entre os carboidratos presentes.

Resultados publicados por pesquisadores confirmam a importante participação dos FOS como principais constituintes da fração de carboidratos das raízes de yacon. Vasconcelos e colaboradores (2010) elaboraram farinhas por meio da secagem convectiva de fatias de yacon com 39,71% de carboidratos, 19,43% de FOS e 9,84% de inulina; Pedreschi e colaboradores (2003) utilizaram extratos de yacon com 63,7% de FOS como substrato para fermentação por microrganismos probióticos e Lago e colaboradores (2012) secaram por aspersão suco concentrado de yacon contendo 31,5% de inulina.

A influência das condições de secagem empregadas (espessura da camada de espuma e temperatura) sobre as características físico-químicas dos sucos em pó pôde ser avaliada através da aplicação da metodologia de superfície de resposta. Através do teste de análise de variância (ANOVA) observou-se que as variáveis não exerceram influência significativa sobre as respostas cinzas, lipídeos, proteínas e carboidratos, mas sim sobre a Aa e percentual de umidade.

De acordo com Richardson (2001) poucas diferenças são observadas nos teores de carboidratos, proteínas, fibras e cinzas, quando a variação no conteúdo de umidade é levada em consideração. As mudanças que ocorrem durante a secagem são principalmente químicas, particularmente se as reações enzimáticas são incluídas como mudanças químicas.

Através da aplicação da MSR para as respostas atividade de água e percentual de umidade, foram obtidos modelos, que estão apresentados na Tabela 15, lembrando que permaneceram apenas os coeficientes de regressão que se mostraram significativos quando o teste ANOVA foi aplicado. Os modelos apresentaram valores de R^2 e R^2 -ajustado maiores que 0,75, ou seja, os modelos apresentados conseguem explicar mais de 75% da variabilidade das respostas. Observou-se também que a falta de ajuste para todas as respostas não foi significativa ($p > 0,05$) indicando que os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais, podendo ser utilizados para fins preditivos.

Observando as equações obtidas para as amostras de suco de yacon em pó (Tabela 15), é possível verificar que para a Aa, o coeficiente positivo para a espessura da camada de espuma (x_1), negativo para a temperatura do ar de secagem (x_2) e positivo para a interação entre estes dois fatores ($x_1.x_2$) indica que quanto maior a espessura da camada, maior foi a Aa; quanto maior a temperatura, menor foi a Aa, e que a interação entre maiores valores de temperatura e maiores valores de espessura acabaram por aumentar a Aa. Para a resposta umidade, a espessura não afetou de forma significativa o resultado, sendo que apenas a temperatura e a interação entre os fatores definiram o processo. Desta forma, maiores temperaturas de desidratação geraram pós com menor teor de umidade e a interação gerou aumento da umidade, mas pelo menor valor de seu coeficiente, interferiu com menor peso.

TABELA 15 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA AS RESPOSTAS ATIVIDADE DE ÁGUA E PERCENTUAL DE UMIDADE DOS PÓS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

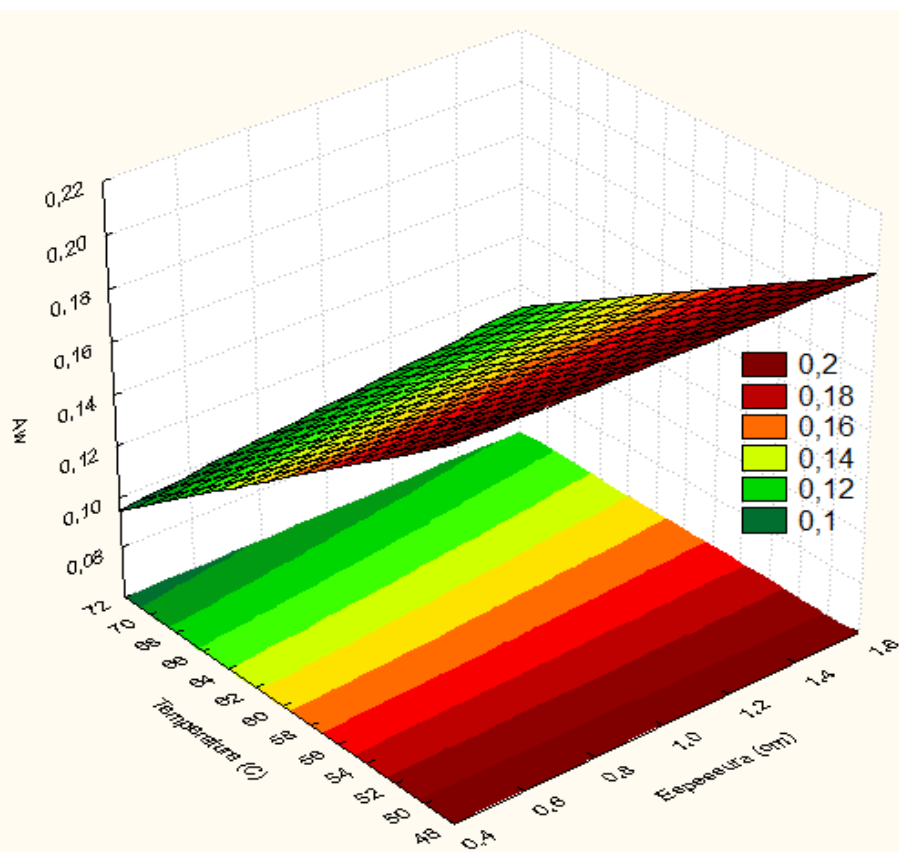
Resposta	Amostra dos sucos em pó	Modelo matemático	R ²	R ² ajustado	p-valor (modelo)
Atividade de água	SY	$Y = 0,4245 + 0,0323x_1 - 0,0046x_2 + 0,0006x_1.x_2$	0,9964	0,9954	p<0,001
	SYC	$Y = 0,3663 - 0,0036x_2 + 0,0006x_1.x_2$	0,8912	0,8738	p<0,001
Percentual					
de umidade”	SY	$Y = 13,0001 - 0,1380x_2 + 0,0073x_1.x_2$	0,9739	0,9696	p<0,001
	SYC	$Y = 4,3069 + 4,6025x_1 - 0,0644x_1.x_2$	0,8085	0,7769	p<0,001

FONTE: O autor (2015).

As equações obtidas para os pós de suco concentrado de yacon (Tabela 15) indicaram que a elevação da temperatura levou à redução da Aa e que a interação influenciou de forma a aumentar a Aa do produto final, mas não com a mesma grandeza que a temperatura sozinha exerceu. Para o percentual de umidade, a temperatura sozinha não exerceu influência, mas a espessura sozinha sim, onde um aumento da espessura aumentou a umidade do produto final, por sua vez, a interação entre os fatores levou à redução desta resposta.

A partir das equações para os modelos obtidos, foi possível construir as superfícies de resposta para a Aa e percentual de umidade para as amostras de suco de yacon (Figura 27) e suco de yacon concentrado (Figura 28).

A



B

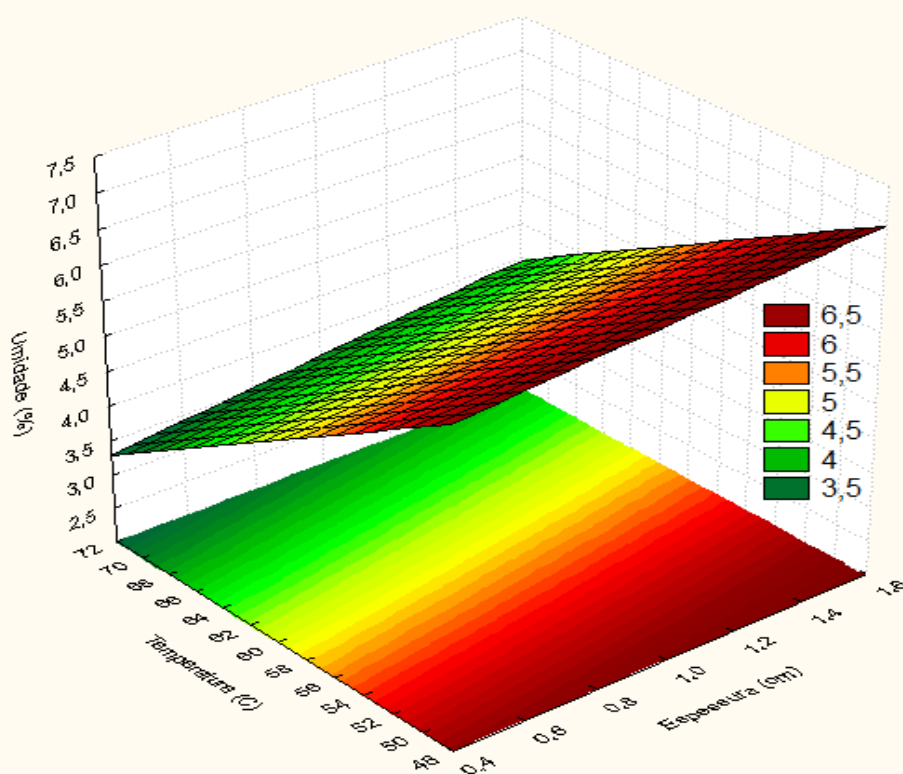


FIGURA 28 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO DE YACON – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ATIVIDADE DE ÁGUA (A) E UMIDADE (B)

FONTE: O autor (2015).

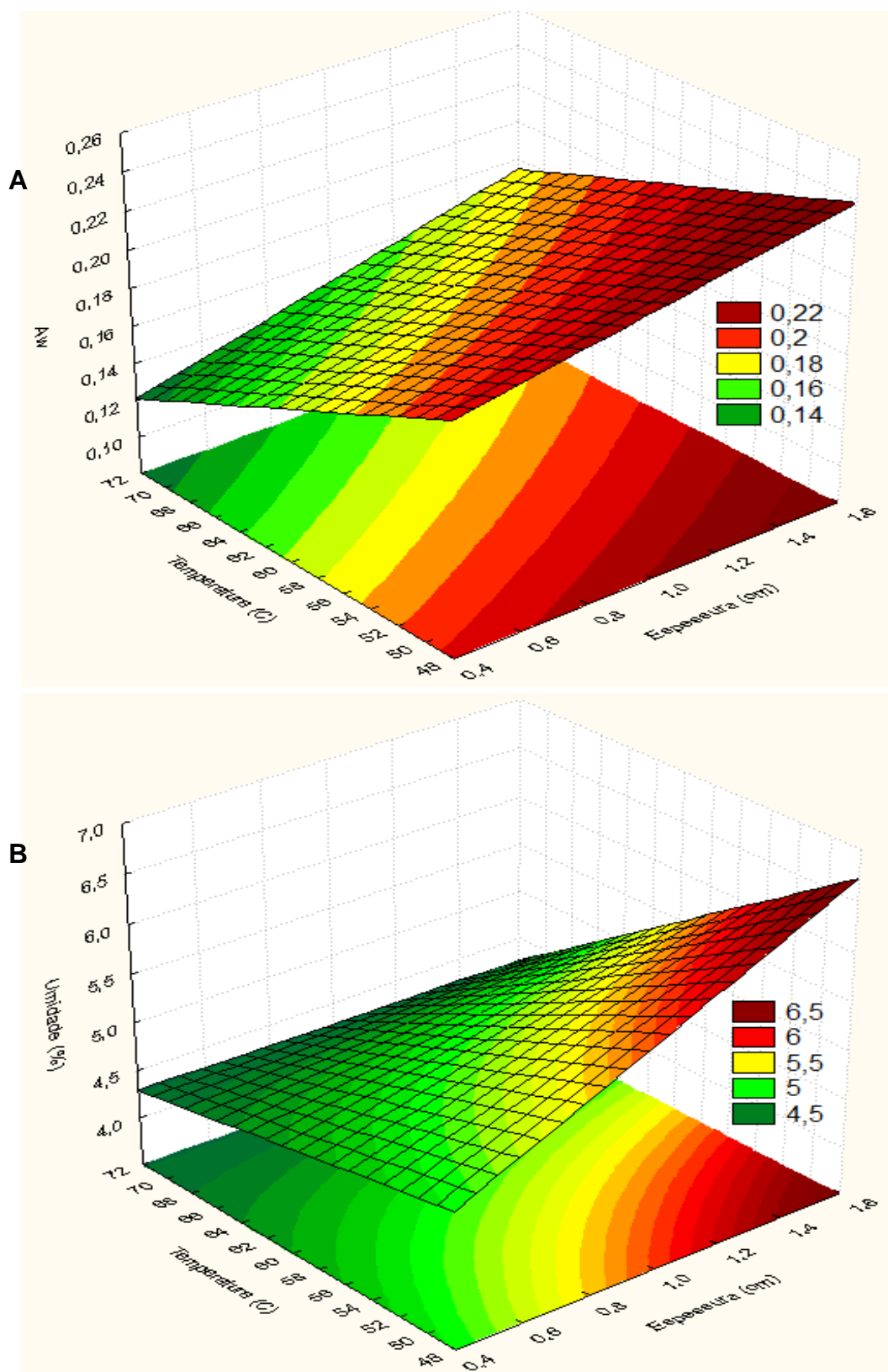


FIGURA 29 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO DE YACON CONCENTRADO – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ATIVIDADE DE ÁGUA (A) E UMIDADE (B)

FONTE: O autor (2015).

A influência da temperatura do ar de secagem sobre a Aa do produto final foi verificada por Lago e colaboradores (2012) durante secagem convectiva de suco de yacon, onde o aumento da temperatura de secagem diminuiu significativamente os valores de Aa dos produtos finais. Durante estudo da influência das condições do processo de secagem nas características físico-químicas e funcionais de leite de cabra, Reddy e colaboradores (2014) verificaram que o aumento de 20°C na temperatura gerou uma redução da Aa de 0,21 para 0,16. O uso de temperaturas mais altas implica em uma maior taxa de transferência de calor, o que leva a uma maior evaporação de água do produto, resultando em pós com uma Aa mais baixa (RATTI, 2009).

A variação na temperatura foi um fator que influenciou a diferença de umidade de sucos de manga em pó desidratados, onde as amostras expostas à 65°C apresentaram maior quantidade de água do que as desidratadas à 75 e 85°C (WILSON *et al.*, 2014). O emprego de MSR para estudo da secagem de açaí indicou a significativa influência do aumento da temperatura na redução do conteúdo de água das partículas do pó, indicando que à maiores temperaturas, há um aumento no gradiente de temperatura entre o ambiente e o ar de secagem, resultando em um aumento da força motriz de evaporação de água (TONON *et al.*, 2008).

7.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SUCOS DE YACON EM PÓ

Alguns aspectos de qualidade requerem atenção especial durante o processo de desidratação de alimentos, pois se tem conhecimento do comprometimento parcial ou completo da qualidade de um produto pelo processo (RATTI, 2009).

Dentre os parâmetros utilizados para a avaliação da qualidade de um produto tem-se os físico-químicos ou bioquímicos e os físicos, pois a retirada de água durante a secagem pode afetar a sua composição e sua estrutura (VAN'T LAND, 2012). Entre os parâmetros físicos são avaliadas mudanças na porosidade, na solubilidade, capacidade de hidratação e entre as bioquímicas temos a perda de vitaminas e proteínas, reações de escurecimento e degradação de compostos nutracêuticos (CHEN & MUJUMDAR, 2008).

O processo de secagem também provoca alterações na microestrutura e na distribuição dos componentes, influenciando sua reconstituição e afetando principalmente sua função como ingrediente alimentar e a maneira que ele poderá ser adicionado a outros alimentos (CHEN & MUJUMDAR, 2008).

7.4.1. Solubilidade em água, índice de absorção de água e percentual de higroscopicidade

A solubilidade é um dos parâmetros utilizados para verificar a capacidade do pó para manter-se em mistura homogênea com a água, ou seja, a estabilidade da mistura constituída pela dissolução das partículas pelo líquido (VISSOTTO *et al.*, 2006). Com percentuais de solubilidade acima de 80%, os sucos de yacon em pó se apresentaram mais solúveis do que sucos de manga obtidos por desidratação em camada de espuma, com ovoalbumina como agente espumante, que apresentaram valores variando entre 51,83 e 66,65% (WILSON *et al.*, 2014); mas menores que cristais de inulina extraídos de raízes de inhame e desidratadas por camada de espuma, que apresentaram valores entre 98,61 e 100% (HARMAYANI *et al.*, 2011).

A solubilidade das partículas produzidas com suco e suco concentrado não sofreu influência pela variação nas condições de secagem (Tabela 16). Em variados trabalhos foram observados comportamentos similares, Mishra e colaboradores (2014) observaram não haver interferência da temperatura de desidratação sobre a solubilidade de atomizados de suco de amla (*Embllica officinalis*), em trabalho com suco de tomate, Souza e colaboradores (2008) constataram que as condições de secagem não interferiram nesta propriedade, assim como KHA e colaboradores (2010) durante obtenção de suco de gac (*Momordica cochinchinensis*). Provavelmente não houve variação neste parâmetro, por ele ser fortemente afetado pelo agente espumante adicionado (YOUSEFI *et al.*, 2011), fator que foi mantido em todos os experimentos.

TABELA 16 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PÓS DE SUCO E DE SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

	Condições de secagem (espessura da camada/ temperatura)	Propriedades físicas		
		Solubilidade em água (%)	Índice de absorção de água	Higroscopicidade (%)
Pós de suco de yacon	0,5cm – 50°C	84,16 ± 0,40 ^a	181,08 ± 2,86 ^a	18,61 ± 0,34 ^c
	1,5cm – 50°C	80,49 ± 0,13 ^a	170,94 ± 0,84 ^b	18,06 ± 0,11 ^c
	1,0cm – 60°C	81,99 ± 1,48 ^a	162,18 ± 0,96 ^c	20,21 ± 0,01 ^b
	0,5cm – 70°C	80,97 ± 0,40 ^a	150,52 ± 1,31 ^d	22,31 ± 0,08 ^a
	1,5cm – 70°C	81,51 ± 1,27 ^a	148,76 ± 0,87 ^d	21,49 ± 0,18 ^a
Pós de suco de yacon concentrado	0,5cm – 50°C	83,07 ± 0,13 ^a	150,87 ± 1,26 ^a	18,86 ± 0,27 ^b
	1,5cm – 50°C	81,44 ± 0,20 ^a	152,69 ± 0,63 ^a	15,24 ± 0,04 ^c
	1,0cm – 60°C	80,89 ± 0,32 ^a	139,40 ± 0,37 ^b	18,12 ± 0,12 ^b
	0,5cm – 70°C	83,24 ± 0,24 ^a	118,15 ± 1,15 ^c	20,39 ± 0,09 ^a
	1,5cm – 70°C	82,87 ± 0,51 ^a	118,90 ± 1,55 ^c	18,78 ± 0,26 ^b

* Os resultados compreendem a média ± desvio padrão. Para amostras do mesmo suco, em cada coluna, letras diferentes para cada tratamento, demonstram diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

FONTE: O autor (2015).

A boa solubilidade dos produtos obtidos pode ser atribuída à quantidade significativa de carboidratos e proteínas e ao baixo nível de lipídeos em sua composição (MISHRA *et al.*, 2014) e também à baixa quantidade de umidade dos pós, pois quanto menor o conteúdo de água presente, menos pegajoso é o produto e maior será a área da superfície disponível para o contato com a água de hidratação (FAZAELI *et al.*, 2012).

O índice de absorção de água (IAA) diz respeito à quantidade de água que o alimento seco é capaz de absorver e está relacionado diretamente à sua capacidade de reidratação (JANGAM *et al.*, 2010). Durante o processo de reidratação, o material seco, que é submerso em água ou outro meio aquoso, passa por várias mudanças físico-químicas simultâneas (conteúdo de umidade e sólidos totais, porosidade, volume, temperatura, gelatinização e textura). A reidratação envolve vários processos que ocorrem em paralelo, incluindo a embebição do líquido para o interior do material seco, o transporte do líquido pela rede de poros e sua difusão sobre a matriz sólida, causando a turgescência da matriz sólida e a lixiviação de sólidos solúveis ao meio (RATTI, 2009).

A absorção de água é uma propriedade relevante para aplicações em produtos cárneos, pães e bolos, pois valores altos da IAA são importantes para ajudar a reter a umidade dos mesmos e bastante desejáveis na utilização destes produtos,

pois permite a adição de mais água à massa, melhorando suas características de manuseio e evitando o ressecamento do produto durante o armazenamento (OLIVEIRA *et al.*, 2009). Além das aplicações já citadas, produtos em pó que apresentam elevado IAA são indicados como ingrediente de produtos de preparo rápido, por sua capacidade de absorver grande quantidade de água mesmo a baixas temperaturas (CLERICI & EL-DASH, 2008).

A capacidade de absorção de água dos sucos de yacon em pó variou entre 148,76 à 181,08% e a dos sucos de yacon concentrado, apresentou valores um pouco menores, que foram de 118,15 à 150,87% (Tabela 16), indicando a boa qualidade de reidratação dos produtos obtidos. A maior capacidade de hidratação dos sucos de yacon em pó pode ser explicada por sua composição apresentar maior teor de proteínas. Harmayani e colaboradores (2011) observaram que o índice de absorção de água de inulina em pó, foi influenciado pela composição do agente espumante (ovoalbumina) e o atribuíram à quantidade de hidroxilas livres presentes na ovoalbumina, que são capazes de se ligar às moléculas de água da área circundante.

Como houve diferença significativa ao nível de 5% entre as respostas para o índice de absorção de água, foi aplicada a MSR para a avaliação adequada dos efeitos, estando as equações dos modelos obtidos expostas na Tabela 17, lembrando que permaneceram apenas os coeficientes de regressão que se mostraram significativos quando a análise de variância foi aplicada.

Os modelos obtidos conseguiram explicar mais que 96% da variabilidade das respostas (R^2 acima de 0,96) e mostraram bons ajustes aos dados experimentais, podendo ser utilizados para fins preditivos, uma vez que a falta de ajuste para as respostas não foi significativa ($p > 0,05$).

Observando as equações obtidas (Tabela 17), é possível verificar que para os pós de suco de yacon, o aumento na espessura da camada de espuma (x_1), e na temperatura de secagem (x_2) resultaram em uma redução na resposta. Por sua vez, para os pós de suco concentrado, apenas a elevação da temperatura de secagem causou redução na capacidade de hidratação. Wilson e colaboradores (2014) observaram efeito semelhante durante a desidratação de polpa de manga por camada de espuma, onde houve um decréscimo do índice de absorção de água com o aumento da temperatura de secagem. Este fato pode ser explicado devido ao menor conteúdo de umidade apresentado pelos pós obtidos à temperaturas maiores, pois maiores teores de umidade podem contribuir para a absorção de água, uma vez que

o líquido penetra nos poros mais facilmente, permitindo uma melhor dispersão da umidade (BUFFO *et al.*, 2002; GHOSAL *et al.*, 2010).

TABELA 17 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA AS RESPOSTAS ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E PERCENTUAL DE HIGROSCOPICIDADE DOS PÓS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

Resposta	Amostra dos sucos em pó	Modelo matemático	R ²	R ² ajustado	p-valor (modelo)
Índice de absorção de água	SY	$Y = 272,9022 - 31,0816x_1 - 1,7376x_2 + 0,4189x_1 \cdot x_2$	0,9678	0,9590	p<0,001
	SYC	$Y = 235,7730 - 1,6629x_2 + 0,0005x_1 \cdot x_2$	0,9752	0,9733	p<0,001
Percentual de higroscopicidade	SY	$Y = 10,1282 - 0,6845x_1 + 0,1782x_2$	0,9743	0,9699	p<0,001
	SYC	$Y = 20,8998 - 9,9068x_1 + 0,1214x_1 \cdot x_2$	0,9721	0,9674	p<0,001

FONTE: O autor (2015).

Os gráficos das superfícies de resposta obtidas para a resposta IAA estão disponíveis nas Figuras 30 – A (pós de suco de yacon) e 31 – A (pós de suco de yacon concentrado), possibilitando a visualização da influência das variáveis na resposta.

A higroscopicidade consiste na habilidade de um pó alimentício absorver água a partir de um ambiente com umidade relativa superior à de equilíbrio. Ela está ligada à sua estabilidade física, química e microbiológica; desta forma, torna-se imprescindível o conhecimento do comportamento higroscópico desses produtos, principalmente para estabelecer condições de desidratação, acondicionamento e armazenamento (JAMALI *et al.*, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Os pós obtidos pela secagem de suco de yacon apresentaram valores de higroscopicidade variando entre 18,06 (espessura da espuma de 1,5 cm e temperatura de secagem de 50°C) à 22,31% (espessura da espuma de 0,5 cm e temperatura de secagem de 70°C). Por sua vez, os pós de suco concentrado de yacon apresentaram resultados que variaram entre 15,24 (espessura da espuma de 1,5 cm e temperatura de secagem de 50°C) à 20,39% espessura da espuma de 0,5 cm e temperatura de secagem de 70°C).

Se compararmos os valores obtidos neste trabalho aos fixados por Jaya e Das (2004) como os ideais para produtos instantâneos, que se baseou entre 5,13% (café instantâneo) à 9,38% (sopa de tomate em pó instantânea), vemos que eles estão muito acima do que os autores delinearam. Os altos valores obtidos são por conta da natureza química do produto. Sabe-se que em alimentos como sucos e frutas em pó, os açúcares (sacarose, glicose e frutose) são os principais responsáveis pela absorção de água, devido à capacidade dos grupamentos hidroxílicos neles contidos de formarem pontes de hidrogênio com moléculas de água (JAYA & DAS, 2004). Mas no caso dos produtos obtidos neste trabalho, se deve levar em conta também a estrutura da ovoalbumina, que apresenta uma estrutura polar, reforçando ainda mais a capacidade dos sucos de yacon em pó de atrair as moléculas de água quando em contato com o ar circundante.

Outro fator que deve ser considerado é o fato de que na maioria dos produtos produzidos por aspensão, é adicionado maltodextrina, um composto com baixa higroscopicidade e muito aplicado como agente carreador para evitar a aglomeração das partículas (TONON et al., 2008). Essa característica é comprovada no trabalho de Caparino e colaboradores (2012), que demonstrou os efeitos que diferentes métodos de secagem exerceram sobre as propriedades físicas e na microestrutura de purês de manga em pó, e constatou que o menor percentual de higroscopicidade atingido pelo pó obtido por aspensão ($16,5 \pm 0,06$) foi devido à adição de maltodextrina, que não foi incluída nos métodos de desidratação em tambor ($20,1 \pm 0,88\%$), liofilização ($18,0 \pm 0,19\%$) e janela de refração ($18,0 \pm 0,36\%$).

Em estudo que comparou diferentes métodos de desidratação por camada de espuma para purês de maçã, Jakubczyk e colaboradores (2011) obtiveram um produto com higroscopicidade de 17% quando foi aplicada a desidratação convectiva, de 19% quando foi aplicada a liofilização, 14% quando foi adicionado 6% de maltodextrina à espuma para liofilização e 11% quando foi aumentada a concentração de maltodextrina para 15%, comprovando mais uma vez a capacidade da maltodextrina de diminuir a absorção de água de alimentos em pó.

Assim como para a resposta índice de absorção de água, foi aplicada a MSR para a avaliação adequada dos efeitos, estando as equações dos modelos obtidos expostas na Tabela 17. Os modelos obtidos conseguiram explicar mais que 97% da variabilidade das respostas e mostraram bons ajustes aos dados experimentais,

podendo ser utilizados para fins preditivos, uma vez que a falta de ajuste para as respostas não foi significativa ($p > 0,05$).

De acordo com as equações obtidas (Tabela 17), verifica-se que para os pós de suco de yacon, o aumento na espessura da camada de espuma (x_1) causou uma redução na resposta, em relação à temperatura de secagem (x_2), o aumento desta causou aumento na resposta. A influência da temperatura está de acordo com os resultados encontrados por Goula *et al.* (2004), Tonon *et al.* (2008) e Frascareli *et al.* (2012) em seus trabalhos sobre secagem de polpa de tomate, suco de açaí e óleo de café respectivamente, mas contradiz os trabalhos de Moreira *et al.* (2009) sobre a desidratação de suco de acerola e de Mishra *et al.* (2014) sobre suco de amla.

Para os pós de suco concentrado, o aumento na espessura da camada de espuma causou redução na resposta, de forma bem mais impactante (maior coeficiente) do que a interação entre os dois fatores, que causaram um leve aumento.

O baixo percentual de higroscopicidade encontrado para os produtos obtidos à baixas temperaturas e maiores espessuras pode ser explicado pelo fato de que pós obtidos sobre essas condições tem maior conteúdo de umidade e conseqüentemente menor gradiente de concentração de umidade entre o produto e a atmosfera (FERNANDES *et al.*, 2013).

Os gráficos das superfícies de resposta obtidas para o percentual de higroscopicidade estão disponíveis nas Figuras 30 – B (pós de suco de yacon) e 31 – B (pós de suco de yacon concentrado).

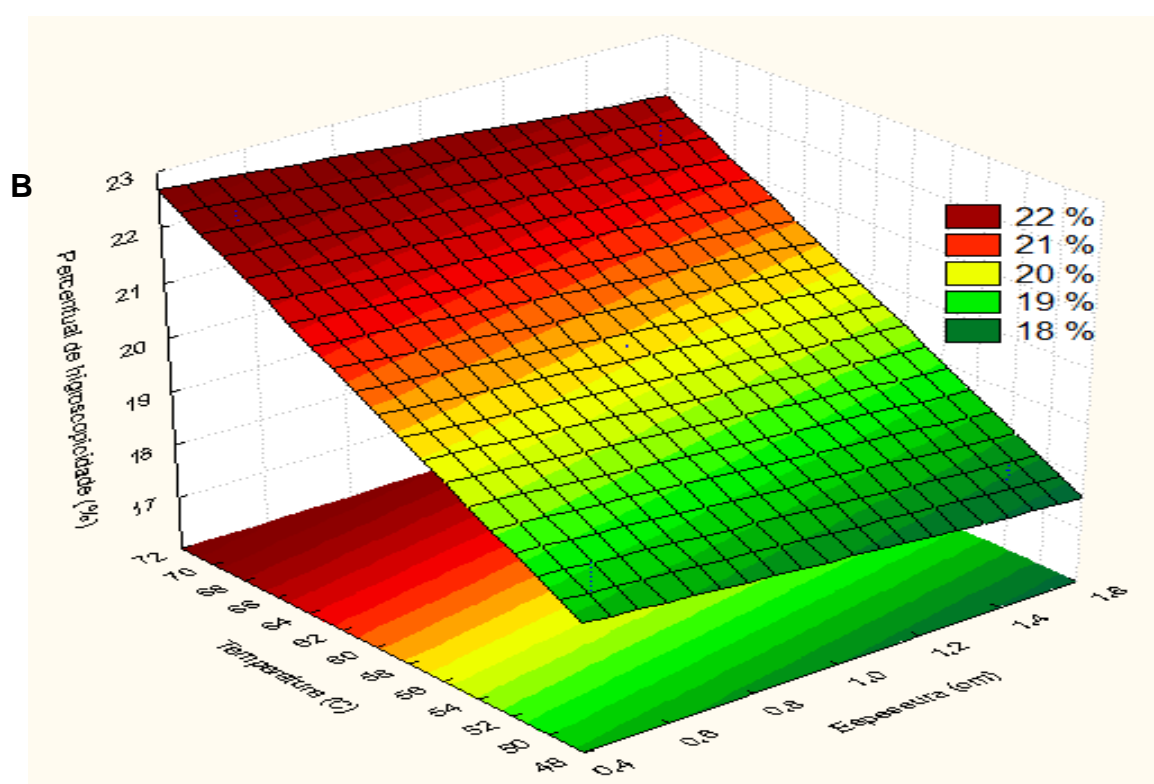
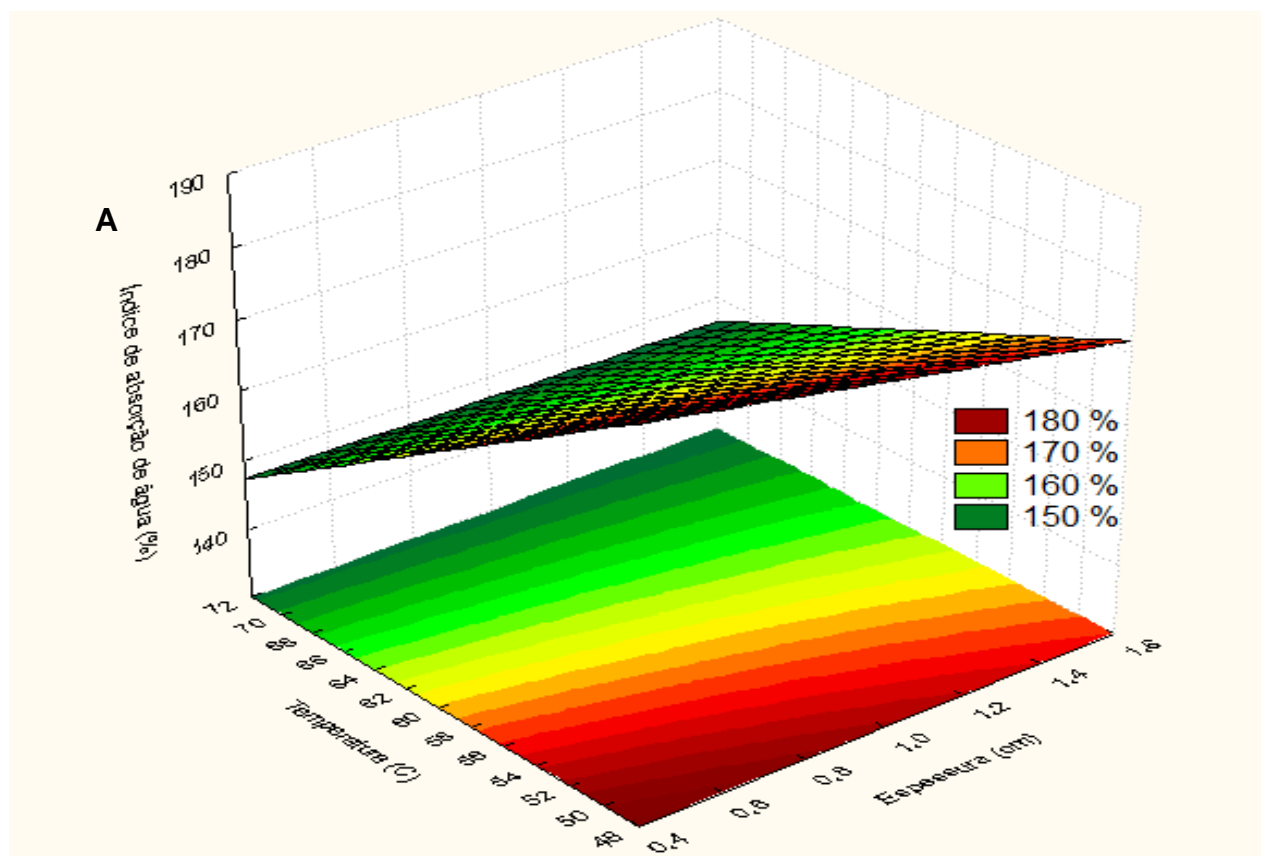


FIGURA 30 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO DE YACON – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (A) E PERCENTUAL DE HIGROSCOPICIDADE (B)

FONTE: O autor (2015).

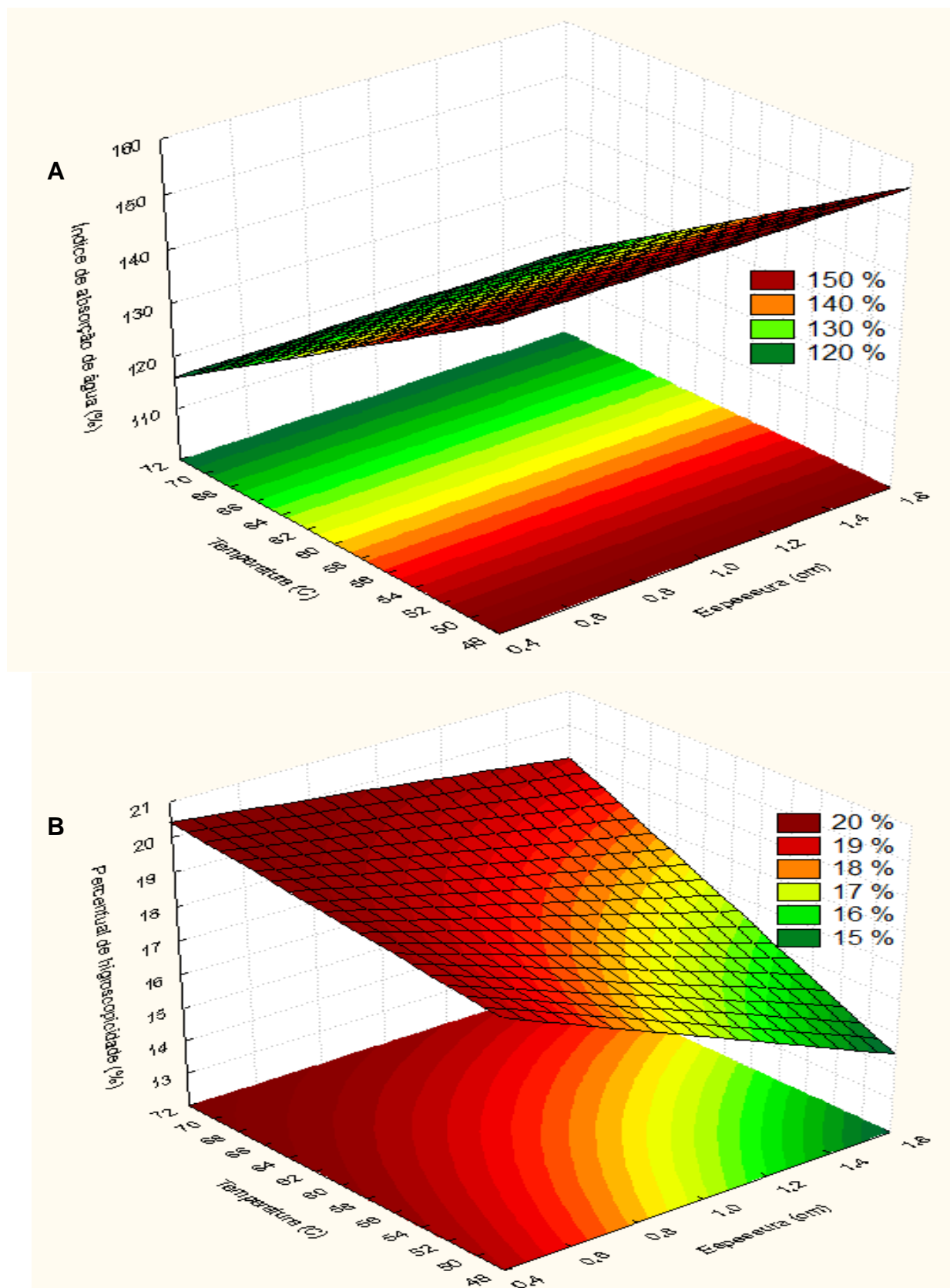


FIGURA 31 - GRÁFICOS DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA PÓS DE SUCO CONCENTRADO DE YACON – EFEITO DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (A) E PERCENTUAL DE HIGROSCOPICIDADE (B)

FONTE: O autor (2015).

Para a fixação dos parâmetros de qualidade de alimentos em pó, se estabelece que de um modo geral que aqueles que apresentam menores valores para percentual de higroscopicidade, conteúdo de umidade e atividade de água e maiores para solubilidade e índice de absorção de água, são os que apresentam as características requeridas para estabilidade de armazenamento, utilização e aplicação como ingrediente em formulações alimentícias (BAKAR *et al.*, 2013).

De uma maneira geral, todos os pós obtiveram características indicativas de boa qualidade. A combinação de camadas de espuma menos espessas com temperaturas de secagem mais elevadas permitiu a obtenção de sucos de yacon em pó com baixa umidade e atividade de água, aumentando sua estabilidade de armazenamento e à deterioração. Todos os particulados se mostraram solúveis em água (acima de 80%), e este fator não foi influenciado pelas condições de secagem e apresentaram também bons índices de absorção de água, principalmente os obtidos às temperaturas de secagem mais elevadas. Em relação à higroscopicidade, as partículas demonstraram características semelhantes às de muitos processos de desidratação de frutas e sucos de fruta, tendo a temperatura de desidratação exercido maior influência sobre os valores desta característica física.

7.4.2. Densidade aparente, densidade absoluta e porosidade intragranular

A densidade relativa e aparente das partículas são análises muito úteis para produtos em pó por gerar resultados que indicam características importantes das partículas e pelo baixo custo das análises (SHISHIR *et al.*, 2014). A densidade aparente é um fator que está diretamente correlacionado com a facilidade de reconstituição dos pós e também com a embalagem, transporte e comercialização destes produtos, sendo que seus valores podem ser úteis para a determinação do peso e da quantidade de material que poderá ser acondicionada (WALTON & MUMFORD, 1999; MARQUES *et al.*, 2014). Um produto desidratado com alta densidade aparente poderá ser armazenado em embalagens menores do que produtos com baixa densidade (QUISPE-CONDORI *et al.*, 2011).

Os valores de densidade aparente obtidos para os sucos de yacon variaram entre 0,65 e 0,69 g.cm⁻³ e para os de suco concentrado entre 0,47 e 0,52 g.cm⁻³. Os

de densidade absoluta entre 1,18 e 1,20 g.cm⁻³ para os pós de suco de yacon e 1,19 à 1,21 g.cm⁻³ para os de suco concentrado. Valores semelhantes foram encontrados por Oguntunde e Adejo (1992) durante secagem de leite integral por camada de espuma e por Falade e Omojola (2010) durante desidratação de espumas de quiabo.

A grande redução no valor da densidade aparente em comparação à densidade absoluta pode estar relacionada ao ar incorporado durante o processo de obtenção das espumas. Tal comportamento foi similar ao relatado por Jacubczyk e colaboradores (2011) para suco de maçã em pó obtido por desidratação por camada de espuma, que apresentou valores de densidade relativa de 0,54 g.cm⁻³ e de 1,43 g.cm⁻³ para a densidade absoluta das partículas.

As amostras de suco de yacon em pó foram as que apresentaram maiores valores para a densidade aparente. Apesar de todas as amostras serem correspondentes às espumas de suco com ovoalbumina, observa-se que a diferença dos compostos da caracterização físico-química (Tabela 14), refletiram na diferença da densidade aparente. A maior densidade aparente dos produtos de suco de yacon pode estar relacionada à sua composição apresentar maior percentual de proteínas do que carboidratos, pois elas detêm maior peso molecular (NELSON & COX, 2004). Quanto mais pesado o material, mais facilmente esse se acomoda nos espaços entre as partículas, ocupando menor volume e resultando, assim, em maior densidade (TONON *et al.*, 2013). Esse comportamento também foi observado por Martin (2013) durante secagem de polpa de cupuaçu por atomização.

Como visualizado na Tabela 18, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos aplicados, tanto para os pós obtidos pela secagem dos sucos quanto para os dos sucos concentrados. Esse comportamento se difere de estudos que empregam maiores temperaturas de desidratação, onde há uma significativa interferência da temperatura de secagem sobre a densidade aparente das partículas, como o de FAZAELI e colaboradores (2012) e o de REDDY e colaboradores (2014). Um dos possíveis motivos para não ter havido interferência da temperatura, é a faixa empregada neste trabalho, que foi de 50 à 70°C, pois são necessárias temperaturas mais elevadas (acima de 100 °C) para que as taxas de evaporação sejam aumentadas ao ponto de que a retirada de água cause rupturas e fragmentação na estrutura, implicando em uma menor densidade do produto em pó obtido (WALTON, 2000; KHA *et al.*, 2010).

TABELA 18 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PÓS DE SUCO E DE SUCO CONCENTRADO DE YACON OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

	Condições de secagem (espessura da camada/ temperatura)	Propriedades físicas		
		Densidade aparente (g.cm ⁻³)	Densidade absoluta (g.cm ⁻³)	Porosidade intragranular
Pós de suco de yacon	0,5cm – 50°C	0,69 ± 0,01 ^a	1,18 ± 0,01 ^a	0,413 ± 0,002 ^a
	1,5cm – 50°C	0,67 ± 0,02 ^a	1,20 ± 0,01 ^a	0,442 ± 0,011 ^a
	1,0cm – 60°C	0,66 ± 0,01 ^a	1,20 ± 0,001 ^a	0,445 ± 0,008 ^a
	0,5cm – 70°C	0,65 ± 0,01 ^a	1,20 ± 0,01 ^a	0,461 ± 0,004 ^a
	1,5cm – 70°C	0,65 ± 0,01 ^a	1,19 ± 0,01 ^a	0,450 ± 0,002 ^a
Pós de suco de yacon concentrado	0,5cm – 50°C	0,50 ± 0,01 ^a	1,21 ± 0,01 ^a	0,588 ± 0,001 ^a
	1,5cm – 50°C	0,47 ± 0,01 ^a	1,21 ± 0,01 ^a	0,606 ± 0,003 ^a
	1,0cm – 60°C	0,51 ± 0,01 ^a	1,20 ± 0,01 ^a	0,577 ± 0,001 ^a
	0,5cm – 70°C	0,52 ± 0,01 ^a	1,20 ± 0,01 ^a	0,567 ± 0,003 ^a
	1,5cm – 70°C	0,51 ± 0,01 ^a	1,19 ± 0,01 ^a	0,567 ± 0,003 ^a

* Os resultados compreendem a média ± desvio padrão.

FONTE: O autor (2015).

A porosidade indica a fração do volume de espaços vazios ou volume de ar de um material, sendo uma propriedade importante para materiais particulados, pois o maior número de espaços vazios implica a presença de maior quantidade de oxigênio, que pode vir a provocar uma degradação mais rápida do composto (RATTI, 2009; TONON *et al.*, 2013).

A porosidade entre as partículas de suco de yacon em pó variou entre 0,413 à 0,461, e de 0,567 à 0,606 para as partículas de suco concentrado, sendo que ambas não sofreram influência das condições de secagem empregadas. Valores muito semelhantes foram relatados por Caparino e colaboradores (2012) para produtos obtidos por liofilização de suco de manga e por Souza e colaboradores (2009) para polpa de tomate em pó (0,5 à 0,59), porém menores aos que Jinapong e colaboradores (2008) encontraram para extrato solúvel de soja atomizado (entre 0,7 e 0,74).

Os valores para porosidade intragranular são inversamente proporcionais aos da densidade aparente, indicando que a incorporação de ar para formação das espumas induziu o acúmulo de ar dentro das partículas desidratadas, tornando-as mais porosas e menos densas (GOULA & ADAMAPOULOS, 2008).

7.4.3. Parâmetros de cor

A cor consiste em um dos indicativos mais importantes para alimentos, pois reflete a atratividade sensorial e sua qualidade (QUEK *et al.*, 2007). A coloração é influenciada por vários fatores, incluindo a variedade do fruto e seu grau de maturação, porém principalmente pelo processo de secagem empregado (VIUDA-MARTOS *et al.*, 2012). Durante a desidratação de polpas de frutas, elas são submetidas à altas temperaturas que causam o escurecimento enzimático e o não enzimático (reações de Maillard) tornando-as escuras ao final do processo (DAMODARAN *et al.*, 2010).

A luminosidade (L^*) em alimentos é relacionada a vários fatores, incluindo a concentração e o tipo dos pigmentos presentes, o conteúdo de água e também a concentração de água presente na superfície (VIUDA-MARTOS *et al.*, 2012). As amostras de suco em pó apresentaram valores para a coordenada L^* que foram de 75,91 à 78,60, e as de suco concentrado em pó de 62,60 à 83,12, em ambos os casos houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos de secagem aplicados (Tabela 19). No geral, quase todas as amostras obtidas pela secagem dos sucos de yacon apresentaram valores para luminosidade um pouco menores do que as para suco concentrado, indicando uma coloração um pouco mais escurecida, um dos motivos pode ter sido o tempo de secagem um pouco mais longo para as espumas formadas com suco de yacon e ovoalbumina. Reis e colaboradores (2012) encontraram o mesmo comportamento durante secagem de fatias de yacon em estufa à vácuo, onde o valor de L^* se tornou menor à medida que o tempo de desidratação aumentou. Entretanto, todas as amostras obtidas neste trabalho podem ser consideradas com coloração clara, uma vez que numa escala de luminosidade que vai de 0 à 100, elas apresentaram valores maiores que 50 ($L^* > 50$) (VASCONCELOS *et al.*, 2012).

No que diz respeito à coordenada que corresponde às colorações verde - vermelha (a^*), as amostras de suco de yacon apresentaram valores que representam a coloração verde, com coeficientes negativos que foram de -2,23 à -1,16, e os pós de suco concentrado se mostraram pertencentes à coordenada da coloração vermelha (coeficientes positivos), com valores entre 0,54 e 14,72. Os tratamentos aplicados na desidratação (espessura da camada de espuma e temperatura do ar de secagem) interferiram significativamente nas respostas geradas (Tabela 19). A diferença acentuada encontrada entre as amostras concentradas e não concentradas pode ter sido causada justamente pelo processo de concentração dos sucos, pois esta

coordenada é afetada pela integridade estrutural das fibras do alimento, da quantidade de pigmentos presente e sua solubilidade (hidro ou lipossolúvel) (FERNÁNDEZ-LOPEZ *et al.*, 2005).

As condições de secagem aplicadas exerceram também efeito significativo para a coordenada amarelo – azul (b*), para qual os valores se mostraram correspondentes à coordenada amarela para todas as amostras, com predominância desta cor, pois foram obtidos os maiores coeficientes, com valores entre 45,86 e 54,99 para os pós de suco e entre 22,57 e 41,87 para os pós de suco concentrado. A coloração amarelada pode ser devido à presença de carotenoides nas raízes de yacon (QUINTEROS, 2000).

TABELA 19 – PARÂMETROS DE COR DOS SUCOS DE YACON E SUCO DE YACON CONCENTRADO, SUAS ESPUMAS E SEUS RESPECTIVOS PÓS OBTIDOS POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE SECAGEM

	Condições de secagem (espessura da camada/ temperatura)	Parâmetros de cor		
		L*	a*	b*
Pós de suco de yacon	0,5cm – 50°C	77,88 ± 0,01 ^b	-1,89 ± 0,01 ^b	45,86 ± 0,05 ^e
	1,5cm – 50°C	77,75 ± 0,01 ^b	-1,16 ± 0,01 ^e	47,97 ± 0,03 ^d
	1,0cm – 60°C	77,69 ± 0,01 ^b	-2,23 ± 0,02 ^a	54,99 ± 0,01 ^a
	0,5cm – 70°C	78,60 ± 0,02 ^a	-1,59 ± 0,01 ^c	49,04 ± 0,04 ^c
	1,5cm – 70°C	75,91 ± 0,02 ^c	-1,31 ± 0,02 ^d	50,65 ± 0,09 ^b
Suco de yacon		38,44 ± 0,65 ^b	-2,59 ± 0,07 ^b	6,57 ± 0,27 ^b
Espuma de suco de yacon	Não se aplica	68,11 ± 0,01 ^a	2,08 ± 0,01 ^a	10,54 ± 0,01 ^a
Pós de suco de yacon concentrado	0,5cm – 50°C	82,99 ± 0,01 ^b	0,54 ± 0,01 ^e	26,51 ± 0,01 ^d
	1,5cm – 50°C	83,12 ± 0,01 ^a	1,30 ± 0,01 ^d	22,57 ± 0,01 ^e
	1,0cm – 60°C	79,09 ± 0,01 ^c	3,09 ± 0,01 ^b	31,23 ± 0,01 ^b
	0,5cm – 70°C	72,19 ± 0,05 ^d	1,45 ± 0,01 ^c	27,80 ± 0,02 ^c
	1,5cm – 70°C	62,60 ± 0,03 ^e	14,72 ± 0,02 ^a	41,87 ± 0,07 ^a
Suco de yacon concentrado		33,73 ± 0,75 ^b	0,56 ± 0,06 ^b	19,80 ± 0,47 ^a
Espuma de suco de yacon concentrado	Não se aplica	80,22 ± 0,06 ^a	1,55 ± 0,01 ^a	11,50 ± 0,02 ^b

* Os resultados compreendem a média ± desvio padrão. Para amostras do mesmo suco, em cada coluna, letras diferentes para cada tratamento, demonstram diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey e t-Student.

FONTE: O autor (2015).

7.4.4. Microestrutura

Através da avaliação da microestrutura dos alimentos, é possível avaliar a níveis microscópicos detalhes de cada componente (água, amido, carboidratos, lipídeos, açúcares, proteínas, lipídeos e sais) e suas conexões na célula a nível molecular. À medida que um alimento passa por diferentes tratamentos ou processos, sua microestrutura pode ser preservada ou destruída para o desenvolvimento de novos produtos. Em particular, o processo de desidratação cria ou destrói a microestrutura de um alimento distribuindo especificamente cada componente por fases (RATTI, 2009).

Através de microscopia eletrônica de varredura, verificaram-se as características morfológicas e estruturais do suco e do suco concentrado de yacon em pó. De uma maneira geral, a morfologia das partículas não foi afetada pelo suco utilizado ou pela condição de secagem aplicada, se mostrando todas com estrutura porosa e irregular, semelhante às de suco de manga liofilizado (CAPARINO *et al.*, 2012), que mostraram uma aparência com estrutura e formatos mantidos, sem efeito de encolhimento ou colapso (Figura 32 – A e B).

Pelo fato da secagem ter sido aplicada no suco, onde as células do tecido das raízes de yacon já haviam sido rompidas, não foram verificadas modificações visíveis, diferente do relatado por Bernstein e Noreña (2014) que relataram mudanças a níveis macroscópicos (volume e formato) e microscópicos (parede e membranas celulares) em fatias de yacon, causados pelos tratamentos aplicados.

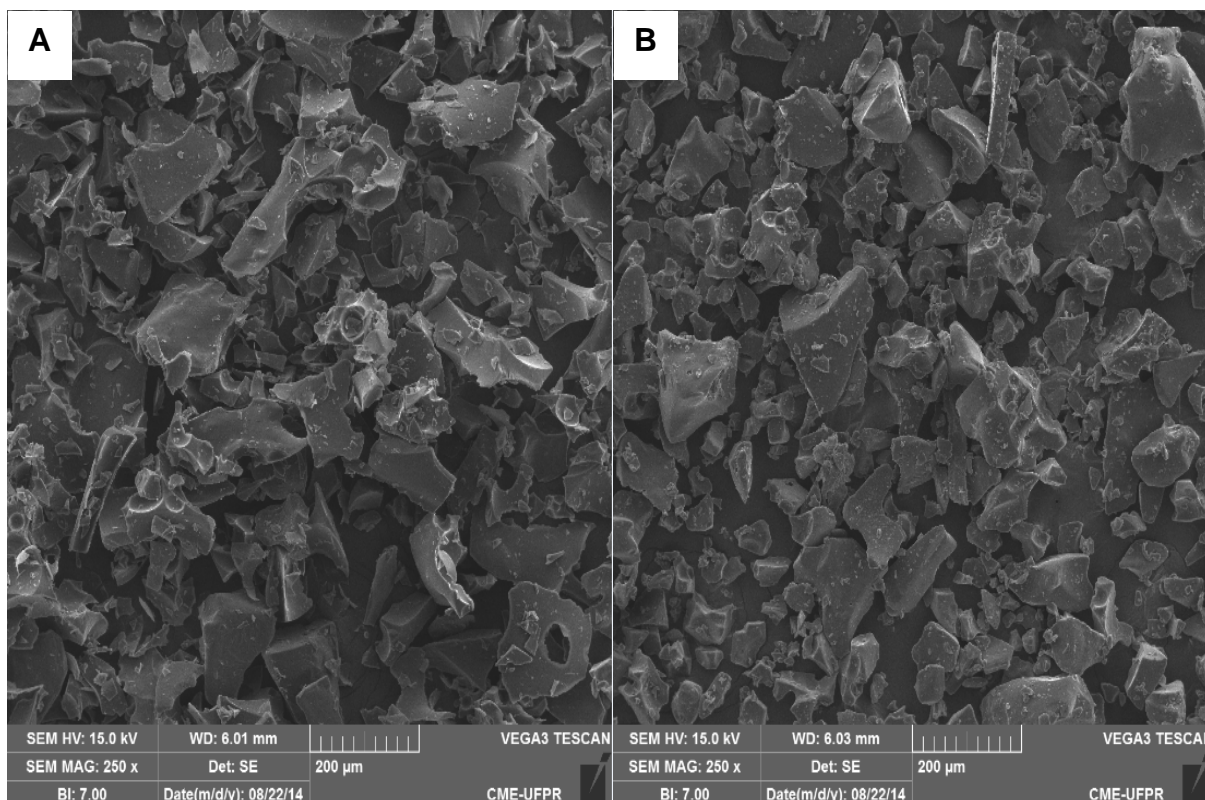


FIGURA 32 - MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE PARTÍCULAS DE SUÇO (A) E SUÇO CONCENTRADO DE YACON (B) SUBMETIDAS À DESIDRATAÇÃO POR CAMADA DE ESPUMA (ESPESSURA DE 1,0 CM E TEMPERATURA DE 60°C) – RESOLUÇÃO DE 250X

FONTE: O autor (2015)

Verificou-se a falta de uniformidade para todas as amostras em todos os tratamentos avaliados. No entanto, por meio das fotomicrografias obtidas por MEV é possível observar que todas as amostras apresentaram cavidades em sua estrutura oriundas provavelmente pelos espaços deixados pelas bolhas de ar, o que contribuiu para a porosidade dos sucos de yacon em pó (Figura 33 – A, B, C e D).

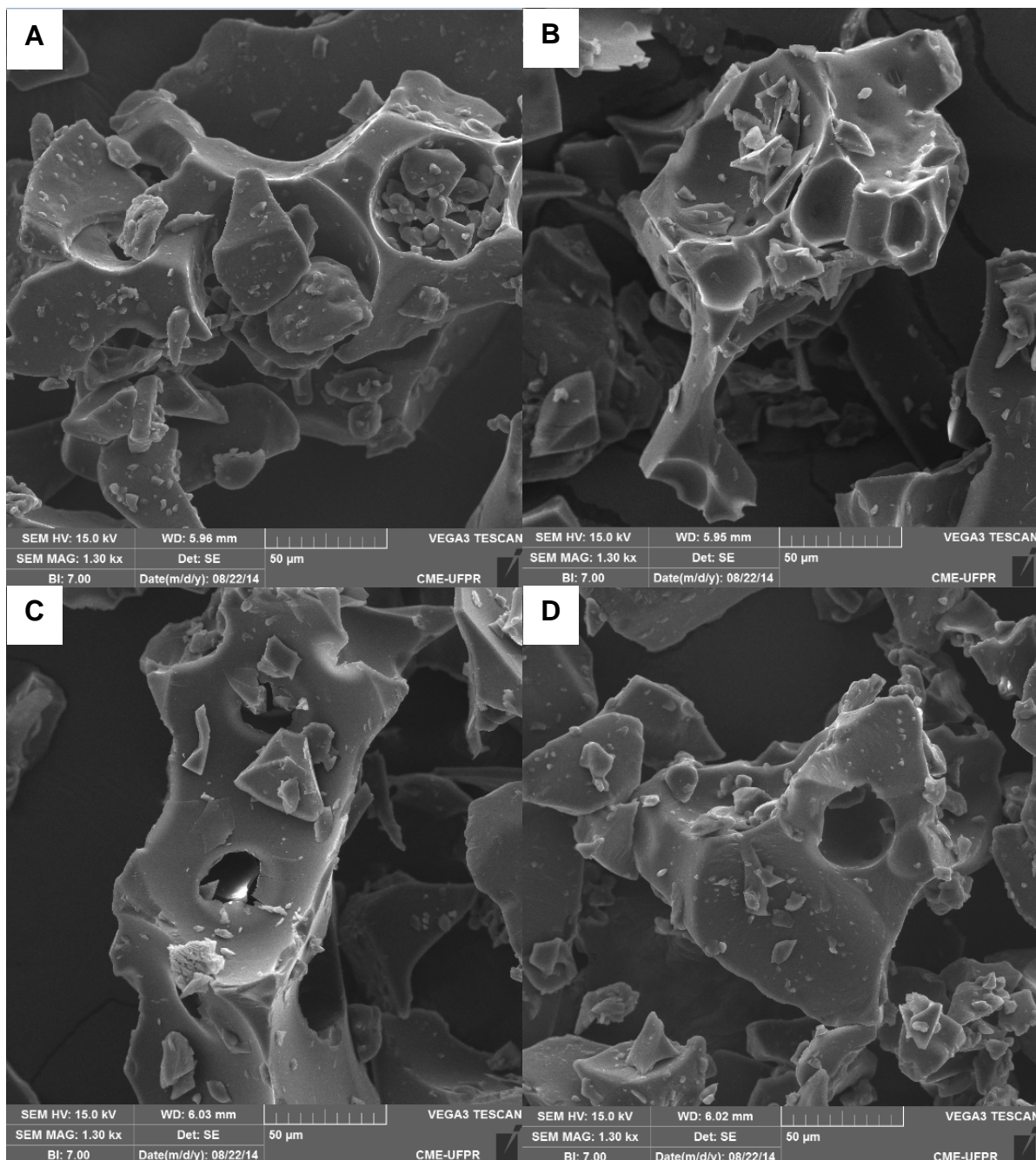


FIGURA 33 MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE PARTÍCULAS DE SUCO E SUCO CONCENTRADO DE YACON, A UMA RESOLUÇÃO DE 1 300 X. TRATAMENTOS (ESPESSURA DA CAMADA DE ESPUMA E TEMPERATURA DE DESIDRATAÇÃO): (A) SUCO DE YACON – 0,5 CM – 50°C; (B) SUCO DE YACON – 1,5 CM – 70°C; (C) SUCO DE YACON CONCENTRADO – 0,5 CM – 50 °C; (D) SUCO DE YACON CONCENTRADO – 1,5 CM – 70°C

FONTE: O autor (2015)

8. CONCLUSÕES

O processo de desidratação por camada de espuma se mostrou uma alternativa eficiente para o processamento do suco de yacon e mais uma possível opção de processamento, pois permitiu a elaboração de um produto com características adequadas para consumo puro ou adição como ingrediente alimentar.

8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelo fato do yacon apresentar uma composição pobre em proteínas e rico em água e carboidratos, foi indispensável a adição de agentes para promover a formação e estabilidade das suas espumas. Ficou claramente visível que os dois agentes utilizados (emulsificante e ovoalbumina), em todas as concentrações e tempos de batimento, exerceram redução na densidade e aumento do rendimento e volume da fração de ar das espumas obtidas de suco e suco concentrado de yacon.

As espumas formadas por suco de yacon e agente emulsificante se mostraram mais estáveis à temperatura ambiente, mas quando o suco concentrado foi utilizado, aquelas formadas por ovoalbumina se mostraram mais estáveis. Quanto maior o tempo de batimento e a concentração de agente utilizado, maior foi a estabilidade das espumas. Maiores períodos de incorporação de ar e concentração de agente utilizado, resultaram em espumas com maior valor de tensão limite e um maior número de bolhas, porém com menor tamanho. Para a grande parte das espumas formadas, o tempo de repouso causou uma diminuição no valor de tensão limite e no número de bolhas de ar, e um aumento no diâmetro médio destas bolhas.

A partir das análises realizadas sobre as características das espumas, foram escolhidas as formadas por maior concentração de agente espumante (20% de ovoalbumina e 10% de emulsificante) com maior tempo de incorporação de ar (20 minutos) para serem submetidas à desidratação em estufa convectiva.

A partir da elaboração das curvas de secagem, pôde ser observado que para todas as condições aplicadas, o comportamento da secagem ocorreu num período de

taxa decrescente. Maiores temperaturas do ar de secagem (70 °C) associadas a menores espessuras da camada de espuma (0,5 cm) ocasionaram num processo mais curto de desidratação. O coeficiente de difusividade efetivo foi influenciado de forma positiva pelo aumento da temperatura de desidratação e da espessura da camada de espuma. Dentre os modelos aplicados, o logarítmico foi o que melhor representou o processo de desidratação de suco e suco concentrado de yacon por camada de espuma.

Apenas as espumas formadas por ovoalbumina puderam ser convertidas ao suco em pó, aquelas formadas por emulsificante formaram uma camada viscosa e pegajosa sobre os leitos de secagem, desta forma, as análises físico-químicas e de qualidade foram realizadas nos sucos e sucos concentrados com ovoalbumina em pó.

As condições de secagem não afetaram significativamente as características físico-químicas dos particulados, índice de solubilidade em água, densidade aparente e absoluta e porosidade intragranular, por sua vez, a elevação na temperatura influenciou na redução do percentual de umidade e da atividade de água das amostras. Os pós obtidos a partir de suco de yacon mostraram maior capacidade de absorção de água, que foi menor para pós obtidos à maiores temperaturas e menores espessuras da camada de espuma. A higroscopicidade também foi afetada de maneira positiva com o aumento da temperatura. A luminosidade diminuiu com o aumento do período de secagem, os valores das coordenadas a^* e b^* indicaram diferença na coloração entre as amostras obtidas por suco e por suco concentrado. Pela avaliação das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura verificou-se que as características morfológicas dos particulados não foram afetadas pelas condições de secagem aplicadas, apresentando-se todas irregulares e com cavidades que contribuem para a porosidade dos produtos.

A combinação entre a maior temperatura de secagem (70 °C) com a menor espessura (0,5 cm) levou a um menor tempo de desidratação e conseqüente menor demanda energética, para a formação de um produto final com maior estabilidade (baixa umidade e atividade de água), sem comprometimento nas suas características físico-químicas e baixa perda de seus parâmetros de qualidade.

8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho possibilitaram a aplicação de uma nova tecnologia para o processamento dos tubérculos de yacon, e através destes, se possibilita o aprofundamento sobre questões levantadas e que podem ser esclarecidas em outros trabalhos, como:

- Otimização do processo de obtenção das espumas, para utilização da menor quantidade possível de agente espumante e menor tempo de incorporação de ar;
- Pesquisas envolvendo outros agentes espumantes que possibilitem além da estabilidade, a formação de pó depois da desidratação;
- Aplicação de outros métodos de desidratação como por janela de refração, liofilização, micro-ondas ou aspersão;
- Realização de análises mais aprofundadas sobre as características das partículas, como microscopia por difração de raio-x e temperatura de transição vítrea;
- Aplicação de análise sensorial aos produtos obtidos e
- Estudo das possibilidades de aplicação em alimentos.

9. REFERÊNCIAS

ADAM, M., JUKLOVA, M., BAJER, T., EISNER, A., VENTURA, K. Comparison of three different solid-phase microextraction fibres for analysis of essential oils in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves. **Journal of Chromatography A**, v.1084, p.2-6, 2005.

AGUILERA, J. M., STANLEY, D. W. **Microstructural principles of food processing and engineering**. 2. ed. Gaithersburg: Aspen Publishers Inc., 1999.

AKINTOYE, O. A., OGUNTUNDE, A. O. Preliminary investigation on the effect of foam stabilizers on the physical characteristics and reconstitution properties of foam-mat dried soymilk. **Drying Technology**, v.9, n.1, p.245-262, 1991.

AKPNAR, E. K., BICER, Y., YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.99-104, 2003.

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

ARNAO, I., SEMINARIO, J., CISNEROS, R., TRABUCCO, J. Antioxidant potential of 10 yacon *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson accessions native from Cajamarca – Peru. **Anales de la Facultad de Medicina**, v.72, n.4, p.239-243, 2011.

ASSOCIATION of OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official Methods of the Association of Official Analytical Chemists**. Washington, DC, 1984.

ASSOCIATION of OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official Methods of the Association of Official Analytical Chemists**. Washington, DC, 2000.

AYBAR, M. J., SÁNCHEZ RIERA, A. N., GRAU, A., SÁNCHEZ, S. S. Hypoglycemic effect of the water extract of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) leaves in normal and diabetic rats. **Journal of Ethnopharmacology**, v.74, n.2, p.125–32, 2001.

AZISPOUR, M. A., MOHEBBI, M., KHODAPARAST, M. H. H., VARIDI, M. Optimization of foaming parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). **Drying Technology**, v.32, p.374-384, 2014.

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, n.3, p. 449-458, 2004.

- BAG, S. K., SRIVASTAV, P. P., MISHRA, H. N. Optimization of process parameters for foaming of Bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. **Food and Bioprocess Technology**, v.4, n.8, p.1450-1458, 2011.
- BAKAR, J., MUHAMMAD, S. C. E. K., HASHIM, D. M., ADZAHAN, N. Spray-drying optimization for red pitaya peel (*Hylocereus polyrhizus*). **Food and Bioprocess Technology**, v.6, p.1332-1342, 2013.
- BALASUBRAMANIAN, S., PARIDHI, G., BOSCO, J. D., KADAM, D. M. Optimization of process conditions for the development of tomato foam by Box-Behnken design. **Food and Nutrition Sciences**, v.3, p.925-930, 2012.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V., ORTEGA-RIVAS, E., JULIANO, P., YAN, H. **Food Powders: Physic Properties, Processing and Functionality**. Nova Iorque: Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2005.
- BARNES, H. The yield stress – a review or “panta rei” – everything flows? **Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics**, v.81, p.133–178, 1999.
- BARRETO, I. M. A. Caracterização de polpa de pitanga roxa (*Eugenia uniflora*) desidratada em leito de espuma. **Dissertação de Mestrado** – Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 63p, 2011.
- BELITZ, H. D., GROSCH, W., SCHIEBERLE, P. **Food Chemistry**. 4.ed. Berlim: Springer, 2009.
- BENNION, E. B., BAMFORD, G. S. T. **The Technology of Cake Making**. 6.ed. Londres: Chapman & Hall, 1997.
- BERK, Z. **Food Process Engineering and Technology**. Nova Iorque: Academic Press – Elsevier, 2009.
- BERNSTEIN, A., NOREÑA, C. P. Z. Study of thermodynamic, structural, and quality properties of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) during drying. **Food and Bioprocess Technology**, v.7, p.148–160, 2014.
- BREDA, C. A., SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J., CORREIA, C. A. C. Shelf life of powdered *Campomanesia adamantium* pulp in controlled environments. **Food Chemistry**, v.135, p.2960-2964, 2012.
- BRENNAN, J. G. **Food Processing Handbook**. Weinheim: Wiley VCH, 2006.
- BRYGIDYR, A. M., RZEPECKA, M. A., MCCONNEL, M. B. Characterization and drying of tomato paste foam by hot air and microwave energy. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v.10, n.4, 313-319, 1977.
- BUFFO, R. A., PROBST, K., ZEHENTBAUER, G., LUO, Z., REINECCIUS, G. A. Effect of agglomeration on the properties of spray-dried encapsulated flavours. **Flavour and Fragrance Journal**, v.17, n.4, p.292-299, 2002.

BUTLER, G.; RIVERA, D. Innovations in peeling technology for yacon. **Project Report International Potato Center**, 2004. Disponível em: <<http://www.cipotato.org/artcCIPcrops/2004-1127.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2012.

CALVERT, J. R., NEZHATI, K. Bubble size effects in foams. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.8, n.2, p.102-106, 1987.

CAMPBELL, G. M., MOUGEOT, E. Creation and characterization of aerated food products. **Trends in Food Science & Technology**, v.10, n.9, p.283-296, 1999.

CAMPBELL-PLATT, G. **Food Science and Technology**. West Sussex: Blackwell Publishing Ltda, 2009.

CAPARINO, O. A., TANG, J., NINDO, C. I., SABIANI, S. S., POWERS, J. R., FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v.111, p.135-148, 2012.

CARP, D. J., BARTHOLOMAI, G. B., PILOSOF, A. M. R. A kinetic model to describe liquid drainage from soy protein foams over an extensive protein concentration range. **LWT - Food Science and Technology**, v.30, p.253-258, 1997.

CASTRO, A., CABALLERO, M., HERBAS, A., CARBALLO, S. Antioxidants in yacon products and effect of long-term storage. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.32, n.3, p.432-435, 2012.

CECCHI, H. M. Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos. 2.ed. Campinas: Editora Unicamp, 2009.

CHAKRABORTY, S., BANERJEE, S., MAZUMDER, S. Functional properties based statistical optimization of foam mat drying parameters for potato (Kufri Chandramukhi). **Global Journal of Science Frontier Research: C Biological Science**, v.14, n.2, p.1-10, 2014.

CHANDAK, A. J., CHIVATE, M. R. Studies on foam mat drying of coffee extract. **Indian Food Pack**, v.28, p.17-27, 1974.

CHAVES, M. A., BARRETO, I. M. A., REIS, R. C., KADAM, D. M. Physicochemical and sensory properties of purple Brazilian cherry (*Eugenia uniflora*, L.) foams. **International Journal of Food Science and Technology**, v.48, p.1688-1697, 2013.

CHEN, X. D., MUJUMDAR, A. S. **Drying Technologies in Food Processing**. West Sussex: Blackwell Publishing Ltda, 2008.

CHITARRA, M. I. F., CHITARRA, A. B. **Pós-Colheita de Frutas e Hortaliças: Fisiologia e Manuseio**. 2.ed. Lavras: UFLA, 2005.

CLERICI, M. T. P. S., EL-DASH, A. A. Características tecnológicas de farinhas de arroz pré-gelatinizadas obtidas por extrusão termoplástica. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1543-1550, 2008.

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

CRUZ, W. F. Obtenção de polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó pelo método de secagem em camada de espuma. **Dissertação de Mestrado – Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Universidade Federal de Viçosa, 78p, 2013.

DA SILVA, A. S. S., HAAS, P., BEBER, R. C., BATISTA, S. M. M., ANTON, A. A., FRANCISCO, A. Avaliação da resposta glicêmica em mulheres saudáveis após a ingestão de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) in natura, cultivadas no Estado de Santa Catarina – Brasil. **Alimentos e Nutrição – Araraquara**, v.17, n.2, p.137-142, 2006.

DAMODARAN, S., PARKIN, K. L., FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4.ed. Artmed, Porto Alegre, 900p. 2010.

DATTATREYA, M. K., BALASUBRAMANIAN, S. Foam mat drying of tomato juice. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.35, p.488-495, 2011.

DAVIS, J. P., DOUCET, D., FOEGEDING, E. A. Foaming and interfacial properties of hydrolyzed β -lactoglobulin. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.288, p.412-422, 2005.

DAVIS, J. P., FOEGEDING, E. A. Foaming and interfacial properties of polymerized whey protein isolate. **Journal of Food Science**, v.69, n.5, p.C404-C410, 2004.

DAVIS, J. P., FOEGEDING, E. A., HANSEN, F. K. Electrostatic effects on the yield stress of whey protein isolate foams. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.34, p.13–23, 2004.

DELGADO, G. T. C., THOMÉ, R., GABRIEL, D. L., TAMASHIRO, W. M. S. C., PASTORE, G. M. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) – derived fructooligosaccharides improves the immune parameters in the mouse. **Nutrition Research**, v.32, n.11, p.884-892, 2012.

DEN HOND, E., GEYPENS, B., GHOOS, Y. Effect of high performance chicory inulin on constipation. **Nutrition Research**, v.20, n.5, p.731-736, 2000.

DENKOV, N. D. Mechanisms of foam destruction by oil-based antifoams. **Langmuir**, v.20, n.22, p.9463–9505, 2004.

DENKOV, N. D., SUBRAMANIAN, V., GUROVICH, D., LIPS, A. Wall slip and viscous dissipation in sheared foams: effect of surface mobility. **Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.263, p.129–145, 2005.

DICKINSON, E., ETTELAIE, R., MURRY, B. S., DU, Z. Kinetics of disproportionation of air bubble beneath a planar air–water interface stabilized by food proteins. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.252, p.202–213, 2002.

DJAENI, M., PRASETYANINGRUM, A., SASONGKO, S. B., WIDAYAT, W., HUI, C. L. Application of foam-mat drying with egg white for carrageenan: drying rate and product quality aspects. **Journal of Food Science and Technology**, DOI 10.1007/s13197-013-1081-0, 2013.

DOSTERT, N., ROQUE, J., CANO, A., LA TORRE, M. I., WEIGEND, M. **Factsheet: Datos botánicos de yacón *Smallanthus sonchifolius* (Poepp.) H. Rob.** 1.ed. Lima, 2009.

DOYMAZ, I. Effect of pre-treatment using potassium metabisulphite and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricot. **Biosystems Engineering**, v.89, n.3, p.281-287, 2004.

DOYMAZ, I. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.243-248, 2007.

DOYMAZ, I. The thin layer drying behavior of mint leaves. **Journal of Food Engineering**, v.74, p.370-375, 2006.

ERENTURK, S., GULABOGLU, M. S., GULTEKIN, S. The thin layer drying characteristics of rosehyp. **Biosystems Engineering**, v.89, n.2, p.159-166, 2004.

ESCOBEDO-AVELLANEDA, Z., PÉREZ-PÉREZ, C., BÁRCENAS-POZO, M. E., GUERRERO-BELTRÁN, J. A., WELTI-CHANES, J. Analysis of the drying process of mexican hot salsa using the characteristic curve model. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.37, p.441-448, 2013.

ESTHER, L., CHARLES, A. O., ADEOYE, O. S., TOYIN, O. A. Effects of drying method on selected properties of Ogi (Gruel) prepared from sorghum (*Sorghum vulgare*), millet (*Pennisetum glaucum*) and maize (*Zea mays*). **Journal of Food Processing and Technology**, v.4, n.7, p.244-248, 2013.

ESTRELLA, J. E., LAZARTE, J. E. *In vitro* propagation of jicama (*Polymnia sonchifolia* Popping & Endlicher): a neglected Andean crop. **HortScience**, v.29, n.4, p.331, 1994.

EVANGELISTA, J. **Tecnología de alimentos**. 2.ed. Atheneu São Paulo, 270p. 1994.

FALADE, K. O., ADEYANJU, K. I., UZO-PETERS, P. I. Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glyceryl monostearate and egg albumin as foaming agents. **European Food Research and Technology**, v.217, p.486–491, 2003.

FALADE, K. O., OKOCHA, J. O. Foam-mat drying of plantain and cooking banana (*Musa* spp.). **Food and Bioprocess Technology**, v.5, n.4, p.1173-1180, 2012.

FALADE, K. O., OMOJOLA, B. S. Effect of processing methods on physical, chemical, rheological, and sensory properties of okra (*Abelmoschus esculentus*). **Food and Bioprocess Technology**, v.3, p.387-394, 2010.

FALADE, K. O., ONYEOZIRI, N. F. Effects of cultivar and drying method on color, pasting and sensory attributes of instant yam (*Dioscorea rotundata*) flours. **Food and Bioprocess Technology**, v.5, p.879–887, 2012.

FAZAEI, M., EMAM-DJOMEH, Z., ASHTARI, A. K., OMID, M. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. **Food and Bioproducts Processing**, v.90, p.667-675, 2012.

FELLOWS, P. **Food Processing Technology – Principles and Practice**. 2.ed. Cambridge: CRC Press LLC, 2000.

FERNANDES, R. V. B., BORGES, S. V., BOTREL, D. A. Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.33, p.171-178, 2013.

FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J., SAYAS-BARBERÁ, M. E., NAVARRIO, C., SENDRA, E., PÉREZ-ÁLVAREZ, J. A. Antioxidant and antibacterial activities of natural extracts application on cooked meat balls. **Meat Science**, v.69, p.371-380, 2005.

FRASCARELI, E. C., SILVA, V. M., TONON, R. V., HUBINGER, M. D. Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. **Food and Bioproducts Processing**, v.90, n.3, p.413-424, 2012.

GARDINER, B. S., DLUGOGORSKI, B. Z., JAMESON, G. J., CHHABRA, R. P. Yield stress measurements of aqueous foams in the dry limit. **Journal of Rheology**, v.42, p.1437–1450, 1998.

GENOVESE, D. B., RAO, M. A. Vane yield stress of starch dispersions. **Journal of Food Science**, v.68, p.2295–2301, 2003.

GENTA, S. B., CABRERA, W. M., GRAU, A., SANCHEZ, S. S. Subchronic 4-month oral toxicity study of dried *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots as a diet supplement in rats. **Food and Chemical Toxicology**, v.43, p.1657-1665, 2005.

GENTA, S., CABRERA, W., HABIB, N., PONS, J., CARILLO, I.M., GRAU, A., SÁNCHEZ, S. Yacon syrup: Beneficial effects on obesity and insulin resistance in humans. **Clinical Nutrition**, v.28 p.182–187, 2009.

GEYER, M., MANRIQUE, I., DEGEN, L., BEGLINGER, C. Effect of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) on colonic transit time in healthy volunteers. **Digestion**, v.78, p.30-33, 2008.

GHOSAL, S., INDIRA, T. N., BHATTACHARYA, S. Agglomeration of a model food powder: Effect of maltodextrina and gum Arabic dispersions on flow behavior and compacted mass. **Journal of Food Engineering**, v.96, p.222-228, 2010.

GIBSON, G. R., ROBERFROID, M. B. Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. **Journal of Nutrition**, v.125, p.1401-1412, 1995.

GIBSON, R. Dietary modulation of the human gut microbiota using the prebiotics oligofructose and inulin. **Journal of Nutrition**, v. 129, p.1438S-1441S, 1999.

GOMES, A. T., CEREDA, M. P., VILPOUX, O. Desidratação osmótica: uma tecnologia de baixo custo para o desenvolvimento de agricultura familiar. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v.3, p.212-226, 2007.

GONELI, A. L. D., CORRÊA, P. C., AFONSO JÚNIOR, P. C., OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento - Especial Café**, v.11, p. 64-73, 2009.

GOTO, K., FUKAI, K., HIKIDA, J., NANJO, F., HARA, Y. Isolation and structural analysis of oligosaccharides from yacon (*Polymnia sonchifolia*). **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, v.59, p.2346-2347, 1995.

GOULA, A. M., ADAMAPOULOS, K. G. Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. Powder Properties. **Drying Journal**, v.26, p.726-737, 2008.

GOULA, A. M., ADAMAPOULOS, K. G., KAZAKIS, N. A. Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. **Drying Technology**, v.22, n.5, p.1129-1151, 2004.

GOYAL, R. K., KINGSLEY, A. R. P., MANIKANTHAN, M. R., ILYAS, S. M. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.176-180, 2007.

GRAEFE, S., HERMANN, M., MANRIQUE, I., GOLOMBEK, S., BUERKERT, A. Effects of post-harvest treatment on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. **Field Crops Research**, n.86, p.157-165, 2004.

GRANATO, D., GREVINK, R., ZIELINSKI, A. A. F., NUNES, D. S., VAN RUTH, S. M. Analytical strategy coupled with response surface methodology to maximize the extraction of antioxidants from green, yellow, and red teas (*Camellia sinensis* var *sinensis*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.62, p.10283-10296, 2014.

GRAU, A., KORTSARZ, A. M. El retorno del yacón. **Ciencia Hoy**, v.11, n.63, p.24-32, 2001.

GUNSTONE, F. D., PADLEY, F. B. **Lipid Technologies and Applications**. Nova Iorque: Marcel Dekker Inc., 1997.

HART, M. R., GRAHAM, R. P., GINETTE, L. E., MORGAN, A. I. Foams for foam-mat drying. **Food Technology**, v.17, n.10, p.90-92, 1963.

HASANI-RANJBAR, S., JOUYANDEH, Z., ABDOLLAHI, M. A systematic review of anti-obesity medicinal plants – an update. **Journal of Diabetes & Metabolic Disorders**, v.12, p.28-38, 2013.

HATAMIPOUR, M. S., KAZEMI, H. H., NOORALIVAND, A., NOZARPOOR, A. Drying characteristics of six varieties of sweet potatoes in different dryers. **Food and Bioproducts Processing**, v.85, p.171-177, 2007.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.17, p.1167-1167, 1974.

HERMANN, M., FREIRE, I., PAZOS, C. Compositional diversity of the yacon storage root. **Centro Internacional de la Papa - CIP Program Report**, p.425-432, 1997-1998. Disponível em: <<http://www.cipotato.org/artc/CIPcrops/2004-1127.pdf>>. Acesso em: 05. mar. 2012.

HERZAFT, B. Rheology of aqueous foams: a literature review of some experimental works. **Oil & Gas Science and Technology**, v.54, n.5, p.587-596, 1999.

HÖHLER, R., COHEN-ADDAD, S., ASNACIOS, A. Rheological memory effect in aqueous foams. **Europhysics Letters**, v.48, p.93–98, 1999.

HONORÉ, S. M., CABRERA, W. M., GENTA, S. B., SÁNCHEZ, S. S. Protective effect of yacon leaves decoction against early nephropathy in experimental diabetic rats. **Food and Chemical Toxicology**, v.50, p.1704–1715, 2012.

INOUE, A., TAMOGAMI, S., KATO, H., NAKAZATO, Y., AKIYAMA, M., KODAMA, O., ANATSUKA, T., HASHIDOKO, Y. Antifungal melampolides from leaf extracts of *Smallanthus sonchifolius*. **Phytochemistry**, v.39, n.4, p.845-848, 1995.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4.ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

ITAYA, N. M., CARVALHO, M. A. M., RIBEIRO, R. C. L. F. Fructosyl transfers and hyfrolase activities in rhizophores and tuberous roots upon growth of *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). **Physiologia Plantarum**, v.116, p.451–459, 2002.

JAKUBCZYK, E., GONDEK, E., TAMBOR, K. Characteristics of selected functional properties of apple powders obtained by the foam-mat drying method. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD PROCESS ENGINEERING IN A CHANGING WORLD, 11., 2011, Atenas. **Anais...** Atenas: NTUA, 2011. p. 1-6.

HARMAYANI, E., WINARTI, S., NURISMANTO, R. Preparation of inulin powder from *Dioscorea Esculenta* tuber with foam mat drying method. In: THE 12th ASEAN FOOD CONFERENCE 2011, 2011, Bangkok. **Anais...** Bangkok, 2011, p. 16-18.

JAMALI, A., KOUHILA, M., MOHAMED, L. A., JAOUHARI, J. T., IDLIMAM, A., ABDENOURI, N. Sorption isotherms of *Chenopodium ambrosioides* leaves at three temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.72, p.77-84, 2006.

JANGAM, S. V., LAW, C.L., MUJUMDAR, A. S. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits – Volume 1**. Singapore, 2010.

JANGAM, S. V., MUJUMDAR, A. S. Basic concepts and definitions in drying of foods, vegetables and fruits – volume 1. 1.ed, Singapore, 2010.

JANJAI, S., PRECOPPE, M., LAMLERT, N., MAHAYOTHEE, B., BALA, B. K., NAGLE, M., MÜLLER, J. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). **Food and Bioproducts Processing**, v.89, p.194-201, 2011.

JAYA, S., DAS, H. A vacuum drying model for mango pulp. **Drying Technology**, v.21, n.7, p.1215-1234, 2003.

JAYA, S., DAS, H. Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. **Journal of Food Engineering**, v.63, p.125-134, 2004.

JENA, S., DAS, H. Modelling for vacuum drying characteristics of coconut presscake. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.92-99, 2007.

JINAPONG, N., SUPHANTHARIKA, M., JAMNONG, P. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, v.84, n.2, p.194-205, 2008.

JOUNG, H., KWON, D. Y., CHOI, J. G., SHIN, D. Y., CHUN, S. S., YU, Y. B., SHIN, D. W. Antibacterial and synergistic effects of *Smallanthus sonchifolius* leaf extracts against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* under light intensity. **Journal of Natural Medicines**, v.64, p.212-215, 2010.

KADAM, D. M., PATIL, R. T., KAUSHIK, P. Foam mat drying of fruit and vegetables products em: Drying of foods, vegetables and fruits, ed. JANGARA, S. V., LAW, C. I., MUJURNDAR, A. S., v.1, p.111-124, 2010. Singapura.

KADAM, D. M., RAI, D. R., PATIL, R. T., WILSON, R. A., KAUR, S., KUMAR, R. Quality of fresh and stored foam mat dried Mandarin powder. **International Journal of Food Science and Technology**, v.46, p.793–799, 2011.

KADAM, D. M., WILSON, R. A., KAUR, S. Determination of biochemical properties of foam-mat dried mango powder. **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, p.1626–1632, 2010 (a).

KADAM, D. M., WILSON, R. A., KAUR, V., CHADHA, S., KAUSHIK, P., KAUR, S., PATIL, R. T., RAI, D. R. Physicochemical and microbial quality evaluation of foam-mat-dried pineapple powder. **International Journal of Food Science and Technology**, v.47, p.1654–1659, 2012.

KAMPF, N., GONZALEZ, M. C., CORRADINI, M. G., PELEG, M. Effect of two gums on the development, rheological properties and stability of egg albumen foams. **Rheologica Acta**, v.42, p.259–268, 2003.

KANDASAMY, P., VARADHARAJU, N., KALEMULLAH, S., MOITRA, R. Preparation of papaya powder under foam-mat drying technique using egg albumin as foaming agent. **International Journal of Bio-resource and Stress Management**, v.3, n.3, p.324-331, 2012.

KARAKASHEV, S. I., GROZDANOVA, M. V. Foams and antifoams. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.176 –177, p.1–17, 2012.

KARATHANOS, V. T., VILLALOBOS, G., SARAVACOS, G. D. Comparison of two methods of estimation of effective diffusivity from drying data. **Journal on Food Science**, v.55, n.1, p.218-223, 1990.

KARATHANOS, V.T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v.39, p.337-344, 1999.

KARATHANOS, V. T., BELESSIOTIS, V. G. Application of thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.74, p.355–361, 1999.

KARIM, A. A., WAI, C. C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree. Stability and air-drying characteristics. **Food Chemistry**, v.64, p.337-343, 1999a.

KARIM, A. A., WAI, C. C. Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. **Food Hydrocolloids**, v.13, p.203-210, 1999b.

KHA, T. C., NGUYEN, M. H., ROACH, P. D. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the gac (*Momordica cochinchensis*) fruit aril powder. **Journal of Food Engineering**, v.98, n.3, p.385-392, 2010.

KHAN, S. A., SCHNEPPER, C. A., ARMSTRONG, R. C. Foam rheology: III. Measurement of shear flow properties. **Journal of Rheology**, v.32, p.69–92, 1988.

KOTOVICZ, V., ELLENDERSEN, L. S. N., CLARINDO, M. M., MASSON, M. L. Influence of process conditions on the kinetics of the osmotic dehydration of yacon (*Polymnia sonchifolia*) in fructose solution. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.38, n.3, p.1385-1397, 2014.

KRASAEKOOPT, W., BHATIA, S. Production of yogurt powder using foam-mat drying. **AU Journal of Technology**, v.15, n.3, p.166-171, 2012.

KUDRA, T., RATTI, C. Foam-mat drying: energy and cost analyses. **Canadian Byosystems Engineering**, v.48, p.327-332, 2006.

KUDRA, T., RATTI, C. Process and energy optimization in drying of foamed materials. **Transactions of the Tambov State Technical University**, v.14, n.4, p.812-819, 2008.

LABELLE, R. L. (1966). Characterization of foams for foam mat drying. **Food Technology**, v.20, n.8, p.1065–1070, 1966.

LACHMAN, J., FERNÁNDEZ, E. C., ORSÁK, M. Yacon [*Smallanthus sonchifolia* (Poepp. Et Endl.) H. Robinson] chemical composition and use – a review. **Plant, Soil and Environment**, v.49, n.6, p.283-290, 2003.

LAGO, C. C., BERNSTEIN, A., BRANDELLI, A., NOREÑA, C. Z. Characterization of powdered yacon (*Smallanthus sonchifolius*) juice and pulp. **Food and Bioprocess Technology**, v.5, p.2183–2191, 2012.

LAU, K., DICKINSON, E. Structural and rheological properties of aerated high sugar systems containing egg albumen. **Journal of Food Science – Food Engineering and Physical Properties**, v.69, n.5, p.232-239, 2004.

LEWICKI, P. P. Water as the determinant of food engineering properties. A review. **Journal of Food Engineering**, v.61, p.483-495, 2004.

LIANG, Y., KRISTINSSON, H. G. The influence of pH-induced unfolding and refolding of egg albumin on its foaming properties. **Journal of Food Science**, v.70, p.222-230, 2005.

LIN, F., HASEGAWA, M., KODAMA, O. Purification and identification of antimicrobial sesquiterpene lactones from yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, v.67, p.2154–2159, 2003.

LISBÔA, C. G. C., FIGUEIRÊDO, R. M. F., QUEIROZ, A. J. M. Armazenamento de figo-da-índia em pó. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.2, p.216-221, 2012.

LIU, Q., BAKKER-ARKEMA, F. W. Stochastic modelling of grain drying, part 2: Model development. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.66, p.275-280, 1997.

LOBO, A., COLLI, C., ELIANA, P., TULLIA, M. Effects of fructans-containing yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp & Endl.) flour on caecum mucosal morphometry, calcium balance, and bone calcium retention in growing rats. **British Journal of Nutrition**, v.97, p.776-785, 2007.

LOMAKINA K., MÍKOVÁ K. A Study of the factors affecting the foaming properties of egg white – a review. **Czech Journal of Food Science**, v.24, p.110–118, 2006.

LUCK, P. J., BRAY, N., FOEGEDING, E. A. Factors determining yield stress and overrun of whey protein foams. **Journal of Food Science**, v.67, n.5, p.1677-1681, 2002.

MACHADO, S. R., OLIVEIRA, D. M. T., DIP, M. R., MENEZES, N. L. Morfoanatomia do sistema subterrâneo de *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson (Asteraceae). **Revista Brasileira de Botânica**, v.27, n.1, p.115-123, 2004.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying Technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MADAMBA, P. S., DRISCOLL, R. H., BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996.

MADIGAN, M. T., MARTINKO, J. M., PARKER, J. **Microbiologia de Brock**. 10.ed. Prentice Hall, São Paulo, 608p. 2004.

MAIA, G. A., MONTEIRO, J. C. S., GUIMARÃES, A. C. L. Estudo da estabilidade físico-química e química do suco de caju com alto teor de polpa. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.1, p.43-46, 2001.

MALDONADO, S., SANTAPAOLA, J. E., SINGH, J., TORREZ, M., GARAY, A. Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.1, p. 251-256, 2008.

MANRIQUE, I., HERMANN, M., BERNET, T. **Yacon Fact Sheet**. 1.ed. Lima, 2004. Disponível em: <www.cipotato.org/artc/cipcrops/factsheetyacon.pdf>. Acesso em: 05. mar. 2012.

MANRIQUE, I., PÁRRAGA, A., HERMANN, M. **Yacon syrup: Principles and processing**. 1.ed. Lima, 2005. Disponível em: <http://cipotato.org/artc/cip_crops/1919-Yacon_Syrup.pdf/view>. Acesso em: 05. mar. 2012.

MANRIQUE, I.; PÁRRAGA, A. **Conservación y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos Andinos: Una década de investigación para el desarrollo (1993-2003). Jarabe de yacón: principios y procesamiento**. 1.ed. Lima, 2005. Disponível em: <http://cipotato.org/artc/cip_crops/1919-Jarabe_Yacon.pdf/view>. Acesso em: 06.mar.2012.

MARINOS-KOURIS, D., MAROULIS, Z. B. **Handbook of Industrial Drying**. Mujumdar: Marcel Dekker Inc., 1995.

MARINOVA, K. G., BASHEVA, E. S., NENOVA, B., TEMELSKA, M., MIRAREFI, A. Y., CAMPBELL, B., IVANOV, I. B. Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins: Sodium caseinate and whey protein concentrates. **Food Hydrocolloids**, v.23, p.1864-1876, 2009.

MARQUES, G. R., BORGES, S. V., MENDONÇA, K. S., FERNANDES, R. V. B., MENEZES, E. G. T. Application of maltodextrin in green corn extract powder production. **Powder Technology**, v.263, p.89-95, 2014.

MARTIN, L. G. P. **Estudo da secagem da polpa de cupuaçu por atomização**. Campinas, 2013. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

MASON, T. G. New fundamental concepts in emulsion rheology. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v.4, n.3, p.231-238, 1999.

MCMINN, W. A. M. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. **Journal of Food Engineering**, v.72, p.113-123, 2006.

MCMINN, W. A. M., MAGEE, T. R. A. Principles, methods and applications of the convective drying of food stuffs. **Trans IChemE**, v.77, p.175-193, 1999.

MENTREDDY, S. R. Review – Medicinal plant species with potential antidiabetic properties. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.87, p.743-750, 2007.

MIDILLI, A., KUCUK, H., YAPAZ, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

MISHRA, P., MISHRA, S., MAHANTA, C. L. Effect of maltodextrina concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embica officinalis*) juice powder. **Food and Bioproducts Processing**, v.92, p.252-258, 2014.

MLEKO, S., KRISTINSSON, H. G., LIANG, Y., GUSTAW, W. Rheological properties of foams generated from egg albumin after pH treatment. **LWT - Food Science and Technology**, v.40, p.908-914, 2007.

MONTIEL, V.N. El cultivo de yacon. Instituto Nacional de Investigación Agraria – Lima, Perú. **Boletín Técnico**, n.35, p.19-20, 1996.

MOONAY, D. Small-Scale Vane Rheometry. **Application Notes**, Agosto 2011. Disponível em: < <http://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/19508-Small-Scale-Vane-Rheometry/>>. Acesso em: 12/11/2014.

MOREIRA, G. E. G., COSTA, M. G. M., RODRIGUEZ – DE SOUZA, C. A., BRITO – DE, S. E., MEDIROS - DE., D. F. D. M., AZEREDO - DE., M. C. H. Physical properties of spray dried acerola pomace extract as affected by temperature and drying aids. **LWT – Food Science and Technology**, v.42, p.641-645, 2009.

MOURA, C. P. Aplicação de redes neuronais para a predição e otimização do processo de secagem de yacon (*Polymnia sonchifolia*) com pré-tratamento osmótico. **Dissertação de Mestrado** – Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, 107p, 2004.

MOURA, N. A., CAETANO, B. F. R., SIVIERI, K., URBANO, L. H., CABELLO, C., RODRIGUES, M. A. M., BARBISAN, L. F. Protective effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) intake on experimental colon carcinogenesis. **Food and Chemical Toxicology**, v.50, p.2902–2910, 2012.

MURRAY, B. S., ETELLAIE, R. Foam stability: proteins and nanoparticles. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v.9, n.5, p.314–320, 2004.

MUTHUKUMARAN, A., RATTI, C., RAGHAVAN, V. G. S. Foam-mat freeze-drying of egg white – mathematical modeling part II: freeze drying and modeling. **Drying Technology**, v.26, p.513-518, 2008.

NARAI-KANAYAMA, A., TOKITA, N., ASO, K. Dependence of fructooligosaccharide content on activity of fructooligosaccharide-metabolizing enzymes in yacon

(*Smallanthus sonchifolius*) tuberous roots during storage. **Journal of Food Science**, v.72, n.6, p.381-387, 2007.

NARSIMHAN, G. A model for unsteady state drainage of a static foam. **Journal of Food Engineering**, v.14, p.139–165, 1991.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Lost crops of the incas: little-known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation**. Washington, D.C. National Academy Press, 1989.415p.

NELSON, D. L., COX, M. M. **Lehninger Principles of Biochemistry**. 4.ed. Nova lorque: W. H. Freeman and Company, 2004.

NGUYEN, M. H., PRICE, W. E. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. **Journal of Food Engineering**, v.79, n.1, p.200-207, 2007.

NISHIMOTO, E. K., OLIVEIRA, M. A., CABELLO, C. Avaliação do desenvolvimento de plantas de yacón cultivadas no CERAT/UNESP/Botucatu. **Biblioteca da Associação Brasileira de Horticultura**. Disponível em: <<http://www.abhorticultura.com.br/Biblioteca/Default.asp?id=2614>>. Acesso em: 12. fev. 2012.

OGUNTUNDE, A. O., ADEOJO, O. O. Foam-mat drying of fluid whole milk with glyceryl monostearate. **Nigerian Food Journal**, v.10, p.61-69, 1992.

OHYAMA, T., ITO, O., YASUYOSHI, S., IKARASHI, T., MINAMIZAWA, K., KUBOTA, M., ASAMI, T., TSUKHASHI, T. Composition of storage carbohydrate in tuber of yacón (*Polymnia sonchifolia*). **Soil Science and Plant Nutrition**, v.36, p.167-71, 1990.

OJANSIVU, I., FERREIRA, C. L., SALMINEN, S. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. **Trends in Food Science and Technology**, v.22, p.40-46, 2011.

OLIVEIRA T. M., PIROZI, M. R., BORGES, J. T. S., GERMANI, R., FONTES, M. P. F. Caracterização do amido de grão-de-bico. **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento em Alimentos**, v.27, n.1, p.27-42, 2009.

OLIVEIRA, D. M., CLEMENTE, E., COSTA, J. M. C. Hygroscopic behavior and degree of caking of grugru palm (*Acronomia aculeate*) powder. **Journal of Food Science and Technology**, v.51, n.10, p.2783-2789, 2014.

OLIVEIRA, I. M., FERNANDES, F. A. N., RODRIGUES, S., SOUZA, P. H. M., MAIA, G. A., FIGUEIREDO, R. W. Modeling and optimization of osmotic dehydration of banana followed by air drying. **Journal of Food Process Engineering**, v.29, p.400-413, 2006.

OLIVEIRA, M. A., NISHIMOTO, E. K. Avaliação do desenvolvimento de plantas de yacón (*Polymnia sonchifolia*) e caracterização dos carboidratos de reserva em HPLC. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.7, n.2. p.215-220, 2004.

ORDÓÑEZ, J. A., RODRIGUEZ, M. I. C., ÁLVAREZ, L. F., SANZ, M. L. G., MINGUILLÓN, G. D. G. F., PERALES, L. H., CORTECERO, M. D. S. **Tecnología de alimentos – Componentes dos processos de alimentos – Volume I**. 2.ed. Artmed, Porto Alegre, 294p. 2007.

ÖZDEMİR, M., DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42, n.4, p.225-233, 1999.

PARK, K. J., ANTONIO, G. C., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas, 121p. 2007.

PARK, K. J., VOHNIKOVA, Z., BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha Crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, v.51, p.193-199, 2002.

PARK, K. J., YADO; M. K. M., BROD, F. P. R. Study of the Barlett pear (*Pyrus* sp) drying in slices. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.3, p.288-292, 2001.

PEDRESCHI, R., CAMPOS, D., NORATTO, G., CHIRINOS, R., CISNEROS-ZEVALLOS, L. Andean yacon root (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. Endl) fructooligosaccharides as a potential novel source of prebiotics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.51, p.5278-5284, 2003.

PEREIRA, J. A. R., BARCELOS, M. F. P., PEREIRA, M. C. D., FERREIRA, E. B. Studies of chemical and enzymatic characteristics of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its flours. **LWT - Food Science and Technology**, v.33, n.1, p.75-83, 2013.

PEREIRA, S. C., MONTEIRO, M. R. P., HENRIQUES, G. S., CALLEGARI, F. U., HERBST, W. L. Avaliação do efeito hipoglicemiante da farinha e do extrato de yacon (*Polymnia sonchifolia*) em ratos normais e diabéticos. **Revista do Médico Residente**, v.11, n.4, p.147-154, 2009.

PERNELL, C. W., FOEGEDING, E. A., DAUBERT, C. R. Measurement of the yield stress of protein foams by vane rheometry. **Journal of Food Science**, v.65, p.110–114, 2000.

PERNELL, C. W., FOEGEDING, E. A., LUCK, P. J., DAVIS, J. P. Properties of whey and egg white protein foams. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect**, v.204, p.9–21, 2002.

PERUSSELO, C. A., KUMAR, C., CASTILHOS, F., KARIM, M. A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Applied Thermal Engineering**, v.63, p.23-32, 2014.

PRASAD, K., VAIRAGAR, P. R., BERA, M. B. Temperature dependent hydration kinetics of *Cicer arietinum* splits. **Food Research International**, v.43, n.2, p.483-488, 2010.

PRASETYANINGRUM, A., DJAENI, M. Drying spirulina with foam mat drying at médium temperature. **International Journal of Science and Engineering**, v.3, n.2, 2012.

QUEK, S. Y., CHOK, N. K., SWEDLAND, P. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powder. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v.46, n.5, p.386-392, 2007.

QUINTEROS, E. T. T. Produção com tratamento enzimático e avaliação do suco de yacon. **Tese de Doutorado** – Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 148p, 2000.

QUISPE-CONDORI, S., SALDAÑA, M. D. A., TEMELLI, F. Microencapsulation of flax oil with zein using spray and freeze drying. **LWT - Food Science and Technology**, v.44, n.9, p.1880-1887, 2011.

RAHARITSIFA, N., GENOVESE, D. B., RATTI, C. Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. **Journal of Food Science**, v.71, n.3, p.E142–E151, 2006.

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

RAIKOS, V., CAMPBELL, L., EUSTON, S. R. Effects of sucrose and sodium chloride on foaming properties of egg white proteins. **Food Research International**, v.40, p.347–355, 2007.

RAJKUMAR, P., KAILAPPAN, R. Optimizing the process parameters for foam mat drying of Totapuri mango pulp. **The Madras Agricultural Journal**, v.93, p.86-98, 2006.

RAJKUMAR, P., KAILAPPAN, R., VISWANATHAN, R., RAGHAVAN, G. S. V., RATTI, C. Foam mat drying of Alphonso mango pulp. **Drying Technology**, v.25, p.357-365, 2007.

RAO, M. A., RIZVI, S. S. H., DATTA, A. K. **Engineering Properties of Foods**. 3.ed. Boca Ratón: CRC Press, 2005.

RATTI, C. **Advances in Food Dehydration**. Boca Ratón: CRC Press, 2009.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: review. **Journal of Food Engineering**, v.49, n.2, p.311-319, 2001.

RATTI, C., KUDRA, T. Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. **Drying Technology**, v.24, p.1101-1108, 2006.

REDDY, R. S., RAMACHANDRA, C. T., HIREGOUDAR, S., NIDONI, U., RAM, J., KAMMAR, M. Influence of processing conditions on functional and reconstitution properties of milk powder made from Osmanabadi goat milk by spray-drying. **Small Ruminant Research**, v.119, p.130-137, 2014.

REIS, F. R., LENZI, M. K., MASSON, M. L. Effect of vacuum drying conditions on the quality of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices: process optimization toward color quality. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.36, p.67–73, 2012.

RICHARDSON, P. **Thermal Technologies in Food Processing**. Boca Ratón: CRC Press, 2001.

RODRIGUES, M. I., IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 1.ed. São Paulo: Editora Casa do Pão, 2005.

ROSENTHAL, A. J. **Food Texture: measurement and perception**. 1. ed. Gaithersburg: Aspen Publishers Inc., 1999.

RUSS, J. C. **Image analysis of food microstructure**. 1.ed. Florida: CRC Press LLC, 2005.

SAHIN, A. Z., DINCER, I. Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. **Journal of Food Engineering**, v.71, p.119-126, 2005.

SAINT-JALMES, A., PEUGEOT, M.-L., FERRAZ, H., LANGEVIN, D. Differences between protein and surfactant foams: microscopic properties, stability and coarsening. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.263, p.219–225, 2005.

SANKAT, C. K., CASTAIGNE, F. Foaming and drying behavior of ripe bananas. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, v.37, n.1, p.217-525, 2004.

SARKER, D. K., BERTRAND, D., CHTIOUI, Y., POPINEAU, Y. Characterization of foam properties using image analysis. **Journal of Texture Studies**, v.29, p.15-42, 1998.

SCHER, C. F., RIOS, A. O., NOREÑA, C. P. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. **International Journal of Food Science and Technology**, v.44, p.2169-2175, 2009.

SEMINARIO, J., VALDERRAMA, M. **El yacon: fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio**. 1.ed. Lima, 2005. Disponível online: <http://www.cipotato.org/market/PDFdocs/Yacon_Fundamentos_password.pdf>. Acesso em: 05.mar. 2012.

SEMINARIO, J., VALDERRAMA, M., MANRIQUE, I. **El yacón: fundamentos para el aprovechamiento de um recurso promissório**. Centro Internacional de la Papa (CIP), Universidad Nacional de Cajamarca, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), Lima, Perú, 2003.

SHARAF-ELDEN, Y. I., BLAISDELL, J. L., HAMDY, M.Y. A model for car corn drying. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.23, p.1261-1265, 1980.

SHARMA. P.; GUJRAL. H. S.; ROSELL. C. M. R. Effects of roasting on barley β -glucan. Thermal, textural and pasting properties. **Journal of Cereal Science**, v.53, p.25-30, 2011.

SHI, Q., ZHENG, Y., ZHAO, Y. Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. **Energy Conversion and Management**, v.71, p.208–216, 2013.

SHIBY, V. K., MISHRA, H. N. Thin layer modelling of recirculatory convective air drying of curd (indian ioghurt). **Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing**, v.85, n.3, p.193-201, 2007.

SHISHIR, M. R. I., TAIP, F. S., AZIZ, N. A., TALIB, R. A. Physical properties of spray-dried pink guava (*Psidium guajava*) powder. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v.2, p.74-81, 2014.

SILVA, A. S. A., MELO, K. S., ALVES, N. M. C., FERNANDES, T. K. S. F., FARIAS, P. A. Cinética de secagem em camada fina de banana maçã em secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.129-136, 2009.

SILVA, F. D., MATA, M. E. E. M. C, DUARTE, M. E. M., SOUZA, J. A., SILVA, Y. C. Desidratação osmótica de banana da terra (*Musa sapientum*) aplicação de modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.1, p.69-76, 2003.

SIMONOVSKA, B., VOVK, I., ANDRENESEK, S., VALENTOVÁ, K., ULRICHOVÁ, J. Investigation of phenolic acids in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves and tubers. **Journal of Chromatography A**, v.1016, p.89–98, 2003.

SINGH, R. P., HELDMAN, D. R. **Introducción a la ingeniería de los alimentos**. Acribia, Zaragoza, 554 p. 1998.

SIRIWAN, D., NARUSE, T., TAMURA, H. (b). Effect of epoxides and α -methylene- γ -lactone skeleton of sesquiterpenes from yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves on caspase-dependent apoptosis and NF- κ B inhibition in human cervical cancer cells. **Fitoterapia**, v.82, p.1093-1101, 2011.

SIRIWAN. D., MIYAWAKI, C., MIYAMOTO, T., NARUSE, T., OKAZAKI, K., TAMURA, H. (a). Chemopreventive activity of sesquiterpene lactones (SLs) from yacon against TPA-induced raji cells deformation. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 14, n.10, p.605-609, 2011.

SOARES, E. C. Caracterização de aditivos para secagem de araçá-boi (*Eugenia stipitata* McVaugh) em leito de espuma. **Dissertação de Mestrado – Engenharia de Alimentos**, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 88p, 2009.

SOCHANSKI, J.S., GOYETTE, J., BOSE, T.K., AKYEL, C., BOSISIO, R. Freeze dehydration of foamed milk by microwaves. **Drying Technology**, v.8, n.5, p.1017–1037, 1990.

SOUZA, A. S. D., BORGES, S. V., MAGALHÃES, N. F., RICARDO, H. V., AZAVEDO, A. D. Spray dried tomato powder reconstitution and color. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.51, n.4, p.807-817, 2008.

SOUZA, A. S., BORGES, S. V., MAGALHÃES, N. F., RICARDO, H. V., CEREDA, M. P., DAIUTO, E. R. Influence of spray drying conditions on the physical properties of dried pulp tomato. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.29, n.2, p.291-294, 2009.

SOUZA, A. M., POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para análise exploratória de óleos vegetais comestíveis por espectroscopia no infravermelho médio e análise de componentes principais: um tutorial, parte I. **Química Nova**, v.35, n.1, p.223-229, 2012.

STANLEY, D. W., GOFF, H. D., SMITH, A. K. Texture-structure relationships in foamed dairy emulsions. **Food Research International**, v. 29, n.1, p.1-13, 1996.

SUNJKA, P. S., RAGHAVAN, G. S. V. Assessment of pretreatment methods and osmotic dehydration for cranberries. **Canadian Biosystems Engineering**, v.46, p.335-340, 2004.

TAKENAKA, M., ONO, H. Novel octulosonic acid derivatives in the composite *Smallanthus sonchifolius*. **Tetrahedron Letters**, v.44, p.999–1002, 2003.

TAKENAKA, M., YAN, X., ONO, H., YOSHIDA, M., NAGATA, T., NAKANISHI, T. Caffeic acid derivatives in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p.793-796, 2003.

THAKUR, R. K., VIAL, C., DJELVEH, G. Foaming of commercial grade food products in a continuous stirred column. **Chemical Engineering Research and Design**, v.81, n.9, p.1083–1089, 2003.

THUWAPANICHAYANAN, R., PRACHAYAWARAKORN, S., SOPONRONNARIT, S. Modeling of diffusion with shrinkage and quality investigation of banana foam mat drying. **Drying Technology**, v.26, p.1326-1333, 2008.

TOGRUL, I. T., PEHLIVAN, D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.209-216, 2002.

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Processing Engineering**, 3.ed. Nova Iorque: Springer, 2007.

TONON, R. V., BRABET, C., HUBINGER, M. D. Aplicação da secagem por atomização para a obtenção de produtos funcionais com alto valor agregado a partir do açaí. **Inclusão Social**, v.6, n.2, 2013.

TONON, R. V., BRABET, C., HUBINGER, M. D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açaí (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**, v.88, p.411-418, 2008.

VALENTOVÁ, K., CVAK, L., MUCK, A., ULRICHOVÁ, J., SIMANEK, V. Antioxidant activity of extracts from the leaves of *Smallanthus sonchifolius*. **European Journal of Nutrition**, v.42, p.61-66, 2003.

VALENTOVÁ, K., FRČEK, J., ULRICHOVÁ, J. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and Maca (*Lepidium meyenii*), traditional andean crops as new functional foods on the european market. **Chemické Listy**, v.95, n.10, p.594–601, 2001.

VALENTOVÁ, K., STEJSKAL, D., BARTEK, J., DVOŘÁČKOVÁ, S., KŘEN, V., ULRICHOVÁ, J., ŠIMÁNEK, V. Maca (*Lepidium meyenii*) and yacon (*Smallanthus sonchifolius*) in combination with silymarin as food supplements: In vivo safety assessment. **Food and Chemical Toxicology**, v.46, p.1006-1013, 2008.

VALENTOVÁ, K., ULRICHOVÁ, J. *Smallanthus sonchifolius* and *Lepidium meyenii* – Prospective andean crops for the prevention of chronic diseases. **Biomedical Papera**, v.147, n.2, p.119-130, 2003.

VAN'T LAND, C. M. **Drying in the Process Industry**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

VASCONCELOS, C. M., MINIM, V. P. R., CHAVES, J. B. P. Low-calorie yogurt added with yacon flour: development and physicochemical evaluation. **Revista Chilena de Nutrición**, v.39, n.3, p.65-71, 2012.

VASCONCELOS, C. M., SILVA, C. O., TEIXEIRA, L. J. Q., CHAVES, J. B. P., MARTINO, H. S. D. Determinação da fração da fibra alimentar solúvel em raiz e farinha de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) pelo método enzimático-gravimétrico e cromatografia líquida de alta eficiência. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v.69, n.2, p.188-193, 2010.

VERNON-CARTER, E. J., ESPINOSA-PAREDES, G., BERISTAIN, C. I., ROMERO-TEHUITZIL, H. Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavour retention of tamarind foam-mats. **Food Research International**, v.34, n.7, p.587-598, 2001.

VILHENA, S. M. C., CÂMARA, F. L. A., KAKIHARA, S. T. O cultivo de yacón no Brasil. **Horticultura Brasileira**, v.18, n.1, p.5-8, 2000.

VILHENA, S.M.C. **Ciclo de cultivo e técnicas pós-colheita de yacon (*Polymnia sonchifolia* Poep. Endl.) em função do conteúdo de frutose total nos órgãos subterrâneos**. Botucatu, 2001. 73p. Tese (Doutorado em Agronomia/Horticultura).

VISSOTTO, F. Z., MONTENEGRO, F. M., SANTOS, J. M., OLIVEIRA, S. J. R. Avaliação da influência dos processos de lecitinização e de aglomeração nas propriedades físicas de achocolatados em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.26, n.3, p.666-671, 2006.

VIUDA-MARTOS, M., RUIZ-NAVAJAS, Y., MARTIN-SÁNCHEZ, A., SÁNCHEZ-ZAPATA, E., FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J., SENDRA, E., SAYAS-BARBERÁ, E., NAVARRO, C., PÉREZ-ÁLVAREZ, J. A. Chemical, physico-chemical and functional properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) bagasses powder co-product. **Journal of Food Engineering**, v.110, p.220-224, 2012.

WALTON, D. E. The morphology of spray-dried particles, a qualitative view. **Drying Technology**, v.18, p.1943-1986, 2000.

WALTON, D. E., MUMFORD, C. J. The morphology of spray-dried particles: the effect of process variables upon the morphology of spray-dried particles. **Chemical Engineering Research and Design**, v.77, p.442-460, 1999.

WANG, Z., NARSIMHAN, G. Evolution of liquid holdup profile in a standing protein stabilized foam. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.280, p.224-233, 2004.

WANG, C. Y., SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying. ASAE Paper No. 78-6505, ASAE, St. Joseph, MI, 1978.

WIDYASTUTIL, T. E. W., SRIANTA, I. Development of functional drink based on foam-mat dried papaya (*carica papaya* L.); optimization of foam-mat drying process and its formulation. **International Journal of Food, Nutrition and Public Health**, v.4, n.2, p.167-176, 2011.

WIECHETECK, F. V., NOGUEIRA, A., DRILLEAU, J. F., WOSIACKI, G. Effect of cryoconcentration in total phenolic compounds of industrial apple must. **Publicatio UEFG: Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, v.11, n.1, p.27-34, 2005.

WILDE, P. J., CLARK, D. C. **Methods of testing protein functionality**. Londres, Blackie, 1996.

WILSON, R. A., DATTATREYA, M. K., CHADHA, S., GREWAL, M. K., SHARMA, M. Evaluation of physical and chemical properties of foam-mat dried mango (*Mangifera indica*) powder during storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.38, p.1866-1874, 2014.

WILSON, R. A., KADAM, D. M., CHADHA, S., SHARMA, M. Foam mat drying characteristics of mango pulp. **International Journal of Food Science and Nutrition Engineering**, v.2, n.4, p.63-69, 2012.

YALDIZ, O., ERTEKIN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. **Drying Technology**, v.19, p.583-597, 2001.

YALDIZ, O., ERTEKIN, C., UZUN, H. I. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy – An International Journal**, v.26, p.457-465, 2001.

YAN, X., SUZUKI, M., OHNISHI-KAMEYAMA, M., SADA, Y., NAKANISHI, T., NAGATA, T. Extraction and identification of antioxidants in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 47, p.4711-4713, 1999.

YANG, X., BERRY, T. K., FOEGEDING, E. A. Foams prepared from whey protein isolate and egg white protein: 1 physical, microstructural, and interfacial properties. **Journal of Food Science**, v.74, n.5, p.E259-E268, 2009.

YANG, X., FOEGEDING, E. A. The stability and physical properties of egg white and whey protein foams explained based on microstructural and interfacial problems. **Food Hydrocolloids**, v.25, p.1687-1701, 2011.

YOUSEFI, S., EMAM-DJOMEH, Z., MOUSAVI, S. M. Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica Granatum* L.). **Journal of Food Science and Technology**, v.48, n.6, p.677-684, 2011.

YUN, B. Y., KIM, J. H., JANG, S. J., KIM, D. I., KWON, O. D., KUK, Y. I. Effect of Yacon (*Smallanthus sonchifolius* H. Robinson) extracts on herbicidal, fungicidal, and insecticidal activities. **Korean Journal of Weed Science**, v.32, n.2, p.98-106, 2012.

ZANOELO, E. F. CELSO, G. M., KASKANTZIS, G. Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. **Byosystems Engineering**, v.96, n.4, p.487-494, 2007.

ZHANG, Q., LITCHFIELD, J. B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. **Drying Technology**, n.9, p.383-395, 1991.

ZIELINSKI, A. A. F., HAMINIUK, C. W. I., NUNES, C. A., SCHNITZLER, E., VAN RUTH, S. M., GRANATO, D. Chemical composition, sensory properties, provenance, and bioactivity of fruit juices as assessed by chemometrics: a critical review and guideline. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.13, p.300-316, 2014.

APÊNDICES

**APÊNDICE I – ARTIGO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO NA REVISTA JOURNAL
OF FOOD ENGINEERING**

DOI 10.1016/j.jfoodeng.2015.02.030

FOAM MAT DRYING OF YACON JUICE: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND COMPUTER SIMULATION

ABSTRACT: The foam mat drying of yacon juice (YJ) and concentrate yacon juice (CYJ) was conducted under various conditions of thickness of product (0.5, 1.0 and 1.5 cm) and air temperature (50, 60 and 70°C). After drying, the resulted dry powder was removed from the metallic tray and pulverized. Both variables influenced statistically ($p > 0.5$) on drying time and moisture content and water activity (A_w) of the product. The shortest drying time to reach the desired A_w (0.1-0.3) corresponds to the condition of 0.5 cm and 70°C for both juices – 59 and 65 min for the YJ and CYJ, respectively. The process was modeled in terms of heat and mass transfer and then simulated by a finite element method software. The model was able to predict the process satisfactorily and the foam drying technique allowed to obtain yacon powder of good quality, which can be inserted in various food formulations.

KEYWORDS: Yacon, foam mat drying, mass transfer, heat transfer, modeling, simulation.

1. INTRODUCTION

The tuberous roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) are native to the Andean mountains, where they are commonly cultivated and consumed since the pre-Inca culture period (Seminar et al. 2003; Graefe et al., 2004). The global expansion of their production and marketing initiated after studies related their consumption to the promotion of human health benefits, such as the antioxidant activity associated to the phenolic compounds (Yan et al., 1999; Takaneka et al, 2003) and the reduction of blood glucose levels ascribed to the carbohydrate profile (Mentreddy, 2007; Valentová et al., 2008).

For its sensory resemblance to a sweet and refreshing fruit, the root is traditionally consumed in its raw form (Maldonado et al., 2008). The sweet taste is related to its composition rich in carbohydrates. Unlike other tubers, however, yacon stores fructooligosaccharides (FOS) and inulin instead of starch. These sugars provide prebiotic properties to the yacon roots, forasmuch these components are poorly broken by the digestive enzymes: reaching the intestinal flora intact, they stimulate the

development and activity of microorganisms that are beneficial to human health (Lachman et al. 2003; Ojansivu et al, 2011; Campos et al., 2012).

The yacon roots are passive of accelerated rates of enzymatic browning due to the high content of water (up to 70% of the fresh weight) and the soft and delicate internal tissues. Such combination leads to high losses during post-harvesting and transportation, restricting the sustainable development of the culture and generating economic losses (Manrique and Parraga, 2005; Shi et al, 2013.). Inasmuch as yacon is a seasonal crop, it is extremely important to establish processing alternatives that increase the stability and availability of this food (Scher et al., 2009).

The moisture removal with consequent reduction of water activity is one of the most viable alternatives to extend the shelf life of this culture. The application of different drying techniques, such as encapsulation (Lake et al., 2012), convective drying (Vasconcelos et al, 2010), dehydration in vacuum oven (Reis et al, 2012), solar drying (Castro et al, 2012), osmo-convective drying (Kotovicz et al, 2014; Perussello et al. 2014) and freeze drying (Bernstein et al., 2014) are reported in literature. Among the various researches about dehydration of yacon published so far, none of them regards to the foam mat drying.

In the foam mat drying, a liquid is converted into a stable foam by incorporation of air (usually by whipping) after addition of a foaming agent. The foam is dried by application of heat and the resulting dried powder is further processed (Raharitsifa et al., 2006; Rajkumar et al., 2007). Because of the porous structure of the foam and the large surface area exposed to the drying air, the mass transfer rates are increased when compared to the solid food, leading to a shorter period of dehydration and therefore a final product with higher quality. The nutrients are preserved and the browning rates are lower for the application of high temperatures is not mandatory (Ratti and Kudra, 2006; Muthukumaran et al., 2008). This method can be used on heat sensitive, viscous and high sugar content foods, giving rise to a powder that is easily rehydrated and presents characteristics such as color, flavor, texture and nutritional composition (i.e., antioxidants) similar to the raw material (Fernandes et al., 2013.). For these skills, the foam mat drying was applied in various types of foods such as fruit juices (Kadam and Balasubramanian, 2011; Kadam et al, 2012; Chaves et al, 2013.), yogurt (Krasaekoopt and Bhatia, 2012), spirulina (Prasetyaningrum and Djaeni, 2012) and beans (Falade et al., 2003).

For an efficient mat drying process, the foams should remain mechanically and thermodynamically stable in order to maintain the efficiency of the water removal and the quality of the product. The use of agents that promote stability is thus required (Bag et al., 2011). Ovalbumin is generally applied as foaming agent in view of the ability of its proteins to form a dense film around the air bubbles, reducing the surface tension instability and retaining the entrapped air (Way and Karim, 1999; Lomakina and Mikova, 2006).

The use of appropriate drying conditions is of fundamental importance to the quality of the final product and the energy demand required. In the context of the foam mat drying, parameters such as air temperature, velocity and relative humidity, and thickness and composition of the foam determine the quality of the powder obtained towards color, moisture content and preservation of nutrients.

With the purpose of evaluate the application of this technology to yacon roots, drying tests were conducted at different process conditions. The addition of ovalbumin to the yacon juice in order to form a foam that was convective dried resulted in a powder with a high nutritional value in terms of quality and high content of proteins and FOS. As such, this product can be incorporated in the formulation of various foods as a way to facilitate the consumption of yacon and the use of its features. The powder offers a multitude of uses: it can be consumed as a juice after rehydration in water and may also be added to dairy and bakery products to increase their biological value and/or impart texture properties. The statistical analysis of the data showed that the parameters air temperature and thickness of the foam were decisive in the drying rate and, therefore, in the energy demand of the process. As an additional tool to estimate optimal drying conditions, the heat and mass transfer phenomena were modeled to predict the process without the need of driving multiple experimental tests. The computational simulations provided satisfactory results.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 YACON JUICE

The yacon juice was obtained from roots purchased in the municipal market of Curitiba (Paraná, Brazil). After washed and peeled, they were processed in a food centrifuge. Immediately after processing, sodium metabisulfite was added to the juice

(300 mg/L juice) (Maia et al., 2001) to limit the enzymatic activity. The total soluble solids (TSS) were measured using a refractometer (RL3, PZO, Brochowska, Poland). The samples were packed and stored in a freezer (-18°C) until preparation of the foams.

To evaluate the effect of TSS in the foam characteristics, part of the juice was concentrated by freeze concentration, using the methodology proposed by Wiecheteck et al (2005). Afterwards, it was stored under the same conditions presented to the non-concentrate juice. The TSS was set as 8°Brix and 24°Brix to the yacon juice (YJ) and concentrate yacon juice (CYJ), respectively.

2.2 PREPARATION OF THE FOAM AND DRYING PROCESS

The foams of YJ and CYJ were formed by the addition of ovalbumin powder (20%) (Cami, Mizumoto Alimentos Ltda, Guapirama, Paraná, Brazil) to the liquid phase. After complete mixing, the solution was whipped in a domestic mixer (360W power) at maximum speed for 20 min to allow the mechanical incorporation of air. The conditions for producing the foams were determined through preliminary tests conducted by the authors.

After whipping, the foams were placed in galvanized steel beds (length 20 cm, width 15 cm and thickness varying from 0.5 to 1.5 cm) and then dried in a convective oven (Fabbe-Primar, São Paulo, Brazil) under controlled air temperature (50, 60 and 70°C) and speed (4 m/s), which were determined with an anemometer (Testo 405, Testo AG, Lenzkirch, Germany). The moisture loss was assessed by weighing the samples every 15 min on an electronic scale. The criterion for the completion of the process was the stability of the sample's masses in three successive measurements. The moisture content equivalent to the stabilization of the sample's mass was considered as the equilibrium moisture content, which approached 1% w.b. for all drying tests. The ideal moisture for the yacon powder, previously tested by the authors, is the one that provides a light-colored product with low water activity (0.1 to 0.3).

2.3 MOISTURE RATIO

The moisture ratio (MR) of the samples during drying was calculated by

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (1)$$

where M is the moisture content at time t , M_e is the equilibrium moisture content and M_0 is the initial moisture content of the foam, all of them in dry basis [kg/kg].

After drying, the yacon juice foams were scraped off the trays, sprayed, vacuum packed and stored for further studies (Kadam et al., 2010). The water-soluble powder obtained, rich in animal and vegetable proteins and FOS, can be inserted in the formulation of many food products, whether to increase its nutritional value or to assign different textures.

2.4 STATISTICAL ANALYSIS

The experiments were planned according to a 2^2 full factorial design with repetition at the central point for both foams (YJ and CYJ), as outlined in Table 1. The effects of two levels of two independent variables, thickness of the foam layer and drying temperature (x_1 and x_2 , respectively) were assessed. The dependent variables analyzed were the drying time (y_1), the moisture content of the yacon powder (y_2) and its water activity (y_3). The factorial design generated 10 experiments, performed in triplicate, as shown in Table 2.

Table 1 – Sketch of the experimental design.

Table 2 – Experimental tests resulted from the factorial design.

The effect of the independent variables (x_1 and x_2) on the process responses (y_1 , y_2 and y_3) were evaluated by the Student's t test at a 95% confidence interval ($p \leq 0.05$) using the software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South America, Toulusa, Oklahoma, United States) (Rodrigues and Iemma, 2005).

2.5 MODELING AND SIMULATION OF THE DRYING PROCESS

The mathematical model proposed to represent the transient phenomena of heat and

mass transfer during drying of the yacon and ovalbumine foams bases on the diffusional laws of Fourier and Fick, respectively, according to Equations 2 and 3. The 3-D computational domain (Fig. 1) is represented by the metallic bed filled with the foam.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(-D \nabla C) = R \quad (3)$$

where ρ , C_p and k are the product's density (kg/m³), specific heat (J/kg·K) and thermal conductivity (W/m·K), respectively, T is temperature (K), u is the velocity field (m/s), C is the concentration of water (mol/m³), Q is the heat generation (W m), D is the mass diffusion coefficient (m²/s) and R is the mass generation or consumption (kg/m³).

Figure 1 – Computational domain (Note: thickness may assume three different values depending on the experimental test).

The following assumptions were considered on the formulation of the model: (a) Speed field, thermal and mass generation and consumption are null; (b) Thermophysical properties are homogeneous along the foam but variable according to drying time; (c) Initial moisture content and temperature of the foam and temperature of the steel bed are homogeneous.

The following mathematical model, written in generalized coordinates, was obtained applying the conditions above to Equations 2 and 3. The coupling between heat and mass transfer was performed by the use of thermophysical properties of the food material as a function of its moisture content.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(-D \nabla C) = R \quad (5)$$

The initial and boundary conditions for the heat transfer are: initial temperature known (Eq. 6), null heat flux in the symmetry region (Eq. 7), convective heating and evaporative cooling at the surface of the foam (Eqs. 8 and 9, respectively) and convection at the sides of the metallic bed (Eq. 10). For mass transfer, the initial and boundary conditions are: initial moisture content known (Eq. 11), null mass flux in the symmetry region (Eq. 12) and convective mass flow on the foam's surface (Eq. 13).

$$T = T_0 \text{ for } t = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \text{ for } l = L/2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = h(T_\infty - T) \text{ for } \tau = T \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = h_m \times \varphi \times (\rho_{wap-\infty} - \rho_{wap-wet}) \text{ for } \tau = T \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = h(T_\infty - T) \text{ for } l = 0, l = L, w = 0 \text{ and } w = W \quad (10)$$

$$C = C_0 \text{ for } t = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0 \text{ for } l = L/2 \quad (12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = h_m(C_\infty - C) \text{ for } \tau = T \quad (13)$$

where T_0 is the product's initial temperature (K), L , W and T are the length, width and thickness of the metallic bed, respectively (m), h and h_m are the coefficients of convective heat transfer (W/m \cdot K) and mass transfer (m/s), respectively, t is the drying time (s) and C_0 and C_∞ are the concentrations of water in the product at time 0 and in the air, respectively (mol/m 3).

The model was implemented in the software COMSOL Multiphysics[®], version 4.3, which solves differential equations by the Finite Element Method. For the numerical simulation, a default mesh composed of 19069 tetrahedral, triangular and edge elements and a step time of 30 seconds were used. The coupling between the phenomena of heat and mass transfer was conducted using thermophysical properties that are variable over time based on the moisture content of the foam, as mentioned previously. The properties of the product (specific heat, thermal conductivity and density) were estimated according to Singh and Heldman (1993) using equations based on the chemical composition and porosity (Equations 14 to 16), which were determined experimentally. Considering that water is continuously removed from the yacon foam during drying, the product's chemical composition was updated along process time and the properties could be computed as a function of moisture content.

$$\rho = \frac{1-\varepsilon}{\sum_j \frac{x_j}{\rho_j}} \quad (14)$$

$$Cp = \sum_j (x_j Cp_j) \quad (15)$$

$$k = \frac{1}{2} \left[\sum_j x_{vj} k_j + \frac{1}{\sum_j \left(\frac{x_{vj}}{k_j} \right)} \right] \quad (16)$$

where x_j and x_{vj} are the mass and volumetric fractions, respectively, of each pure component of the yacon and ovoalbumine foam and ε is the porosity (mass fraction of air) of the foam (0.819).

The product's thermal diffusivity was computed by the following correlation:

$$\alpha = \frac{k}{\rho Cp} \quad (17)$$

The coefficients of convective heat and mass transfer, h and h_m , respectively, were obtained according to Holman (1996) (Equations 18 and 19) using the dimensionless numbers given by Equations 20 to 23 (Incropera and Dewitt, 1990):

$$h = \frac{Nu \times k_\infty}{d} \quad (18)$$

$$h_m = \frac{Sh \times D_{AB}}{d} \quad (19)$$

$$Re = \frac{\rho_\infty \times v_\infty}{\mu_\infty} \quad (20)$$

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (21)$$

$$Sc = \frac{\mu_\infty}{\rho_\infty \times D_{AB}} \quad (22)$$

$$Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (23)$$

where Re , Nu , Sh and Sc are the dimensionless numbers of Reynolds, Nusselt, Sherwood and Schmidt, respectively, ρ_∞ , v_∞ , μ_∞ and k_∞ are the density (kg/m³), velocity (m/s), viscosity (Pa·s)

and thermal conductivity of air (W/m·K), respectively, D_{AB} is the binary diffusion coefficient (water-air) and d is the bed's characteristic length (m), which depends on the surface at which the convective fluxes take place.

The mass diffusion coefficient was calculated using the analytical solution of Fick's second law for a flat plate (Crank, 1975):

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} e^{-\left(\frac{D_{if}\pi^2 t}{4\tau^2}\right)} \quad (24)$$

where D_{if} is the mass diffusion coefficient (m²/s), t is the drying time (s), MR is the dimensionless moisture content as a function of time, M_t is the moisture content at time t (kg/kg), M_{eq} is the equilibrium moisture content (kg/kg), M_0 is the initial moisture content (kg/kg) and τ is the product thickness (m).

One among all 10 experimental tests was randomly selected in order to perform the computer simulations: 1.0 cm, 60°C, YJ. The physical validation of the model was conducted by comparing experimental and numerical outcomes of average moisture content for the case selected. Afterwards, the numerical validation was assessed by confronting numerical data obtained by different meshes. The default mesh was refined twice, yielding three meshings. The results were considered satisfactory when a determination coefficient (R^2) higher than 0.98 was achieved for both validations, physical and numerical.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 DRYING KINETICS

The drying curves for the foams of YJ and CYJ are shown in Figure 4. The data are presented in the form of moisture ratio versus time. The process occurred at a falling rate period, which indicates diffusion as the most likely physical mechanism to govern the movement of moisture through the structure of the product (McMinn and Magee, 1999). The drying rate, nonetheless, is limited by the moisture evaporation from the surface of the foam to the hot air, as indicated by the dimensionless numbers of heat and mass transfer (Table 3). As indicated by the Sherwood number (Sh), the mass convective flow is predominant with respect to moisture diffusion and obviously

depends on the air temperature and not on the thickness or concentration of the foam. Inasmuch as the foam has a high porosity ($\varepsilon = 81.9\%$), it was expected that the internal migration of moisture was slower than its evaporation into the airflow. The Nusselt number (Nu) confirms that the convective heat transfer is greater than thermal diffusion since the air velocity is high (4 m/s) as well as the porosity of the food, which hinders heat conduction.

Table 3 - Transport coefficients and dimensionless numbers of heat and mass transfer.

The lack of a drying period at a constant rate may be ascribed to the nature of the moisture in the foam: the free surface water may be present in the form of suspension and solution (sugars and other molecules), with a vapor pressure below that of the pure water. The same behavior was observed for the foam mat drying of bananas (Thuwapanichayanan et al., 2008).

As expected, drying time was shorter when higher temperatures were applied, behavior caused by the increased drying rate in view of the greater temperature gradient between air and foam (Akpınar et al., 2003). Such effect of temperature on the foam mat drying was observed by Azizpour et al (2014) as regard to shrimps and by other authors (Erenturk et al., 2004; Doymaz, 2006; Goyal et al, 2007) who studied the thin layer drying of foods.

Another factor that substantially influenced drying time was the thickness of the foam layer. Process time was reduced from 315 min (YJ, 1.5 cm and 50°C) to 150 min when thickness was changed to 0.5 cm. In turn, for the CYJ, drying time was reduced in 180 min and 225 min when thickness ranged from 1.5 to 0.5 cm at 50°C and 70°C, respectively. Similar results were reported for the foam mat drying of mangoes (Rajkumar et al., 2007), tamarindo (Vernon-Carter et al., 2001) and papaya (Kandasamy et al. 2012). The increased thickness reduces the moisture diffusion rate due to the longer path that moisture has to overcome to reach the product's surface. In addition, heat transfer is more efficient at lower thicknesses as the faster heat penetration induces moisture diffusion to begin in a shorter time (Djaeni et al., 2013).

Figure 2 - Drying curves for the foams of (a) yacon juice and (b) yacon concentrate juice at different air temperatures and layer thicknesses.

The concentration of soluble solids of the yacon juice influenced the process kinetics only by a small difference in drying time (Fig. 3). The process time at 50°C was the same (120 min) for both foams (YJ and CYJ) for a thickness of 0.5 cm; for a thickness of 1.5 cm, in turn, the CYJ foam took 30 min less (300 min versus 270 min) to achieve the desired A_w compared with that formulated with YJ. For the central point of the experiment (1.0 cm, 60°C), the time to reach the ideal A_w was the same for both foams (120 min), as shown in Figure 3b. For the higher drying temperature applied in this work (Fig. 3c), the foams produced from CYJ and YJ required 60 min and 285 min, respectively, to achieve the desired A_w . This difference can be attributed to the composition of the foams and its influence on the mechanical stability during drying (Kudra and Ratti, 2006). In addition, the solids dissolved in the foam hinder the movement of moisture, mainly by diffusion and capillarity, reducing the drying rate.

Figure 3 - Comparison of drying curves for the foams produced with yacon juice and concentrate juice (CONC) at: (a) 50°C, (b) 60°C and (c) 70°C.

3.2 INFLUENCE OF PROCESS VARIABLES ON THE CHARACTERISTICS OF THE JUICE POWDER

The drying time required to achieve an A_w between 0.1 and 0.3 was selected as the final process point. According to Singh and Heldman (1993), the degradative reactions in foods, such as oxidation of fats, browning and microbiological growth, are minimized in this range of A_w . Table 4 presents the mean scores and their respective standard deviations for the moisture content and A_w of the yacon dried powder stored under vacuum, as well as the correspondent drying time.

Table 4 - Average results of the experimental tests to obtain yacon powder with A_w between 0.1 and 0.3.

From Table 4, it is clear that the drying temperature and thickness of the foam layer influenced process time and moisture content and A_w of the dry powder obtained. These outcomes also suggest that this influence occurs at the same way for both juice concentrations, 8°Brix (YJ) and 24°Brix (CYJ). To confirm these observations, Pareto

charts were plotted for the powders produced from the foams of YJ (Fig. 4) and CYJ (Fig. 5). These graphs illustrate the statistical effect ($p < 0.5$) of the independent variables on the responses y_1 , y_2 and y_3 .

Figure 4 indicates that all responses of the process are influenced both by the thickness of the foam layer and the drying temperature when the powder is formulated with non-concentrate juice of yacon (YJ). As expected, process time increases for larger thicknesses, as well as the final moisture and A_w . Instead, the temperature had a negative effect on all responses, i.e., the higher the drying temperature, the lower the moisture and A_w . Furthermore, the statistical analysis shows that the thickness exerts more influence than temperature on drying time (Fig. 4a) as a result of the mechanism of heat and mass transfer prevailing inside the foam, diffusion. The air temperature, in turn, exerts more influence than thickness on final moisture content and A_w . The same conclusions were found for the foam prepared with CYJ (Fig. 5).

Figure 4 - Pareto charts of the effects of process variables on yacon foams prepared from YJ at a 95% confidence interval: (a) Drying time (min); (b) Moisture content w.b. (%); (c) A_w . (Note: Var1=Thickness; Var2=Temperature).

Figure 5 - Pareto charts of the effects of process variables on yacon foams prepared from CYJ at a 95% confidence interval: (a) Drying time (min); (b) Moisture content w.b. (%); (c) A_w . (Note: Var1=Thickness; Var2=Temperature).

In summary, drying temperature and layer thickness influenced statistically the process responses - time, moisture content and A_w - for both foam formulations (YJ and CYJ). Thus, in order to minimize time and energy demand, it would be obvious to choose combinations of factors (x_1 and x_2) which provide a powder of lower A_w in a shorter time. However, an important factor to be also analyzed is the color of the product, which influences the sensory acceptance. Yacon is rich in enzymes such as polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD), which use the amino acid L-tryptophan, tannins and phenolic compounds, particularly chlorogenic acid, as substrates. During drying, temperature stimulates the activity of PPO and POD, promoting the enzymatic oxidation of phenolic compounds to quinones, resulting in brown or black pigments after polymerization (Valentová and Ulrichová, 2003). Although sodium metabisulphite has been added to the yacon juice, it minimizes but

not completely prevent the enzymatic activity. Thus, it is not enough to find a combination of factors that includes the higher temperature and the smaller foam's thickness: it is mandatory to correlate the outcomes of time, moisture content and A_w with important qualitative parameters, such as color. Furthermore, the enzyme activity consumes substrates, leading to a reduction of nutritional value of the processed yacon depending on drying temperature.

From a visual investigation, it was found that the drying conditions which generated darker powders were those that combined higher temperatures and thicker layers of foam. During drying of carambola juice, Karim and Wai (1999) observed that the dry foams treated at 90°C yielded darker products than the ones dried at 70°C. Kandasamy and collaborators (2012) also addressed the effect of high foam mat drying temperatures in the degradation of the color of papaya juices.

3.3 DRYING MODELING

The heat and mass transfer phenomena during drying of the foams were mathematically modeled and then simulated in COMSOL Multiphysics®. The comparison between numerical results for the moisture content of a test selected randomly (60°C, 1 cm, YJ) and the experimental data shows that the model predicts drying successfully. Figure 6 shows the confrontation between experimental and numerical outcomes of average moisture content of the foam, for which a high coefficient of determination was obtained ($R^2 = 0.998$).

Figure 6 - Average moisture content of the yacon foam during drying at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ: numerical versus experimental results.

Figures 7 and 8, in turn, present the three-dimensional profiles of the foam's moisture content and temperature of the system formed by tray and foam, according to the simulation outcomes. Figure 7 shows that the moisture flow in the foam occurs toward the surface of the tray, as expected, since this is the only contact face between product and air. Within 156 min, the moisture was considerably reduced, nonetheless there was still a water concentration gradient, i.e., the product did not reach the equilibrium moisture content. The model also described coherently the temperature profiles (Fig. 8). Whereas the thermal conductivity of the galvanized steel is very high,

the tray nearly reaches the air temperature in the first 10 min. The foam is heated by conduction – in view of the heat flow from the hot tray - and convection - due to the direct contact between product's surface and air. As a result of the evaporative cooling, the temperature of the foam, which had reached 54°C at its free surface after 60 min, suffers a small decrease until the end of drying, reaching a maximum temperature of 52°C.

Figure 7 - Moisture profiles of the yacon foam during drying at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ in: (a) 0 min, (b), 60 min (c) 156 min.

Figure 8 - Temperature profiles of the yacon foam during drying at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ in: (a) 0 min, (b), 10 min (c) 156 min.

Figure 9 illustrates the internal profiles of moisture and temperature of the product, whose numerical results are physically consistent. The bottom side of the metal mold is in direct contact with the dryer tray, so it is heated only by thermal diffusion. The four sides of the tray, in turn, are heated by convection for there is contact with the hot moving air. The heat flow received by the foam from the walls of the metallic bed raised the temperature of the food material. Meanwhile, the foam's surface received heat by convection from the hot air, but also lost thermal energy due to water evaporation, resulting in the thermal profile shown in Figure 9a. The maximum temperature reached by the foam in the end of drying is 52°C, on its surface. The metallic mold, in turn, reaches a temperature near that of the drying air. Moisture is conducted by diffusion towards the surface of the foam thanks to the temperature and water concentration gradients at the interface air-product. The water is removed from the foam across its surface, reason why there is a moisture gradient between base and the top of the bed (Fig. 9b). At the end of 156 min, when the A_w was decreased to the desired value, the product has not yet reached its limit moisture, since air was still drier (in terms of molar concentration of water) than the foam's surface.

c

Figure 9 - Internal profiles of (a) temperature and (b) moisture content after completion of drying (156 min) at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ.

These results confirm the possibility of using the proposed model for the prediction of the foam mat drying of yacon. Forasmuch as the model is based on a theoretical study as regard to the heat and mass transport mechanisms, it can be used to simulate other process conditions, namely the thickness and composition of the foam, temperature, velocity and relative humidity of the air, among others. A significant economy of experimental time and costs is ascribed to the predictive ability of such mathematical model.

4. CONCLUSIONS

As indicated by the drying curves of the yacon foams (YJ and CYJ), the process took place in a falling rate period, suggesting that diffusion is the governing mechanism of internal moisture movement. While the internal moisture movement occurs mainly by diffusion, the analysis of the transport coefficients indicated that the resistance to convection limits the drying rate.

The drying temperature and the thickness of the foam layers significantly influenced process time and the characteristics of the dry powder (A_w and moisture content). The combination of higher temperatures and lower thicknesses resulted in smaller drying times and powdered juices with lower moisture and A_w , which are characteristics desirable to the product.

The mathematical model proposed was capable of adequately predict the moisture and temperature profiles of the food material, serving as a useful tool for the process optimization.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Graduation Program of Food Engineering (PPGEAL) of the Federal University of Paraná and especially CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) for the assistance through the scholarship granted to the first two authors and the financial support to this research project.

REFERENCES

- Akpınar, E. K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99-104.
- Azizpour, M., Mohebbi, M., Khodaparast, M. H. H., & Varidi, M. (2014). Optimization of foam parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). *Drying Technology*, 32, 374-384.
- Bag, S. K., Srivastav, P. P., & Mishra, H. N. (2011). Optimization of process parameters for foaming of Bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. *Food and Bioprocess Technology*, 4(8), 1450-1458.
- Bernstein, A., & Noreña, C. P. Z. (2014). Study of thermodynamic, structural, and quality properties of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) during drying. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 148–160.
- Campos, D., Betalleluz-Pallardel, I., Chirinos, R., Aguilar-Galvez, A., Noratto, G., & Pedreschi, R. (2012). Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. *Food Chemistry*, 135, 1592–1599.
- Castro, A., Caballero, M., Herbas, A., & Carballo, S. (2012). Antioxidants in yacon products and effect of long term storage. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 32(3), 432-435.
- Chaves, M. A., Barreto, I. M. A., Reis, R. C., & Kadam, D. M. (2013). Physicochemical and sensory properties of purple Brazilian cherry (*Eugenia uniflora*, L.) foams. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 1688–1697.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. (2nd ed., pp. 414) New York: Oxford University Press, 1975.
- Djaeni, M., Prasetyaningrum, A., Sasongko, S. B., Widayat, W., & Hii, C. L. (2013). Application of foam-mat drying with egg white for carrageenan: drying rate and product quality aspects. *Journal of Food Science and Technology*, DOI 10.1007/s13197-013-1081-0.
- Doymaz, I. (2006). The thin layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74, 370-375.
- Erenturk, S., Gulaboglu, M. S., & Gultekin, M. S. (2004). The thin layer drying characteristics of rosehyp. *Biosystems Engineering*, 89(2), 159-166.
- Falade, K. O., Adeyanju, K. I., & Uzo-Peters, P. I. (2003). Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glyceryl monostearate and egg albumin as foaming agents. *European Food Research and Technology*, 217, 486–491.

- Fernandes, R. V. B., Queiroz, F., Botrel, D. A., Rocha, V. V., Lima, C. F., & Souza, V. R. (2013). Foam mat drying of tomato pulp. *Bioscience Journal*, 29(4), 819-825.
- Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikanthan, M. R., & Ilyas, S. M. (2007). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79, 176-180.
- Graefe, S., Hermann, M., Manrique, I., Golombek, S., & Buerkert, A. (2004). Effects of post-harvest treatment on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. *Field Crops Research*, (86), 157–165.
- Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (1990). *Fundamentals of heat and mass transfer*. (3rd ed., pp. 696). New York: J. Wiley & Sons.
- Kadam, D. M., & Balasubramanian, S. (2011). Foam mat drying of tomato juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 488-495.
- Kadam, D. M., Wilson, R. A., & Kaur, S. (2010). Determination of biochemical properties of foam-mat dried mango powder. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1626-1632.
- Kadam, D. M., Wilson, R. A., Kaur, V., Chadha, S., Kaushik, P., Kaur, S., Patil, R. T., & Rai, D. R. (2012). Physicochemical and microbial quality evaluation of foam-mat-dried pineapple powder. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, 1654–1659.
- Kandasamy, P., Varadharaju, N., Kalemullah, S., & Moitra, R. (2012). Production of papaya powder under foam-mat drying using methyl cellulose as foaming agent. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 5(5), 374-387.
- Karim, A. A., & Wai, C. C. (1999). Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree. Stability and air drying characteristics. *Food Chemistry*, 64, 337-343.
- Kotovicz, V., Ellendersen, L. S. N., Clarindo, M. M., & Masson, M. L. (2014). Influence of process conditions on the kinetics of the osmotic dehydration of yacon (*Polymnia sonchifolia*) in fructose solution. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3), 1385-1397.
- Krasaekoopt, W., & Bhatia, S. (2012). Production of yogurt powder using foam-mat drying. *AU Journal of Technology*, 15(3), 166-171.
- Lachman, J., Fernandez, E. C., & Orsák, M. (2003). Yacon [*Smallanthus sonchifolia* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] chemical composition and use - a review. *Plant Soil Environment*, 49, 283–290.

- Lago, C. C., Bernstein, A., Brandelli, A., & Noreña, C. Z. (2012). Characterization of powdered yacon (*Smallanthus sonchifolius*) juice and pulp. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2183–2191.
- Lomakina, K., & Míková, K. A. (2006). A Study of the factors affecting the foaming properties of egg white – a review. *Czech Journal of Food Science*, 24, 110–118.
- Maia, G. A., Monteiro, J. C. S., & Guimarães, A. C. L. (2001). Estudo da estabilidade físico-química e química do suco de caju com alto teor de polpa. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 21(1), 43-46.
- Maldonado, S., Santapaola, J. E., Singh, J., Torrez, M., & Garay, A. (2008). Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(1), 251-256.
- Manrique, I., & Párraga, A. (2005). *Conservación y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos Andinos: Una década de investigación para el desarrollo (1993-2003). Jarabe de yacón: principios y procesamiento*. (1st ed., pp.40-79). Centro Internacional de La Papa, Peru.
- McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (1999). Principles, methods and applications of the convective drying of food stuffs. *Trans IChemE*, 77, 175-193.
- Mentreddy, S. R. (2007). Review – Medicinal plant species with potential antidiabetic properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, 743-750.
- Muthukumaran, A., Ratti, C., & Raghavan V. G. S. (2008). Foam-mat freeze drying of egg white – mathematical modeling part II: freeze drying and modeling. *Drying Technology*, 26, 513-518.
- Ojansivu, I., Ferreira, C. L., & Salminen, S. (2011). Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history safe of use. *Trends in Food Science and Technology*, 22, 40-46.
- Perussello, C. A., Kumar, C., Castilhos, F., & Karim, M. A. (2014). Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). *Applied Thermal Engineering*, 63, 23-32.
- Prasetyaningrum, A., & Djaeni, M. (2012). Drying spirulina with foam mat drying at medium temperature. *International Journal of Science and Engineering*, 3(2).
- Raharitsifa, N., Genovese, D. B., & Ratti, C. (2006). Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of Food Science*, 71(3), E142-E151.

- Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G. S. V. (2007). Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *Journal of Food Engineering*, 79, 1452-1459.
- Ratti, C., & Kudra, T. (2006). Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. *Drying Technology*, 24, 1101-1108.
- Reis, F. R., Lenzi, M. K., & Masson, M. L. (2012). Effect of vacuum drying conditions on the quality of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices: process optimization toward color quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36, 67–73.
- Rodrigues, M. I., & Iemma, A. F. (2005). *Planejamento de experimentos e otimização de processos. Uma estratégia sequencial de planejamentos*. (1st ed., pp. 105-106). Editora Casa do Pão: Itaquaquecetuba.
- Scher, C. F., Rios, A. O., & Noreña, C. P. (2009). Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 2169-2175.
- Seminario, J., Valderrama, M., & Manrique, I. (2003). *El yacón: fundamentos para el aprovechamiento de um recurso promissório*. (1st ed., pp.13-115). Centro Internacional de la Papa, Lima.
- Shi, Q., Zheng, Y., & Zhao, Y. (2013). Mathematical modeling of thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. *Energy Conversion and Management*, 71, 208-216.
- Singh, P. R., & Heldman, D. R. (1993). *Introduction to food engineering*. (2nd ed., pp-115-135). Academic Press, New York.
- Takanaka, M., Yan, X., Ono, H., Yoshida, M., Nagata, T., & Nakanishi, T. (2003). Caffeic acid derivatives in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 793-796.
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., & Soponromarit, S. (2008). Drying characteristics and quality of banana foam-mat. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 573-583.
- Valentová, K., Stejskal, D., Bartek, J., Dvoracková, S., Kren, V., Ulrichová, J., & Simánek, V. (2008). Maca (*Lepidium meyenii*) and yacon (*Smallanthus sonchifolius*) in combination with silymarin as food supplements: In vivo safety assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 46, 1006-1013.

- Valentová, K., & Ulrichová, J. (2003). *Smallanthus sonchifolius* and *Lepidium meyenii* – prospective Andean crops for the prevention of chronic diseases. *Biomedical Papers*, 147(2), 119-130.
- Vasconcelos, C. M., Silva, C. O., Teixeira, L. J. Q., Chaves, J. B. P., & Martino, H. S. D. (2010). Determination of the soluble dietary fiber fraction in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) root and flour by enzymatic-gravimetric method and high pressure liquid chromatography. *Revista Instituto Adolfo Lutz*, 69(2), 188-93.
- Vernon-Carter, E. J., Espinosa-Paredes, G., Beristain, C. I., & Romero-Tehuizil, H. (2001). Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavour retention of tamarindo foam-mats. *Food Research International*, 34, 587-598.
- Wiecheteck, F. V., Nogueira, A., Drilleau, J. F., Wosiacki, G. (2005). Effect of cryoconcentration in total phenolic compounds of industrial apple must. *Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias*, 11(1), 27-34.
- Yan, X., Suzuki, M., Ohnishi-Kameyama, M., Sada, Y., Nakanishi, T., & Nagata, T. (1999). Extraction and identification of antioxidants in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 4711-4713.

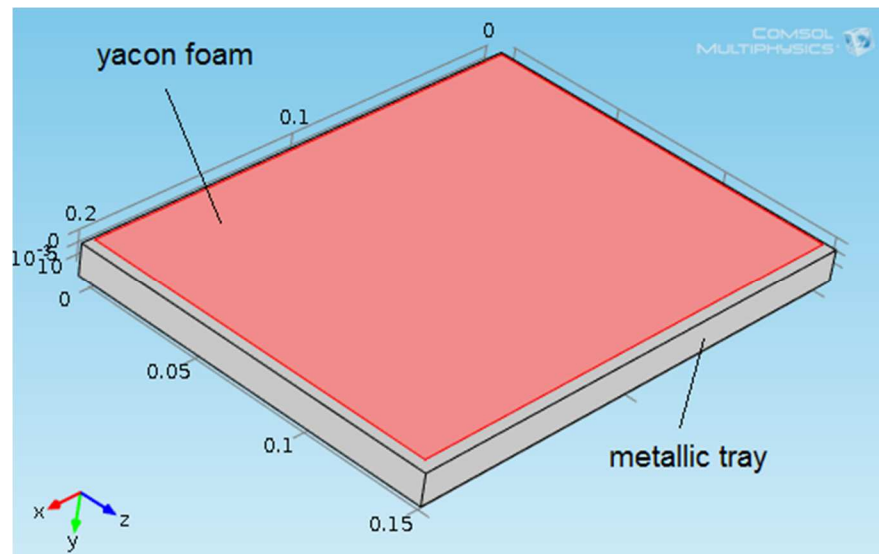
LIST OF FIGURES

Figure 1 – Computational domain (Note: thickness may assume three different values depending on the experimental test).

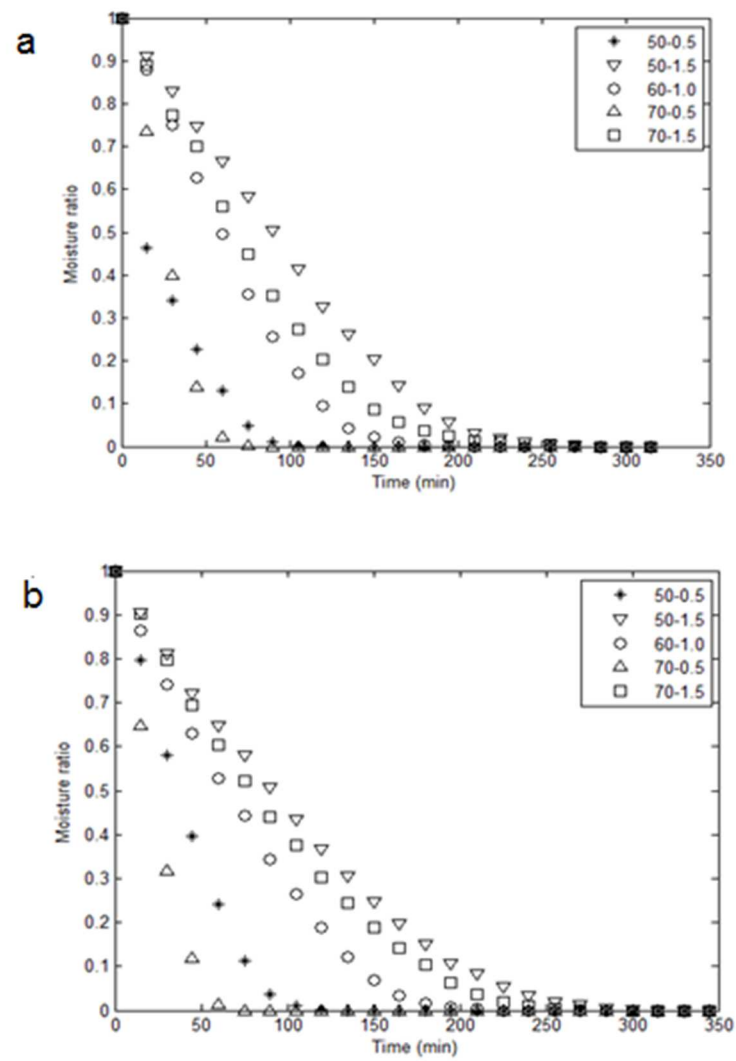


Figure 2 - Drying curves for the foams of (a) yacon juice and (b) yacon concentrate juice at different air temperatures and layer thicknesses.

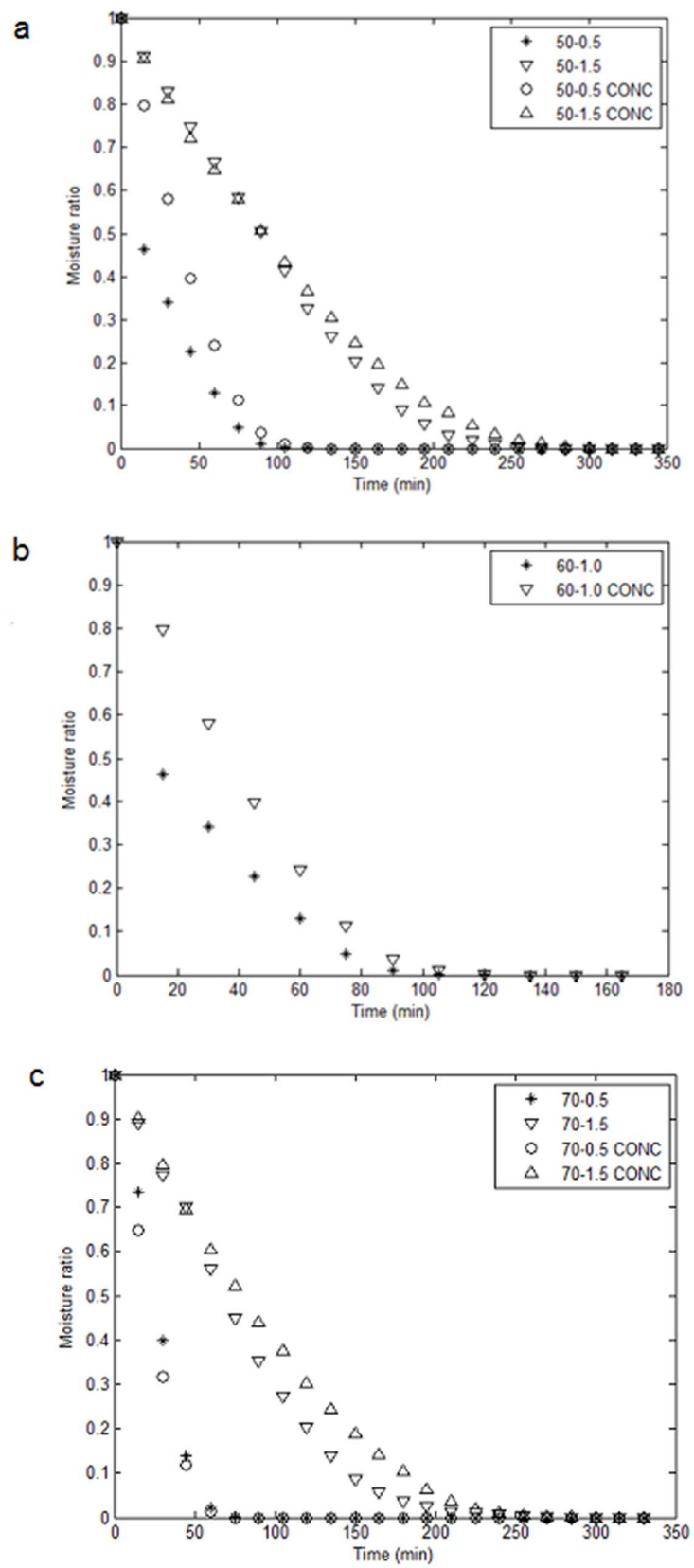


Figure 3 - Comparison of drying curves of the foam produced with yacon juice and concentrate juice (CONC) at: (a) 50°C, (b) 60°C and (c) 70°C.

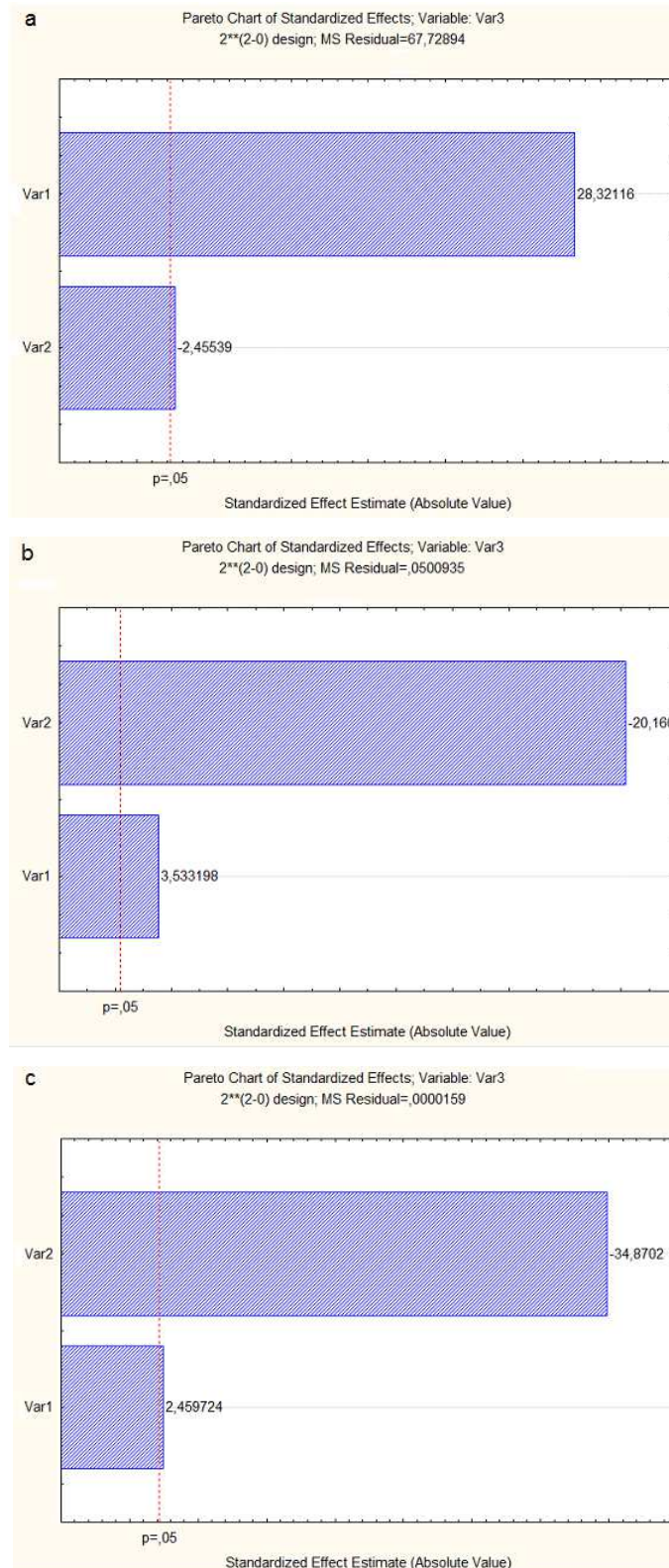


Figure 4 - Pareto charts of the effects of process variables on yacon foams prepared from YJ at a 95% confidence interval: (a) Drying time (min); (b) Moisture content w.b. (%); (c) Aw. (Note: Var1=Thickness; Var2=Temperature)

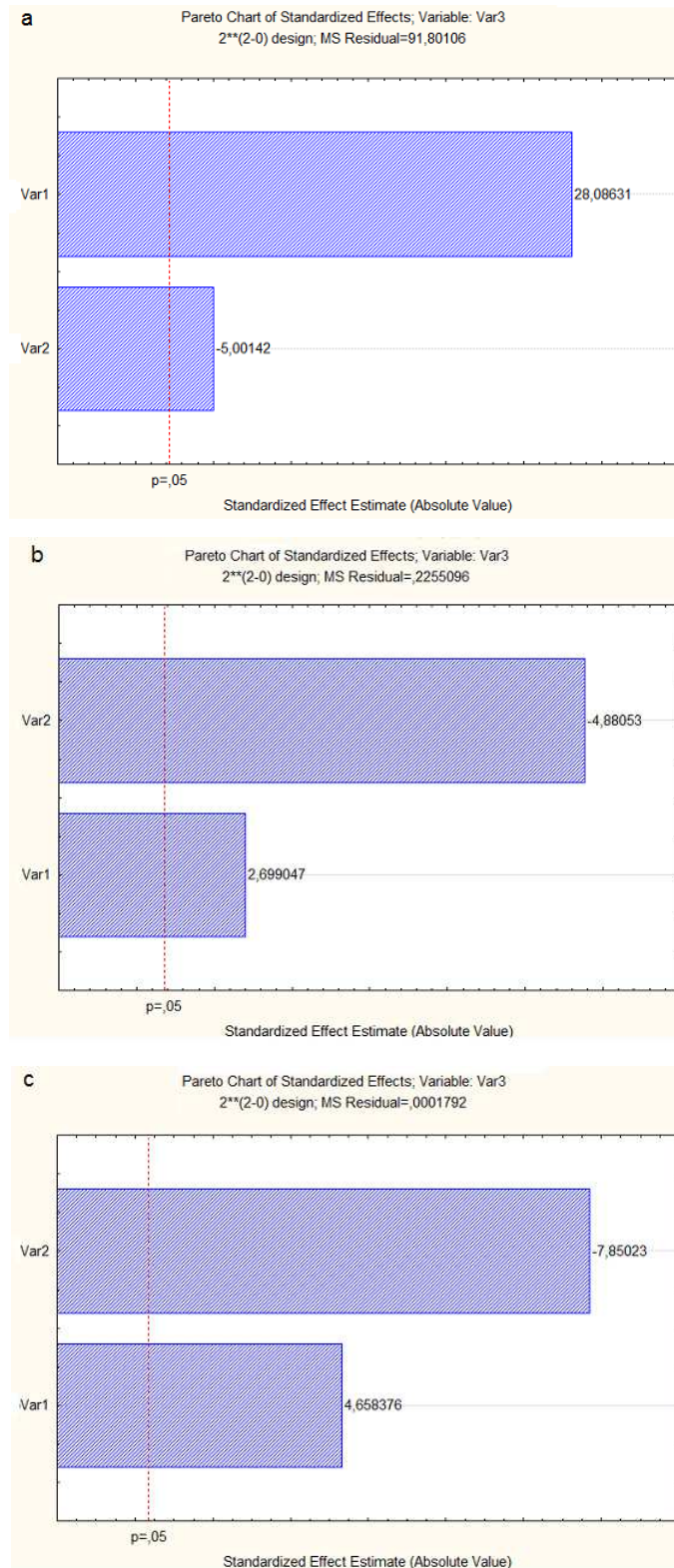


Figure 5 - Pareto charts of the effects of process variables on yacon foams prepared from CYJ at a 95% confidence interval: (a) Drying time (min); (b) Moisture content w.b. (%); (c) Aw. (Note: Var1=Thickness; Var2=Temperature)

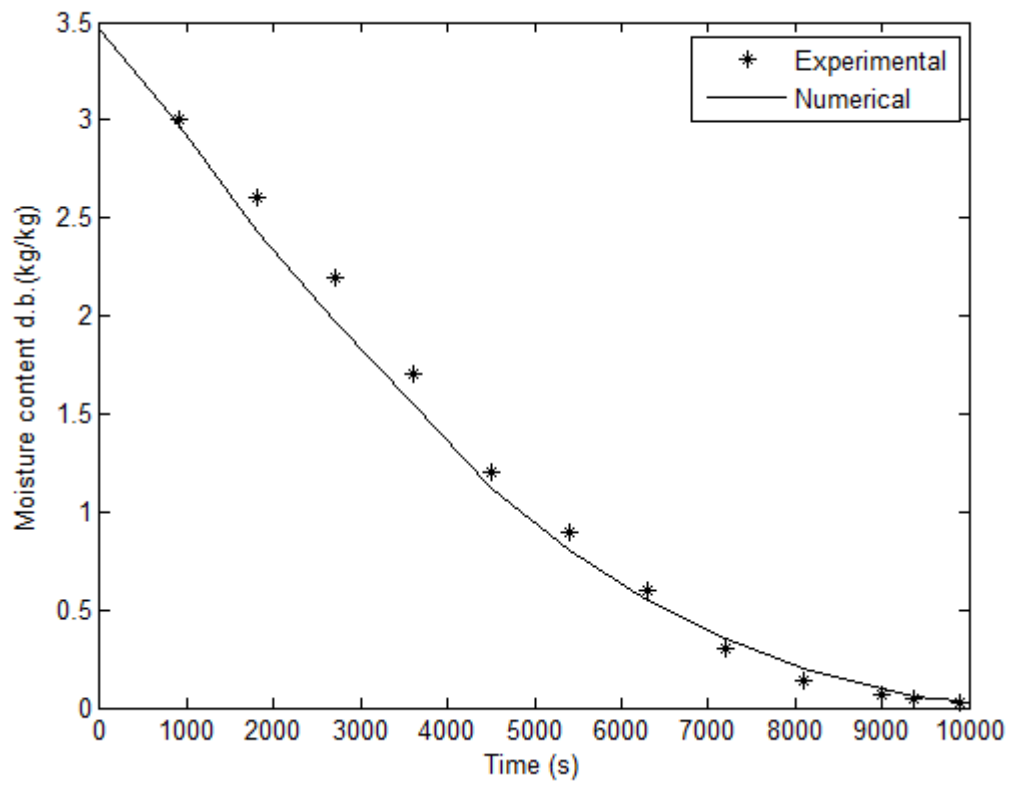


Figure 6 - Average moisture content of the yacon foam during drying at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ: numerical versus experimental results.

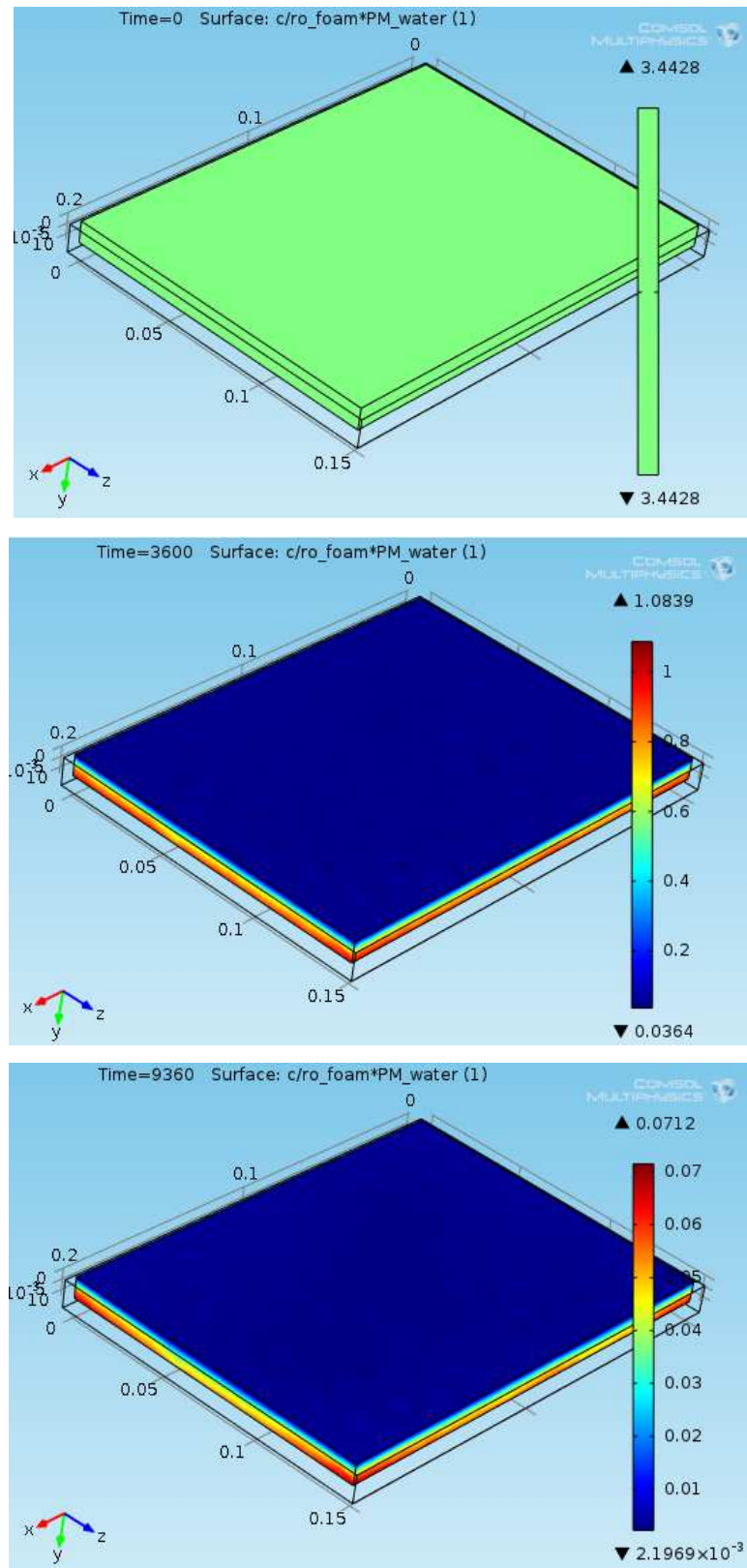


Figure 7 - Moisture profiles of the yacon foam during drying at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ in: (a) 0 min, (b) 60 min (c) 156 min.

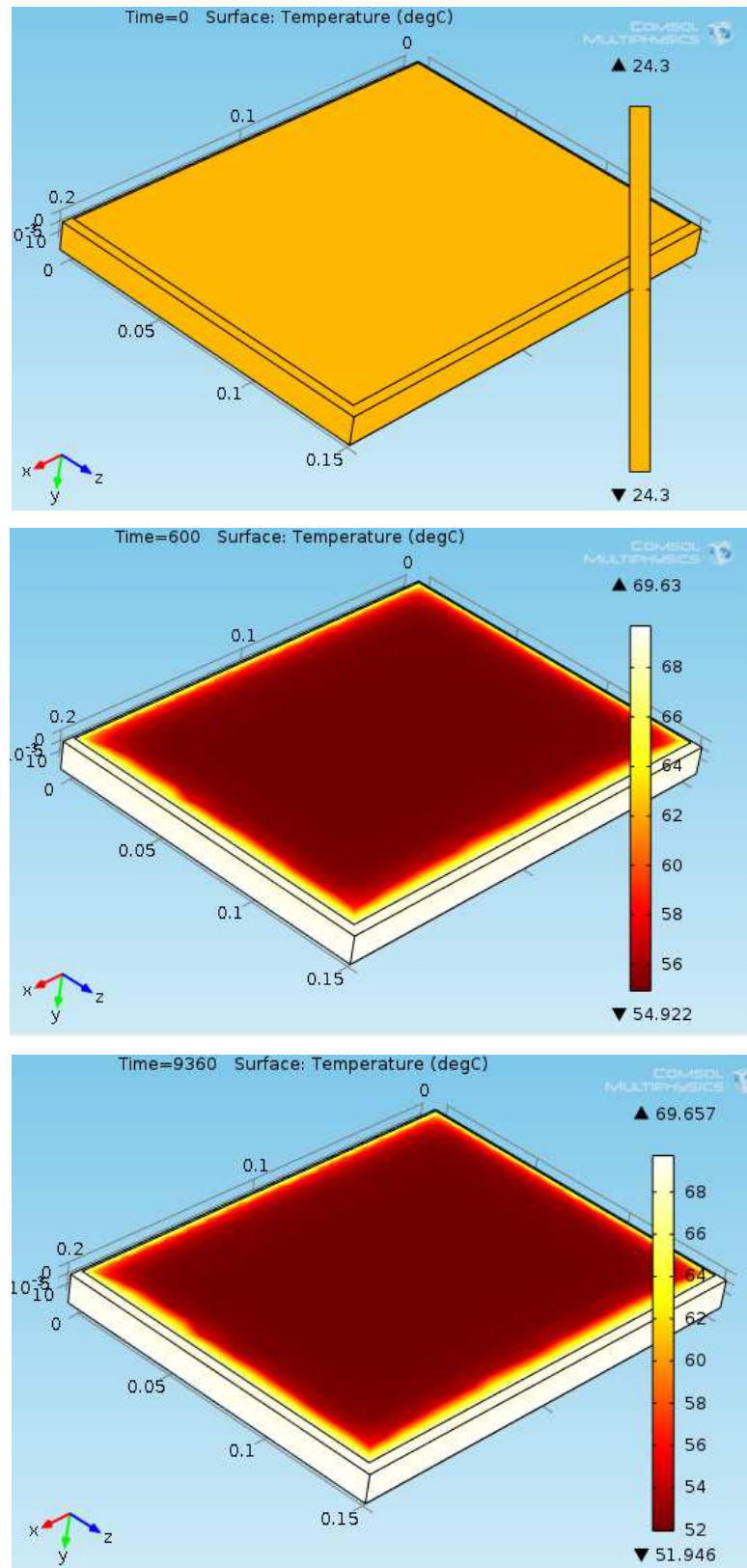


Figure 8 - Temperature profiles of the yacon foam during drying at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ in: (a) 0 min, (b), 10 min (c) 156 min.

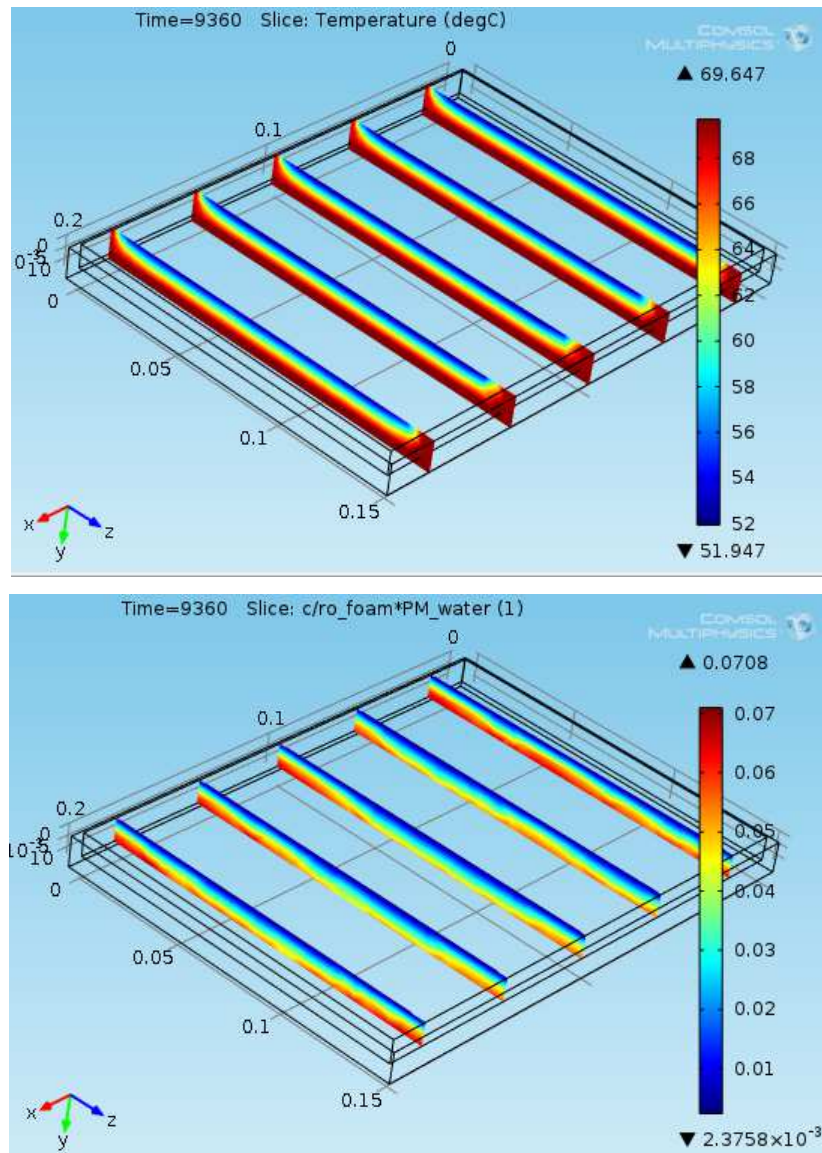


Figure 9 - Internal profiles of (a) temperature and (b) moisture content after completion of drying (156 min) at the condition of 1.0 cm, 60°C, YJ.

LIST OF TABLES

Table 1 – Sketch of the experimental design.

Variable	Variable code	Level		
		-1	0	+1
Thickness (cm)	x1	0.5	1.0	1.5
Temperature (°C)	x2	50	60	70

Table 2 – Experimental tests resulted from the factorial design.

Test	Yacon juice*	x_1 (cm)	x_2 (°C)
1	YJ	0.5	50
2	YJ	1.5	50
3	YJ	1.0	60
4	YJ	0.5	70
5	YJ	1.5	70
6	CYJ	0.5	50
7	CYJ	1.5	50
8	CYJ	1.0	60
9	CYJ	0.5	70
10	CYJ	1.5	70

*YC = non-concentrate yacon juice (8°Brix), CYJ = concentrate yacon juice (24°Brix).

Table 3 - Transport coefficients and dimensionless numbers of heat and mass transfer.

Test	Process conditions*	Sh^1	Nu^2	h (W/m.K) ³	h_m (m/s) ⁴	Def (m ² /s) ⁵
1	YJ – 0.5 cm, 50°C	18.5	19.4	108.6	0.113	7.78e-9
2	YJ – 1.5 cm, 50°C	32.0	33.6	62.7	0.065	2.43e-8
3	YJ – 1.0 cm, 60°C	25.5	26.9	77.2	0.082	1.70e-8
4	YJ – 0.5 cm, 70°C	17.8	18.6	109.5	0.117	1.04e-8
5	YJ – 1.5 cm, 70°C	30.8	32.2	63.2	0.067	3.07e-8
6	CYJ – 0.5 cm, 50°C	18.5	19.4	108.6	0.113	2.48e-8
7	CYJ – 1.5 cm, 50°C	32.0	33.6	62.7	0.065	2.0e-8
8	CYJ – 1.0 cm, 60°C	25.5	26.9	77.2	0.082	1.44e-8
9	CYJ – 0.5 cm, 70°C	17.8	18.6	109.5	0.117	1.42e-8
10	CYJ – 1.5 cm, 70°C	30.8	32.2	63.2	0.067	2.54e-8

1 - Sherwood number; 2- Nusselt number; 3 - Convective heat transfer coefficient (evaluated at the foam's surface, where the moisture evaporation takes place); 4- Convective mass transfer coefficient; 5- Mass diffusion coefficient. *YC = non-concentrate yacon juice (8°Brix), CYJ = concentrate yacon juice (24°Brix).

Table 4 - Average results of the experimental tests to obtain yacon powder with A_w between 0.1 and 0.3.

Test	Process conditions*	Time (min)	Moisture contente w.b. (%)	A_w
1	YJ – 0.5 cm, 50°C	89±0	6.2±0.3	0.19±0.01
2	YJ – 1.5 cm, 50°C	211±0	6.6±0.1	0.19±0.00
3	YJ – 1.0 cm, 60°C	156±0	5.5±0.1	0.15±0.00
4	YJ – 0.5 cm, 70°C	65±0	3.5±0.0	0.11±0.00
5	YJ – 1.5 cm, 70°C	211±1	4.1±0.1	0.12±0.00
6	CYJ – 0.5 cm, 50°C	96±1	4.9±0.2	0.20±0.00
7	CYJ – 1.5 cm, 50°C	242±0	6.2±0.1	0.22±0.00
8	CYJ – 1.0 cm, 60°C	174±0	5.7±0.1	0.21±0.00
9	CYJ – 0.5 cm, 70°C	59±0	4.1±0.1	0.13±0.00
10	CYJ – 1.5 cm, 70°C	224±1	4.3±0.2	0.17±0.00

*YC = non-concentrate yacon juice (8°Brix), CYJ = concentrate yacon juice (24°Brix).

ANEXOS

**ANEXO I – TABELA COM INGREDIENTES E INFORMAÇÃO NUTRICIONAL DO
AGENTE EMULSIFICANTE**

Emustab Selecta
Emulsificante e Estabilizante Neutro

EMUSTAB EMULSIFICANTE 1KG

Ingredientes: Água, estabilizantes: monoglicerídeos de ácidos graxos destilados e sal de ácidos graxos e emulsificantes: monoestearato de sarbitana e monoestearato de sarbina polioxietileno.

NÃO CONTÉM GLÚTEN

INFORMAÇÃO NUTRICIONAL

Porção de 10g (1 colher de chá)

	Quantidade por porção	% VD (*)
Valor Energético	27 kcal - 115kJ	1%
Carboidratos	1,6g	0%
Proteínas	0%	0%
Gorduras Totais	2,3g	4%
Gorduras Saturadas	2,0g	9%
Gorduras Trans	0g	---
Fibra Alimentar	0g	0%
Sódio	0mg	0%

*Valores Diários de referência com base em uma dieta de 2.000 kcal ou 8400kJ. Seus valores diários podem ser maiores ou menores dependendo de suas necessidades energéticas.

**ANEXO II – TABELA COM CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E
MICROBIOLÓGICAS DA OVOALBUMINA**



Características Físico -Químicas

Umidade (% máximo)	8,0
pH	6,0 - 8,0
Proteínas (% mínimo)	78,0
Gorduras (% máximo)	0,35
Cinzas (% máximo)	6,0
Validade do Produto (shelf life)	12 meses

Características Microbiológicas:

Contagem Total Padrão (SPC) (máximo)	5.000 col\g
Coliformes Totais (NMP\g) (máximo)	10\g
Coliformes Fecais (NMP\g)	negativo \g
Escherichia Coli	negativo \g
Staphylococcus Aureus	negativo \g
Salmonellas	negativo \25g
Fungos e Leveduras (máximo)	100 \g