



**KAMILLA SOARES DE MENDONÇA**

**OTIMIZAÇÃO DA DESIDRATAÇÃO  
OSMÓTICA DE FATIAS DE YACON ASSISTIDA  
POR ULTRASSOM**

**LAVRAS - MG**

**2014**

**KAMILLA SOARES DE MENDONÇA**

**OTIMIZAÇÃO DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE FATIAS DE  
YACON ASSISTIDA POR ULTRASSOM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Coorientador

Dr. Michel Cardoso de Angelis Pereira

**LAVRAS - MG**

**2014**

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

Mendonça, Kamilla Soares de.

Otimização da desidratação osmótica de fatias de yacon assistida por ultrassom / Kamilla Soares de Mendonça. – Lavras : UFLA, 2014.

137 p. : il.

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

Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Bibliografia.

1. *Smallanthus sonchifolius*. 2. Desidratação osmótica assistida por ultrassom. 3. Frutooligossacarídeos. 4. Polióis. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 583.55

**KAMILLA SOARES DE MENDONÇA**

**OTIMIZAÇÃO DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE FATIAS DE  
YACON ASSISTIDA POR ULTRASSOM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 21 de fevereiro de 2014.

Dr. Javier Telis Romero

UNESP

Dr. Marcelo Ângelo Cirillo

UFLA

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Orientador

Dr. Michel Cardoso de Angelis Pereira

Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2014**

*Aos meus pais, Graça e Francisco, que sempre abraçaram os meus sonhos.*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao professor e amigo Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa, o meu muitíssimo obrigada, pela sua dedicação na orientação deste trabalho, presteza nos ensinamentos, confiança, paciência e apoio em cada etapa.

Ao professor e amigo Dr. Michel Cardoso de Angelis Pereira pela sua grande contribuição para o desenvolvimento deste trabalho, agradeço imensamente pelos seus ensinamentos.

À banca examinadora, Dr. Javier Telis Romero e Dr. Marcelo Ângelo Cirillo, pelo valioso intercâmbio de ideias e pela atenção com o trabalho.

A todos os professores do Departamento de Ciência dos Alimentos, em especial aos professores Alcinéia de Lemos Souza Ramos, Eduardo Mendes Ramos, Eduardo Valério Barros Vilas Boas, Fabiana Queiroz, Jaime Vilela de Resende, José Guilherme Lembi Ferreira Alves e Luiz Carlos de Oliveira Lima que contribuíram de alguma forma para esse trabalho.

Aos meus pais, Francisco e Maria das Graças, pelo amor, apoio, compreensão e paciência durante todo esse período, mesmo à distância. Aos meus irmãos, Rodolpho e Matheus pela força e amizade, imprescindíveis sempre.

Ao meu namorado Lucas Pinto Botelho por estar sempre ao meu lado, pelo amor, companheirismo e paciência, sendo a base forte dos meus dias.

Às amigas e companheiras Cibelle Souza e Deise Perígolo pela parceria e por todos os bons momentos compartilhados, que amenizaram a distância e a saudade da família.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia de Alimentos, Arianne Viana, Bruno Fonseca, Francemir Lopes, Gustavo Pathelly, João Renato de Jesus, Letícia Almeida, Letícia de Oliveira, Marina Vilela e Marina Sousa pela parceria e amizade.

Aos amigos da 10ª Turma de Engenharia de Alimentos e aos amigos do Programa de Pós-Graduação.

À UFLA e ao DCA pela estrutura disponibilizada para a realização deste trabalho e aos colaboradores pelo apoio, amizade e boa vontade sempre que solicitados durante a realização das análises, em especial à Tina, à Cleusa, à Lucilene, à Adriana e à Raimá.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de estudos.

À FAPEMIG pelo financiamento do projeto.

## RESUMO GERAL

O presente trabalho foi elaborado com o objetivo de se estudar o comportamento de fatias de yacon em processos de desidratação osmótica (DO) utilizando-se polióis, com e sem o emprego de ultrassom. A análise das curvas de cinética de DO de fatias de yacon com xilitol, maltitol, eritritol, isomalte e sorbitol mostrou que o uso de sorbitol ou xilitol forneceu amostras com ganho de sólidos (GS) intermediários, maiores perda de água (PA), difusividades efetivas e redução da atividade de água ( $a_w$ ). Um experimento de desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU) foi desenvolvido segundo um delineamento central composto rotacional (DCCR). Foi montado um fatorial completo  $2^2$ , com 4 pontos axiais e 5 pontos centrais para cada agente osmótico avaliado (sorbitol e xilitol). Os fatores investigados foram o tempo de aplicação do ultrassom ( $t_{us}$ ) (0 a 40 minutos) e a concentração da solução (C.S.) (20 a 60 °B). A análise de variância mostrou que o  $t_{us}$  e a C.S. apresentaram efeito significativo no aumento da PA e do GS e na redução da retenção de frutanos (RFru) e atividade de água ( $a_w$ ), para ambos os agentes osmóticos. Os modelos gerados apresentaram bons ajustes. O  $t_{us}$  apresentou um importante efeito sobre a degradação dos frutanos. A função desejabilidade aplicada aos resultados forneceu pontos de desejabilidade aceitáveis e excelentes, tanto para os tratamentos com sorbitol (0 min; 60 °B) quanto com xilitol (2,67 min; 60 °B). A análise dos efeitos de o  $t_{us}$  e a C.S. sobre os parâmetros: teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST), volume proporcional ( $V/V_0$ ), parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ), variação total de cor ( $\Delta E$ ), tensão de ruptura ( $\sigma_{HF}$ ), deformação na ruptura ( $\epsilon_{HF}$ ) e módulo de elasticidade ( $E_d$ ) mostrou que houve efeito significativo sobre todas as variáveis respostas analisadas, ao menos sobre um dos agentes osmóticos empregados. A análise de variância dos modelos gerados mostrou que os dados se ajustaram bem ao modelo, exceto para a resposta de  $E_d$  com sorbitol. As condições otimizadas com o auxílio da função desejabilidade foram para tratamentos com sorbitol; 31,33 min de aplicação de ultrassom e 22,23 °B, e para tratamentos com xilitol; 29,33 min de aplicação de ultrassom e 27,33 °B. A análise dos valores preditos das variáveis respostas nas condições otimizadas de ambos os processos de otimização permitiu inferir que o sorbitol forneceu respostas mais adequadas para a DOAU de fatias de yacon.

Palavras-Chave: *Smallanthus sonchifolius*. Ultrassom. Frutooligossacarídeos. Polióis.

## GENERAL ABSTRACT

The present work was designed aiming to study, the behavior of yacon slices during osmotic dehydration (OD) processes using polyols, with and without the use of ultrasound. The analysis of the OD kinetic curves of yacon slices using xylitol, maltitol, erythritol, isomalt and sorbitol showed that the use of sorbitol or xylitol provided an intermediate solid gain (SG), higher water loss (WL), diffusivities effective and reduced water activity ( $a_w$ ) on samples. An osmotic dehydration assisted by ultrasound (ODAU) experiment was led according to a central composite design (CCD). A full factorial  $2^2$  was conducted with 4 axial points and 5 central points, for each osmotic agent analysed (sorbitol and xylitol). The investigated factors were the ultrasound application time ( $t_{us}$ ) (0 to 40 minutes) and the osmotic concentration (C.S.) (20 to 60 °B). The analysis of variance showed that the C.S. and  $t_{us}$  presented significant effect on increasing WL, SG and reducing fructan retention (FruR) and water activity ( $a_w$ ), for both osmotic agents. The models showed good adjustment. The  $t_{us}$  had an important effect on the degradation of fructans. The desirability function applied on results provided acceptable and excellent desirability points for both, the treatments with sorbitol (0 min; 60 °B) and xylitol (2,67 min; 60 °B). The C.S. and  $t_{us}$  effect analysis on parameters: moisture content ( $M_{db}$ ), total soluble solids content (TSS), proportional volume ( $V/V_0$ ), color parameters ( $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$ ), total color variation ( $\Delta E$ ), stress at rupture ( $\sigma_{HF}$ ), strain at rupture ( $\varepsilon_{HF}$ ) and deformability modulus ( $E_d$ ) demonstrated a significant effect on all response variables analysed, at least on one of osmotic agents employed. The analysis of variance showed that the models generated fitted well to the datas, except for the response of  $E_d$  with sorbitol. The optimized conditions with the aid of desirability function were, for treatments with sorbitol; 31,33 min of application of ultrasound and 22,23 °B, and for xylitol treatments; 29,33 min of application of ultrasound and 27,33 °B. The predicted values analysis of the response variable in the optimized conditions of both processes optimization showed that sorbitol provided more adequate responses to ODAU of yacon slices.

Keywords: *Smallanthus sonchifolius*. Ultrasound. Fructooligosaccharides. Polyols.



## LISTA DE TABELAS

### PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 Composição de tubérculos de yacon <i>in natura</i> .....	21
---	----

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

Table 1 Molecular weight of polyols used as osmotic agents and the water activity of their solutions at 40 °B .....	51
Table 2 Analysis of variance for the effective diffusion coefficients of water ( $D_{effw}$ ) and for solids ( $D_{effs}$ ) in yacon slices during osmotic dehydration with different osmotic agents .....	58

#### ARTIGO 2

Tabela 1a Delineamento central composto rotacional com valores experimentais e desvios padrões das variáveis resposta das fatias de yacon tratadas com sorbitol.....	73
Tabela 1b Delineamento central composto rotacional com valores experimentais e desvios padrões das variáveis resposta das fatias de yacon tratadas com xilitol .....	74
Tabela 2a Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis PA e GS observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom.....	83
Tabela 2b Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis RFru e $a_w$ observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom.....	83
Tabela 3 Análise de variância do modelo quadrático para fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom .....	84
Tabela 4 Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade .....	85
Tabela 5 Critérios de otimização da DOAU de fatias de yacon com sorbitol e com xilitol e soluções das condições ótimas .....	88

### ARTIGO 3

Tabela 1	Variáveis independentes estudadas na DOAU de fatias de yacon com soluções de sorbitol ou xilitol nas formas codificadas e reais e os respectivos níveis aplicados.....	104
Tabela 2a	Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta de teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) das fatias de yacon tratadas com sorbitol.....	110
Tabela 2b	Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta de teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) das fatias de yacon tratadas com xilitol.....	111
Tabela 3	Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom.....	112
Tabela 4	Análise de variância do modelo quadrático para teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) de fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom.....	112
Tabela 5a	Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta dos parâmetros de cor das fatias de yacon tratadas com sorbitol .....	119
Tabela 5b	Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta dos parâmetros de cor das fatias de yacon tratadas com xilitol .....	119
Tabela 6	Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis de parâmetros de cor observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom .....	120
Tabela 7	Análise de variância do modelo quadrático para os parâmetros de cor de fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom.	120
Tabela 8a	Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta das propriedades mecânicas das fatias de yacon tratadas com sorbitol .....	123
Tabela 8b	Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta das propriedades mecânicas das fatias de yacon tratadas com xilitol .....	123
Tabela 9	Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis de propriedades mecânicas observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom .....	124
Tabela 10	Análise de variância do modelo quadrático para as propriedades	124

	mecânicas das fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom .....	
Tabela 11a	Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade para amostras tratadas com sorbitol.....	127
Tabela 11b	Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade para amostras tratadas com xilitol.....	127
Tabela 12	Critérios de otimização da DOAU de fatias de yacon com sorbitol e com xilitol e soluções das condições ótimas .....	128

## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

Figure 1 Kinetics of solid gains of yacon slices during osmotic dehydration by different polyols .....	55
Figure 2 Kinetics of water loss of yacon slices during osmotic dehydration by different polyols .....	56
Figure 3 Kinetics of water activity reduction of yacon slices during osmotic dehydration by different polyols .....	57

#### ARTIGO 2

Figura 1 Superfícies de resposta para perda de de água (PA) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b) .....	75
Figura 2 Superfícies de resposta para ganho de sólidos (GS) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b) .....	78
Figura 3 Superfícies de resposta para retenção de frutanos (RFru) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b) .....	80
Figura 4 Superfícies de resposta para atividade de água ( $a_w$ ) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b) .....	82
Figura 5a Otimização simultânea de desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de yacon com solução de sorbitol, variáveis do processo e perfil desejabilidade individual e global .....	86
Figura 5b Otimização simultânea de desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de yacon com solução de xilitol, variáveis do processo e perfil desejabilidade individual e global .....	87

#### ARTIGO 3

Figura 1 Superfícies de resposta para teor de umidade ( $U_{bs}$ ) (a) e conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) (b) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol .....	109
Figura 2 Superfícies de resposta para variação de volume proporcional .....	115

(V/V <sub>0</sub> ) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e xilitol (b).....	
Figura 3 Superfícies de resposta para valores de L* (a) e variação total de cor (ΔE) (b) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de xilitol .....	118
Figura 4 Superfícies de resposta para valores de L* (a) e variação total de cor (ΔE) (b) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol .....	125
Figura 5 Otimização simultânea da DOAU de fatias de yacon em solução de sorbitol, variáveis do processo e desejabilidade individual e global .....	129
Figura 6 Otimização simultânea da DOAU de fatias de yacon em solução de xilitol, variáveis do processo e desejabilidade individual e global .....	130

## LISTA DE SIGLAS

AGCC	Ácidos graxos de cadeia curta
ANR	Açúcar não redutor
C.S.	Concentração da solução
CR	Coefficiente da regressão
DCCR	Delineamento composto central rotacional
DO	Desidratação osmótica
DOAU	Desidratação osmótica assistida por ultrassom
FH	Frutano hidrolase
FEH	Frutano hexohidrolase
FOS	frutooligossacarídeos
GL	Graus de liberdade
GP	Graus de polimerização
IgA	Imunoglobulina A
M.G.	Minas Gerais
Max.	Máximo
Min.	Mínimo
OD	Osmotic dehydration
POD	Peroxidase
PPO	Polifenol oxidase
QM	Quadrado médio
SE	Standard error
SG	Solid gain
SQ	Soma de quadrados
WL	Water loss

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
w	Weight
v	Volume
h	Hora
°B	Graus Brix
mL	Mililitros
$a_w$	Atividade de água
g	Gramma
$M_0$	Massa inicial da amostra
$M_f$	Massa final da amostra
$X_0$	Teor de umidade inicial em base úmida
$X_f$	Teor de umidade final em base úmida
$x_{s0}$	Conteúdo inicial de sólidos solúveis totais
$x_{sf}$	Conteúdo final de sólidos solúveis totais
$X_e$	Teor de umidade no equilíbrio
$D_{effw}$	Difusividade efetiva da água
$D_{effs}$	Difusividade efetiva de sólidos
m	Metro
s	Segundo
w.b.	Wet basis
min	Minuto
$t_{us}$	Tempo de aplicação do ultrassom
kW	Quilowatt
kHz	Quilohertz
RFru	Retenção de frutanos
$Y_i$	Valor predito da variável resposta
$X_1$	Tempo de ultrassom
$X_2$	Concentração da solução osmótica
$\beta$	Coefficiente da equação
$R^2$	Coefficiente de correlação
$d_i$	Desejabilidade individual
D	Desejabilidade Global
n	Número de variáveis
$\beta_s$	Coefficiente da equação de sorbitol
$\beta_x$	Coefficiente da equação de xilitol
(L)	Linear
(Q)	Quadrático
$U_{bs}$	Teor de umidade em base seca

SST	Conteúdo de sólidos solúveis totais
$V/V_0$	Volume proporcional
$\Delta E$	Varição total de cor
$\sigma_{HF}$	Tensão de ruptura
$\varepsilon_{HF}$	Deformação na ruptura
$E_d$	Módulo de elasticidade
mm	Milímetros
N	Newton
kPa	Quilopascal



## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL ..... 17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO ..... 18</b>
<b>2.1</b>	<b>Yacon (<i>Smallanthus sonchifolius</i>) ..... 19</b>
<b>2.2</b>	<b>Estabilidade dos compostos funcionais no yacon ..... 25</b>
<b>2.3</b>	<b>Desidratação osmótica assistida por ultrassom ..... 27</b>
	<b>REFERÊNCIAS ..... 34</b>
<b>SEGUNDA PARTE</b>	
	<b>ARTIGO 1 Osmotic dehydration of yacon slices: effect of different polyols on mass transfer parameters ..... 46</b>
	<b>ARTIGO 2 Otimização da desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de yacon visando a retenção do teor de frutanos ..... 63</b>
	<b>ARTIGO 3 Otimização da desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de yacon quanto alterações de volume, cor e propriedades mecânicas ..... 94</b>
<b>3</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL ..... 137</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, a busca pela saúde tem despertado o interesse na identificação de alimentos funcionais que contribuam para a manutenção da saúde e auxiliem no tratamento ou na prevenção de doenças. O yacon (*Smallanthus sonchifolius*) é considerado benéfico à saúde devido à sua ação prebiótica e redutora do índice glicêmico por ser um tubérculo cujos principais carboidratos de reserva são os frutooligossacarídeos (FOS). Além disso, pesquisas já mostraram que seu consumo está relacionado à modulação da concentração de insulina no sangue, inibição de gliconeogênese em células hepáticas e redução de peso, uma vez que pode ser empregado como adoçante de baixa caloria. O yacon também é considerado uma boa fonte de antioxidantes na dieta, sendo associado à redução de incidência de câncer.

O consumo deste tubérculo é tradicionalmente feito há séculos pela população andina, sua primeira representação em tecidos e cerâmicas data de 500-1200 a.C. em registros arqueológicos na região da cidade de Nazca, antigo território Inca. A primeira descrição escrita foi feita em 1615 em uma listagem de 55 culturas praticadas na região dos Andes. O yacon recebe diferentes nomes conforme a região: llaqon, llacum, llacuma, yacumpi, aricama, chicama, jiquima, jiquimilla. Em francês, é conhecido como *poire de terre* e, em inglês, como *yacon strawberry*. Devido ao seu fácil cultivo e alta resistência a condições extremas de clima, o yacon é considerado uma boa alternativa na subsistência de pequenas propriedades, quando destinado ao consumo ou ao comércio local.

O yacon pode ser consumido cru ou como ingrediente de diversas receitas de sucos e sobremesas na nova culinária andina. Industrialmente, o

yacon é processado na forma de purê, xarope, doces e outros produtos. No entanto, devido à sua alta atividade de água é um produto bastante perecível. Além disso, as propriedades benéficas à saúde tendem a decrescer após a colheita, com a decomposição do FOS em açúcares simples. Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas que permitam o processamento deste tubérculo por vias que estendam a vida útil e preservem seu potencial prebiótico.

A secagem é uma alternativa que possibilita a disponibilização de alimentos em períodos de entressafra e em regiões distantes daquelas em que são cultivados. No entanto, esse processo pode acarretar em alterações físicas, químicas e nutricionais com relação ao produto fresco, principalmente em se tratando de compostos termolábeis. Desta forma, faz-se necessário o estudo de processos alternativos de desidratação que sejam capazes de suavizar os danos causados pelos processos clássicos, forneçam produtos com boas características sensoriais e nutricionais, além de vida de prateleira prolongada.

Dentre estas possibilidades, o pré-tratamento de desidratação osmótica assistida por ultrassom aumenta as taxas de secagem devido a alterações na conformação estrutural na matriz do alimento e contribui para a preservação da qualidade do mesmo, pois reduz o tempo total de exposição a temperaturas elevadas. Sendo, portanto, uma boa opção na produção de fatias de yacons desidratadas.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O conhecimento das características do produto e do processo envolvidos na otimização da secagem faz com que a revisão de literatura se torne necessária.

## 2.1 Yacon (*Smallanthus sonchifolius*)

Yacon é um tubérculo membro da família das Asteraceae. Até 1978 a planta era denominada como *Polymnia sonchifolia* (GRAEFE et al., 2004; GRAU; REA, 1997), quando foi renomeada a *Smallanthus sonchifolius* [Poepp. & Endl.] H. Robinson (GENTA et al., 2009). Essa cultura é original da região andina, encontrada desde a Venezuela até o noroeste da Argentina (AYBAR et al., 2001; ZARDINI, 1991). Atualmente, a planta está presente em diversos continentes, com registros de cultivo no Japão, Coreia do Sul, Estados Unidos, Nova Zelândia, Alemanha, Itália, França, República Tcheca e no sudeste do Brasil, onde a produtividade chega a 100 t/ha (OJANSIVU; FERREIRA; SALMINEN, 2011; VALENTOVÁ; ULRICHOVÁ, 2003).

O yacon é uma herbácea, cuja porção aérea atinge cerca de 2 metros de altura na planta adulta. O sistema radicular desenvolve de 4 a 20 tubérculos, com 10 a 25 cm de diâmetro, pesando entre 200 e 2000 gramas cada unidade (KURODA; ISHIARA, 1995). Os tubérculos têm aparência de batata doce, sabor adocicado e textura suculenta e crocante, que remetem a melão e pera. A utilização tradicional da planta é feita de uma forma diversificada: enquanto as folhas e ramos do yacon são consumidos como hortaliças e chás, com efeitos hipoglicemiantes e antimicrobianos (AYBAR et al., 2001; INOUE et al., 1995; VALENTOVÁ et al., 2004). Suas raízes tuberosas são consumidas sem a casca, na forma *in natura* em saladas, cozidas, fritas e adicionadas a sucos para funcionarem como adoçantes de baixo índice glicêmico (LACHMAN; FERNÁNDEZ; ORSÁK, 2003; OJANSIVU; FERREIRA; SALMINEN, 2011; VALENTOVÁ; FRČEK; ULRICHOVÁ, 2001; VALENTOVÁ; ULRICHOVÁ, 2003). Em supermercados peruanos, produtos como polpa, xarope, pó liofilizado em cápsulas, sucos, farinha, marmelada e chá das folhas podem ser facilmente encontrados (SEMINARIO; VALDERRAMA; MANRIQUE, 2003).

Além do sabor agradável, o yacon é considerado um alimento funcional, devido às suas propriedades prebióticas e antioxidantes (GENTA et al., 2009). O grande enfoque que a alimentação saudável tem recebido colocou o yacon em destaque no meio científico, levando ao desenvolvimento de muitas pesquisas com novas formas de utilização do yacon na alimentação. Dentre estes trabalhos estão o processamento mínimo (LIMA, 2003; MICHELS, 2005), produção de bolos e pães com farinha de yacon (PADILHA; ROLIM, 2010; ROLIM et al., 2010), geleia de yacon (PRATI et al., 2009), yacon desidratado (KOTOVICZ et al., 2013; REIS; LENZI; MASSON, 2012; SCHER; RIOS; NOREÑA, 2009) e bebidas fermentadas (SILVA, 2004).

Os tubérculos de yacon são compostos de 10 a 20% de matéria seca, das quais a maior parte é carboidrato (LACHMAN; FERNÁNDEZ; ORSÁK, 2003; SCHER; RIOS; NOREÑA, 2009). Diferente da maioria dos tubérculos, o yacon armazena carboidratos na forma de frutooligossacarídeos (FOS) de baixo grau de polimerização, que são frutanos do tipo inulina. Frutanos são polímeros de frutose produzidos em vegetais com excedente de fotoassimilados e são degradados pela planta em regimes de escassez de substratos energéticos, atuando, logo, como carboidratos de reserva (DIETRICH; FIGUEIREDO-RIBEIRO, 1986). Ocorrem ainda os açúcares frutose, glicose e sacarose no tecido de reserva do yacon (GOTO et al., 1995). A composição dos açúcares varia de forma significativa em função de fatores como a cultivar, a época de cultivo e a colheita, o tempo e a temperatura na pós-colheita (SANTANA; CARDOSO, 2008). A tabela 1 mostra uma compilação de diversos trabalhos com a composição de tubérculos de yacon.

**Tabela 1.** Composição de tubérculos de yacon *in natura*

Componentes	Graefe et al. (2004)	Valentová et al. (2006)	Prati et al. (2009)
Umidade (g/100g)	87,6	-	80,70
Carboidrato (g/100g)	11,0	-	7,86
FOS (g/100g)	7,0	4,3-4,9	3,90
Açúcares simples (g/100g)	1,5-4,0	3,8-4,0	-
Açúcares redutores (g/100g)	-	-	3,94

De acordo com a estrutura do trissacarídeo presente e das ligações entre eles, os frutanos podem ser classificados em três grupos: inulina, levanos e graminanos (RIBEIRO, 2008; SILVA, 2004). O grupo das inulinas se caracteriza por ligações glicosídicas do tipo  $\beta$  (2-1) entre os resíduos de frutose e grau de polimerização de baixo a médio, podendo variar de 2 a 60. Por sua vez, os frutooligossacarídeos (FOS) são polímeros formados por 3 a 10 resíduos de frutose e uma molécula de glicose unidos por ligações (2-1)  $\beta$ -D-fructofuranosil (GOTO et al., 1995).

Apesar dos frutooligossacarídeos (FOS) e a inulina apresentarem a mesma composição, alguns autores os separam como classes distintas, atribuindo diferenças quanto aos graus de polimerização (GP) de ambos (MCNEIL-PPC, 1999; SILVA, 1996). Os frutooligossacarídeos (FOS) são considerados não-tóxicos, não-digeríveis, conferem sabor adocicado aos vegetais e contribuem para a manutenção da saúde devido a uma série de efeitos prebióticos (NARAI-KANAYAMA; TOKITA; ASO, 2007).

As ligações do tipo  $\beta$  (2-1) não são quebradas por enzimas do trato digestivo humano, desta forma, o FOS alcança o intestino grosso de forma intacta, servindo de substrato fermentescível às bactérias benéficas da microbiota colonizadora (PEDRESCHI et al., 2003). Isso ocorre porque bifidobactérias e lactobacilos utilizam oligossacarídeos de baixo grau de polimerização (DP 3-4) como substrato (SNART et al., 2006). O fornecimento de uma alimentação rica em FOS de baixa polimerização promove o

desenvolvimento das bactérias probióticas em detrimento daquelas não-benéficas ao organismo. As bactérias colonizadoras do cólon produzem ácidos graxos de cadeia curta (AGCC) como principal metabólito secundário, esses compostos, por sua vez, têm ação moduladora do metabolismo (ALLES et al., 1996; WONG et al., 2006). Além de serem levados pela corrente sanguínea até o fígado e modularem o metabolismo de lipídeos, os AGCC contribuem para a redução do pH do intestino grosso, destruindo a microbiota putrefativa produtora de metabólitos tóxicos como amônia, indol, fenóis e nitrosaminas (DENIPOTE; TRINDADE; BURINI, 2010). Bibas Bonet et al. (2010) observaram aumento na contagem de bactérias dos gêneros *Bifidobacterium* e *Lactobacillus* no intestino grosso de ratos alimentados com farinha de tubérculos de yacon, enquanto a contagem de enterobactérias patogênicas diminuiu, o mesmo foi observado em testes com porcos (CAMPOS et al., 2012). No entanto, o perfil atribuído às colônias presentes no colón foi reversível com a interrupção do suprimento de FOS na alimentação. Moura et al. (2012) estudaram a administração de yacon (0,14g/Kg/dia) em ratos induzidos quimicamente à carcinogênese. Os resultados mostraram que o consumo de tubérculos de yacon tem efeito potencial anti-carcinogênese em intestino grosso. Além disso, os resultados puderam ser intensificados quando os animais foram tratados com dieta simbiótica de yacon+*L. casei* (prebiótico+probiótico).

O yacon é considerado uma importante fonte antioxidante, Campos et al. (2012) encontraram grande correlação entre o conteúdo de compostos fenólicos dos tubérculos e sua capacidade antioxidante. Indicando assim que os compostos fenólicos são os principais responsáveis por esta função. O teor nos tubérculos de yacon é de cerca de 203 mg/100g (LACHMAN; FERNÁNDEZ; ORSÁK, 2003; VALENTOVÁ; ULRICHOVÁ, 2003). Entre os principais compostos fenólicos encontrados estão os ácidos clorogênicos, ferrúlicos e outros derivados do ácido caféico. Sendo, portanto, considerados os compostos com propriedades

antioxidantes mais abundantes neste produto (SIMONOVSKA et al., 2003; TAKENAKA et al., 2003; YAN et al., 1999). A quantidade de ácido clorogênico em tubérculos de yacon foi determinada em diversos trabalhos, Yan et al. (1999) encontraram valores de  $48,5 \pm 12,9$   $\mu\text{g/g}$ , enquanto Campos et al. (2012) examinaram diferentes cultivares, cujos teores variaram de 18 a  $75\mu\text{g/g}$ . Os antioxidantes são compostos que têm ganhado importância na contribuição à saúde humana, pois auxiliam na proteção celular contra danos causados por radicais de oxigênio, que têm graves consequências em doenças cardíacas e desenvolvimento de câncer. Durante o processamento do yacon, é importante evitar a oxidação dos compostos fenólicos (NEVES; SILVA, 2007), para garantir a manutenção do valor nutricional do alimento (TAKENAKA et al., 2003).

Estudos em animais e humanos demonstraram que o consumo de yacon na alimentação tem ação sobre o sistema imunológico e sobre o metabolismo de carboidratos, lipídios e minerais, além dos efeitos antioxidantes e sobre o sistema gastrointestinal. Ratos tratados com farinha de tubérculos de yacon apresentaram aumento na secreção de imunoglobulina A (IgA) e citocinas regulatórias do efeito pró-inflamatório nas células do intestino (BIBAS BONET et al., 2010).

Mulheres obesas, no período pré-menopausa, com leves dislipidemias consumiram, por 120 dias, doses que não causaram efeitos gástricos indesejáveis (0,14g FOS/Kg/dia) de suco concentrado de tubérculos de yacon. Análises clínicas mostraram efeito na redução de peso, redução dos níveis de LDL-colesterol, menor resistência à insulina (fator que leva ao desenvolvimento da diabetes tipo 2), aumento na concentração de cálcio na sangue, aumento na frequência de defecação, sensação de saciedade após as refeições, redução da circunferência abdominal e do índice de massa corpórea (GENTA et al., 2009),



sugerindo uma boa alternativa no tratamento de quadros de obesidade, diabetes e síndrome metabólica.

A absorção intestinal de minerais e o balanço de cálcio ósseo foram favorecidos em ratos tratados com farinha de tubérculos de yacon, resultando em ossos com maior conteúdo deste mineral e mais resistentes (LOBO et al., 2007).

Ratos diabéticos induzidos foram submetidos à dieta de farinha de tubérculos de yacon por 90 dias. Os resultados mostraram que a suplementação de FOS na dieta diminuiu significativamente os índices de lipídeos sanguíneos e aumentou o nível de insulina em situações de jejum, mostrando-se como uma boa alternativa para auxiliar no tratamento de quadros de diabetes (HABIB et al., 2011). Park et al. (2009) observaram redução nos níveis de glicose sanguínea em ratos induzidos a diabetes que foram tratados com extrato de tubérculos de yacon.

Diminuição no tempo de trânsito intestinal foi observada em voluntários tratados por duas semanas com o equivalente a 20g diárias de FOS (GEYER et al., 2008).

O yacon é considerado um alimento seguro ao consumo humano (OJANSIVU; FERREIRA; SALMINEN, 2011). No entanto, a ingestão de altas doses pode provocar inchaço abdominal e flatulência atribuídos à fermentação dos FOS por bactérias probióticas colônicas (GENTA et al., 2009). Nenhum efeito tóxico foi observado em ratos alimentados por 4 meses com até 6800mg FOS/Kg/dia de farinha de tubérculos de yacon (GENTA et al., 2005). Um único caso de intoxicação foi reportado na Coreia do Sul, uma mulher de 55 anos apresentou reação anafilática (alergia sistêmica) após o consumo do tubérculo. Os sintomas reportados foram urticária, prurido, tontura, coma, dispneia e hipotensão após 10 minutos da ingestão da raiz *in natura*. Os sintomas foram controlados com a administração de epinefrina, dexametasona e ingestão de líquidos (YUN et al., 2010). Quanto às folhas, no entanto, o extrato administrado

oralmente em ratos, durante 90 dias em diferentes doses (10, 50, 100 e 1000 mg/Kg), demonstrou grande toxicidade (OLIVEIRA et al., 2011). Além de alterações nos níveis de creatinina, glicose e albumina sanguíneos, exames histológicos demonstraram a ocorrência de lesão renal nos animais. Desta forma, o chá das folhas não deve ser consumido no tratamento de diabetes.

## **2.2 Estabilidade dos compostos funcionais no yacon**

Durante o desenvolvimento da planta o perfil de açúcares nos tubérculos se modifica, ocorrendo um aumento no grau de polimerização dos polissacarídeos (ITAYA; CARVALHO; FIGUEIREDO-RIBEIRO, 2002). Oito meses após o plantio é a melhor época para colheita do yacon, no que se refere à proporção de frutanos e outros açúcares (OLIVEIRA; NISHIMOTO, 2004). O período pós-colheita do yacon pode comprometer suas propriedades funcionais devido à despolimerização das moléculas de FOS em açúcares simples (LACHMAN et al., 2004; NARAI-KANAYAMA; TOKITA; ASO, 2007). O stress causado pela colheita ativa a enzima frutano hidrolase (FH) ou frutano hexohidrolase (1-FEH) que catalisa as reações de hidrólise dos FOS em frutose e glicose. Após uma semana de armazenamento à temperatura ambiente, cerca de 30 a 40% dos FOS são transformados em açúcares simples (FUKAI et al., 1997; GRAEFE et al., 2004; NARAI-KANAYAMA; TOKITA; ASO, 2007). O armazenamento sob temperatura de refrigeração (5 a 10°C) e em umidade próxima de 80% contribui para maior preservação do conteúdo de FOS, mas não evita completamente sua redução (LACHMAN et al., 2004). Frutooligossacarídeos do tipo inulina mostraram-se estáveis à hidrólise em sistemas aquosos em temperatura ambiente e pH neutro. No entanto, a temperaturas mais altas na presença de ácido a hidrólise da inulina pode tornar-se significativa levando à decomposição eventual do polímero (BIERMANN,

1988; BLECKER et al., 2002; L'HOMME, 2003; MATUSEK et al., 2009; NASSAB et al., 2009 citados por BARCLAY et al., 2012). Segundo Kim, Faqih e Wang (2001), inulinas, como o FOS, foram hidrolisadas a açúcares redutores por ação do aquecimento e esta conversão aumentou com a elevação da temperatura de 70 °C para 100 °C. Lago et al. (2012), em secagem por *spray dryer* de polpa e suco de yacon microencapsulado com amido nativo, observaram diminuição nos teores de inulina e aumento de glicose e frutose nas amostras desidratadas a 70 °C. Para preservar as propriedades funcionais do yacon é importante que o produto seja prontamente processado após a colheita (GRAEFE et al., 2004) sob condições brandas.

Outro fato que pode alterar a qualidade pós-colheita dos yacons é a oxidação dos compostos fenólicos, ou escurecimento enzimático, que ocorre rapidamente após a estocagem, corte e processamento dos tubérculos (YAN et al., 1999). Estas reações são catalisadas pelas enzimas polifenol oxidase (PPO) e peroxidase (POD), que estão altamente ativas nos tubérculos de yacon. A primeira promove a oxidação dos compostos fenólicos pela formação de ortoquinonas, que se polimerizam em pigmentos escuros chamados melaninas, e ainda reage não enzimaticamente com aminoácidos e proteínas. A enzima peroxidase (POD) causa o desenvolvimento de sabor indesejável em vegetais, utilizando o peróxido de hidrogênio como substrato ou, em alguns casos, oxigênio como acceptor de hidrogênio na reação de oxidação (NEVES; SILVA, 2007; PADILHA et al., 2009).

Muitas técnicas já foram testadas na tentativa de preservar a qualidade pós-colheita de produtos sujeitos a essas avarias, como a secagem (CASTRO et al., 2012; PADILHA et al., 2009; SCHER; RIOS; NOREÑA, 2009) branqueamento (SCHER; RIOS; NOREÑA, 2009), a desidratação osmótica (KOTOVICZ et al., 2013), o armazenamento a baixas temperaturas (LACHMAN et al., 2004), a utilização de antioxidantes e inativadores

enzimáticos (NARAI-KANAYAMA; TOKITA; ASO, 2007; NEVES; SILVA, 2007; PADILHA et al., 2009) a eliminação do oxigênio do meio, entre outros (MOURA, 2004). Apesar da desidratação dos tubérculos ser capaz de promover a inibição destas enzimas, preservando as propriedades desejáveis e atribuindo uma vida de prateleira estendida ao produto; dentre os trabalhos já elaborados, nenhum deles encontrou parâmetros otimizados satisfatórios de degradação mínima dos compostos funcionais do yacon.

Scher, Rios e Noreña (2009) estudaram a redução no conteúdo dos açúcares não-redutores (ANR) após a secagem convectiva de fatias de tubérculos de yacon nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C por 300 min, precedidas ou não de branqueamento. Em todos os tratamentos, o conteúdo de inulina reduziu-se significativamente após a secagem, a 70 °C a redução dos ANR foi ainda mais intensa. Os autores conferem a redução do nível de ANR à hidrólise das moléculas de frutooligossacarídeos, abundantes em yacon, em moléculas de açúcares redutores. Essa degradação foi atribuída à ação dos tratamentos térmicos, uma vez que as amostras que passaram por tratamento de inativação enzimática apresentaram respostas semelhantes.

### **2.3 Desidratação osmótica assistida por ultrassom**

A desidratação osmótica é um dos pré-tratamentos mais empregados em processos de secagem (AZOUBEL et al., 2010; CORRÊA et al., 2011; MAYOR; MOREIRA; SERENO, 2011). É utilizada com o objetivo de reduzir o tempo total e aumentar as taxas e a eficiência da secagem, pois causa a diminuição da umidade inicial da amostra e alterações na estrutura do produto, graças aos fluxos gerados através da matriz do alimento durante o pré-tratamento (FERNANDES; RODRIGUES, 2007, 2008; VICENTE; NIETO; HODARA, 2012). Além de tudo, a desidratação osmótica minimiza a

depreciação da qualidade física e química no produto na secagem (CORRÊA et al., 2008).

A desidratação osmótica consiste na imersão do material em uma solução hipertônica. O gradiente de potencial químico ou pressão osmótica entre as fases promove dois fluxos contracorrentes simultâneos: a saída de uma fração de água do material para a solução osmótica e a difusão de sólidos oriundos da solução para o alimento (MAYOR; MOREIRA; SERENO, 2011) até que o equilíbrio seja alcançado. Ocorre ainda um terceiro fluxo no sistema: a lixiviação de solutos do produto (açúcares, ácidos, vitaminas, minerais, etc) pela água. Este fluxo, embora na maioria das vezes insignificante frente aos demais, ocorre porque as membranas biológicas não são perfeitamente seletivas, ele é relevante no que diz respeito às características sensoriais e nutricionais do produto, apesar de ser quantitativamente desprezível (DEVIC et al., 2010; TONON; BARONI; HUBINGER, 2007).

Os principais parâmetros que afetam a transferência de massa durante a desidratação osmótica são a concentração e temperatura da solução osmótica, presença ou não de agitação, razão entre a quantidade de alimento e solução, características internas da estrutura do produto (composição, porosidade e textura), forma e tamanho em que é processado, natureza e peso molecular do soluto e pressão em que o processo é executado (ALLALI; MARCHAL; VOROBIEV, 2010).

Os agentes osmóticos mais utilizados são os açúcares e os sais (MAYOR; MOREIRA; SERENO, 2011). Agentes osmóticos com baixo peso molecular acarretam em maior nível de impregnação de sólidos na matriz do alimento. Por outro lado, a entrada desses agentes diminui o gradiente de pressão osmótica entre o alimento e a solução, reduzindo o fluxo de perda de água. Ademais, os solutos de alto peso molecular são facilmente bloqueados na superfície do produto, aumentando a concentração osmótica nessa região e

intensificando a desidratação. Esse efeito pode ser interpretado em função da difusividade do soluto no alimento, maiores difusividades do soluto proporcionam maiores ganhos de sólidos e menores índices de desidratação (CHAUHAN et al., 2011).

Soluções osmóticas altamente concentradas acarretam em maiores taxas de transferência de massa. Arballo et al. (2012) observaram efeito significativo do aumento da concentração da solução osmótica sobre os parâmetros de ganho de sólidos e perda de água em processo de desidratação osmótica de abóboras, kiwi e peras com solução de sacarose comercial. No entanto, outros trabalhos (CORRÊA et al., 2010; FERRARI et al., 2011) relataram que, ao contrário da perda de água, o ganho de sólidos não aumentou positivamente com a concentração da solução, devido à formação de uma camada superficial de soluto na superfície do produto, que impede sua entrada no alimento.

Sorbitol, xilitol, frutose, trealose, maltose são solutos cada vez mais empregados em processos de desidratação osmótica (CHAUHAN et al., 2011; OZDEMIR et al., 2008; SRITONGTAE; MAHAWANICH; DUANGMAL, 2011; VICENTE; NIETO; HODARA, 2012; ZHAO et al., 2013). O sorbitol é um poli-álcool de massa molar pequena, sendo um excelente agente desidratante, proporcionando baixos ganhos de sólidos ao produto. É industrialmente produzido pela hidrogenação de monossacarídeos, com a adição de hidroxilas no lugar de grupamentos cetona ou aldeído. Seu consumo não acarreta em alterações nos níveis de insulina e glicose plasmática. Seu poder dulçor corresponde a 60% ao da sacarose (PAYNE; CHASSARD; LACROIX, 2012). O xilitol também é um poli-álcool que possui aplicações na indústria alimentícia, odontológica e farmacêutica, sua produção vem sendo feita pela fermentação da xilose presente no hidrolisado de bagaço de cana, seu elevado custo de produção é devido à purificação bastante onerosa (ARRUDA, 2011). Essa molécula tem efeito adoçante e não é fermentada pelas bactérias bucais,

demostrando ação anticariogênica importante (RODRIGUES et al., 2011). Alguns estudos em ratos mostraram efeito positivo no tratamento contra a osteoporose (MATTILA; KANGASMAA; KNUUTTILA, 2005). Além disso, tem excelente efeito na substituição da glicose na dieta de diabéticos, uma vez que é independente da insulina, sua absorção é lenta e não causa alterações rápidas nos níveis de glicose no sangue. Sendo bem tolerado por pacientes diabéticos (PEPPER; OLINGER, 1988). Sorbitol e xilitol são apresentam grupos aldeídicos ou cetônicos, portanto, não participam de reações de escurecimento do tipo Maillard.

As principais vantagens da utilização destes solutos é que a sua impregnação no alimento não acarreta em aumento do valor calórico e no índice glicêmico do produto, sendo recomendados para consumo por diabéticos e obesos. Além disso, como são solutos de baixo peso molecular, não se observa a formação de camada superficial de solutos na superfície do produto, esse fato é comum quando se usa solutos de alto peso molecular que podem sofrer cristalização quando acumulados na superfície do alimento, acarretando em alterações indesejáveis na textura do produto.

Sritongtae, Mahawanich e Duangmal (2011) observaram a desidratação osmótica de melão cantaloupe com o emprego de sorbitol. Os parâmetros de perda de água e ganho de sólidos aumentaram com a concentração de sorbitol na solução, mas em comparação com soluções de sacarose a perda de água foi menor e o ganho de sólidos maior, devido ao tamanho das moléculas.

O emprego do ultrassom associado à desidratação de alimentos é uma eficiente alternativa para aumentar as taxas de secagem (SIMAL et al., 1998) e outros parâmetros, sendo considerada uma tecnologia emergente na área de processamento de alimentos (DELGADO; ZHENG; SUN, 2010). A influência da aplicação do ultrassom sobre as taxas de desidratação dependem tanto da magnitude das variáveis empregadas quanto de características intrínsecas à

estrutura de cada produto, que podem afetar a extensão das alterações induzidas pelo ultrassom (CÁRCEL et al., 2012; GARCIA-PEREZ; ORTUÑO; PUIG, 2012).

A aplicação da energia ultrassônica de alta intensidade é feita em frequências na escala de 20-100 kHz. Sendo utilizada para promover alterações em processos e produtos. As ondas ultrassônicas quando aplicadas em alimentos durante processos de desidratação osmótica são responsáveis por dois importantes fenômenos: a cavitação e o efeito esponja (CÁRCEL et al., 2007). A cavitação consiste no surgimento de bolhas na solução osmótica a partir de gases existentes no meio (SORIA; VILLAMIEL, 2010). O desenvolvimento dessas bolhas pode produzir uma intensa agitação na fase líquida, gerando aumento da temperatura e pressão locais. Esse efeito, por sua vez, produz turbulência, ondas de cisalhamento e micro jatos direcionados à superfície do sólido. Este mecanismo reduz a resistência externa à transferência de massa, através dos micro jatos que afetam a superfície do produto e injetam solução osmótica para o interior do alimento além de alterar a camada limite entre o alimento e a solução osmótica (CÁRCEL et al., 2012).

A outra consequência das ondas ultrassônicas é o efeito esponja, que é similar à compressão e expansão alternada de uma esponja. Atua sobre o alimento sólido liberando líquido e gases oclusos para o exterior, e proporcionando a entrada de solução osmótica, na sequência. Esse efeito atua reduzindo a resistência interna à transferência de massa. Pois envolve forças superiores à tensão superficial, provocando a liberação de moléculas de água e a criação de canais microscópicos que facilitam o transporte de matéria (CÁRCEL et al., 2012). Esses canais microscópicos já foram observados em diversos frutos, como melões (FERNANDES; GALLÃO; RODRIGUES, 2008), abacaxis (FERNANDES; GALLÃO; RODRIGUES, 2009) e morangos (GARCIA-NOGUERA et al., 2010). Fernandes e Rodrigues (2008) estudaram a aplicação



de ultrassom durante a desidratação osmótica de banana, jenipapo, jambo, melão, mamão, abacaxi, pinha e sapoti, para todas as frutas foi relatado aumento em níveis de perda de água e ganho de sólidos com a utilização do ultrassom. A difusividade efetiva, no entanto, foi bastante diferente entre os frutos, de acordo com as características próprias de cada fruto, como a textura, e com os diferentes graus de alteração estrutural no tecido de cada fruto.

Rodrigues e Fernandes (2007) utilizaram a desidratação osmótica assistida por ultrassom como pré-tratamento para a secagem convectiva de melões. As amostras tratadas com ultrassom alcançaram maiores coeficientes de difusividade efetiva de água na secagem do que aquelas submetidas à desidratação osmótica convencional, o que foi atribuído à formação de micro canais na matriz do fruto. O tempo total de secagem foi reduzido em até 24,6% após o pré-tratamento com ultrassom. Observou-se ainda que o aumento do tempo de aplicação das ondas ultrassônicas implicou em maiores transferências de água e sólidos entre o meio e a solução após o pré-tratamento.

Estudando diferentes frequências de ultrassom na DOAU de morangos como pré-tratamento para a secagem convectiva, Garcia-Noguera et al. (2010) observaram que a frequência de 25 kHz aplicada por 30 minutos em solução com 50% de sacarose resultaram em maior redução no tempo de secagem. Essa configuração reduziu pela metade o tempo total de processamento, quando comparado com tratamentos sem a aplicação das ondas ultrassônicas. No mesmo trabalho os autores observaram que as maiores perdas de água durante a DOAU foram alcançadas com a aplicação de 25 kHz de ultrassom por 10 a 20 minutos, a frequência de 40 kHz produziu as menores difusividades de água nos morangos.

A cinética de transferência de massa para tomates cerejas expostos à energia ultrassônica na desidratação osmótica foi analisado por Li et al. (2012) que encontraram um tempo máximo (30 min) de aplicação do ultrassom além

do qual não observa-se aumento do seu efeito sobre parâmetros de perda de água. Além disso, o parâmetro de ganho de sólidos somente apresentou efeito da aplicação de ultrassom após os 45 min de exposição. Esse comportamento foi atribuído ao fato de que a deformação da estrutura do alimento com o surgimento de micro canais pela aplicação de ultrassom ocorre até um grau máximo, depois de atingido esse nível de deformação da estrutura, não se observa efeito significativo do ultrassom sobre o incremento da transferência de massa com a continuidade de sua aplicação.

## REFERÊNCIAS

ALLALI, H.; MARCHAL, L.; VOROBIEV, E. Blanching of strawberries by ohmic heating: effects on the kinetics of mass transfer during osmotic dehydration. **Food and Bioprocess Technology**, Chicago, v. 3, n. 3, p. 406-414, June 2010.

ALLES, M. S. et al. Fate of fructo-oligosaccharides in the human intestine. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 76, n. 2, p. 211-216, Aug. 1996.

ARBALLO, J. R. et al. Mass transfer kinetics and regression-desirability optimisation during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 47, n. 2, p. 306-314, Feb. 2012.

ARRUDA, P. V. **Avaliação do processo biotecnológico de obtenção de xilitol em diferentes escalas a partir do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar**. 2011. 163 p. Tese (Doutorado em Conversão de Biomassa) - Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.

AYBAR, M. J. et al. Hypoglycemic effect of the water extract of *Smallantus sonchifolius* (yacon) leaves in normal and diabetic rats. **Journal of Ethnopharmacology**, Lausanne, v. 74, n. 2, p. 125-132, Feb. 2001.

AZOUBEL, P. M. et al. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 97, n. 2, p. 194-198, Mar. 2010.

BARCLAY, T. et al. Analysis of the hydrolysis of inulin using real time <sup>1</sup>H NMR spectroscopy. **Carbohydrate Research**, Amsterdam, v. 352, p. 117-125, May 2012.

BIBAS BONET, M. E. et al. Prebiotic effect of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) on intestinal mucosa using a mouse model. **Food and Agricultural Immunology**, Abingdon, v. 21, n. 2, p. 175-189, June 2010.

CAMPOS, D. et al. Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. **Food Chemistry**, London, v. 135, n. 3, p. 1592-1599, Dec. 2012.

CÁRCEL, J. A. et al. Food process innovation through new technologies: use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 110, n. 2, p. 200-207, May 2012.

CÁRCEL, J. A. et al. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 2, p. 472-479, Jan. 2007.

CASTRO, A. et al. Antioxidants in yacon products and effect of long term storage. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 432-435, 2012.

CHAUHAN, O. P. et al. Effects of osmotic agents on colour, textural, structural, thermal, and sensory properties of apple slices. **International Journal of Food Properties**, Philadelphia, v. 14, n. 5, p. 1035-1048, 2011.

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

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

CORRÊA, J. L. G. et al. Osmotic dehydration of West Indian cherry (*Malpighia emarginata* D.C.): mass transfer kinetics. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 3, p. 403-409, 2008.

DELGADO, A. E.; ZHENG, L.; SUN, D. W. Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples. **Food and Bioprocess Technology**, Chicago, v. 2, n. 3, p. 263-270, 2010.

DENIPOTE, F. G.; TRINDADE, E. B. S. M.; BURINI, R. C. Probióticos e prebióticos na atenção primária ao câncer de cólon. **Archives of Gastroenterology**, São Paulo, v. 47, n. 1, p. 93-98, 2010.

DEVIC, E. et al. Kinetics of polyphenol losses during soaking and drying of cider apples. **Food and Bioprocess Technology**, Chicago, v. 3, n. 6, p. 867-877, Dec. 2010.

DIETRICH, S. M. C.; FIGUEIREDO-RIBEIRO, R. C. L. Carboidratos de reserva em plantas superiores e sua importância para o homem. **Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, Bogota, v. 61, p. 67-71, 1986.

FERNANDES, F.; GALLÃO, M.; RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: melon dehydration. **LWT-Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 41, n. 4, p. 604-610, May 2008.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 90, n. 2, p. 186-190, Jan. 2009.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. **Drying Technology**, New York, v. 26, n. 12, p. 1509-1516, Nov. 2008.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 82, n. 2, p. 261-267, Sept. 2007.

FERRARI, C. C. et al. Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 46, n. 2, p. 436-443, Feb. 2011.

FUKAI, K. et al. Seasonal fluctuations in fructan content and related enzyme activities in yacon (*Polymnia sonchifolia*). **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 43, n. 1, p. 171-177, 1997.

GARCIA-NOGUERA, J. et al. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. **Drying Technology**, New York, v. 28, n. 2, p. 294-303, Mar. 2010.

GARCIA-PEREZ, J.; ORTUÑO, C.; PUIG, A. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. **Food and Bioprocess Technology**, Chicago, v. 5, n. 6, p. 2256-2265, Aug. 2012.

GENTA, S. et al. Yacon syrup: beneficial effects on obesity and insulin resistance in humans. **Clinical Nutrition**, Philadelphia, v. 28, n. 2, p. 182-187, 2009.

GENTA, S. B. et al. Subchronic 4-month oral toxicity study of dried *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots as a diet supplement in rats. **Food and Chemical Toxicology**, Oxford, v. 43, n. 11, p. 1657-1665, Nov. 2005.

GEYER, M. et al. Effect of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) on colonic transit time in healthy volunteers. **Digestion**, Basel, v. 78, n. 1, p. 30-33, Sept. 2008.

GOTO, K. et al. Isolation and structural analysis of yacon oligosaccharides. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, Tokyo, v. 59, n. 12, p. 2346-2347, Dec. 1995.

GRAEFE, S. et al. Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2/3, p. 157-165, Mar. 2004.

GRAU, A.; REA, J. Yacon [*Smallanthus sonchifolia* (Poepp. Et Endl.) H. Robinson] Andean roots and tuberous roots: ahipa, arracacha, maca and yacon. In: HERMANN, M.; HELLER, J. E. (Ed.). **In promoting the conservation and use of underutilized crops**. Rome: Gatersleben/IPGRI, 1997. p. 199-256.

HABIB, N. C. et al. Hypolipidemic effect of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots on diabetic rats: biochemical approach. **Chemico-Biological Interactions**, Limerick, v. 194, n. 1, p. 31-39, Oct. 2011.

INOUE, A. et al. Antifungal melampolides from leaf extracts of *Smallanthus sonchifolius*. **Phytochemistry**, Oxford, v. 39, n. 4, p. 845-848, July 1995.

ITAYA, N. M.; CARVALHO, M. A. M.; FIGUEIREDO-RIBEIRO, R. D. L. Fructosyl transferase and hydrolase activities in rhizophores and tuberous roots upon growth of *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 116, n. 4, p. 451-459, Dec. 2002.

KIM, Y.; FAQIH, M.; WANG, S. Factors affecting gel formation of inulin. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 46, n. 2, p. 135-145, Oct. 2001.

KOTOVICZ, V. et al. Influence of process conditions on the kinetics of the osmotic dehydration of yacon (*Polymnia sonchifolia*) in fructose solution. **Journal of Food Process and Preservation**, Westport, v. 38, n. 1, p. 58-74, Jan. 2013.

KURODA, S.; ISHIARA, J. Field growth characteristics of plantlets propagated in vitro and line selection for increased percentage of gugar in tuberous root of yacon, *Polymnia sonchifolia*. **Bulletin of the Shikoku National Agricultural Experiment Station**, Zentsuju-Shi, v. 57, n. 1, p. 111-121, Mar. 1995.

LACHMAN, J. et al. Saccharides of yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] tubers and rhizomes and factors affecting their content. **Plant, Soil and Environment**, Beijing, v. 50, n. 9, p. 383-390, 2004.

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**, Beijing, v. 49, n. 6, p. 283-290, 2003.

LAGO, C. C. et al. Characterization of powdered yacon (*Smallanthus sonchifolius*) juice and pulp. **Food and Bioprocess Technology**, Chicago, v. 5, n. 6, p. 2183-2191, Aug. 2012.

LI, H. et al. Mass transfer evaluation of ultrasonic osmotic dehydration of cherry tomatoes in sucrose and salt solutions. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 47, n. 5, p. 954-960, May 2012.

LIMA, J. M. **Influência da temperatura de armazenamento e atmosfera modificada sobre o pH, acidez total titulável, sólidos solúveis e parâmetros microbiológicos dos tubérculos de yacon (*Polymnia sonchifolia*) minimamente processados**. 2003. 135 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

LOBO, A. R. et al. Effects of fructans-containing yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp and Endl.) flour on caecum mucosal morphometry, calcium and magnesium balance, and bone calcium retention in growing rats. **The British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 97, n. 4, p. 776-85, Apr. 2007.

MATTILA, P. T.; KANGASMAA, H.; KNUUTTILA, M. L. The effect of a simultaneous dietary administration of xylitol and ethanol on bone resorption. **Metabolism**, New York, v. 54, n. 4, p. 548-551, 2005.



MAYOR, L.; MOREIRA, R.; SERENO, A. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 103, n. 1, p. 29-37, Mar. 2011.

MCNEIL-PPC. Kathleen S. Laurenzo, Juan L. Navia, David S. Neiditch. **Preparation of inulin products**. USA n. PI 5968365 A, 15 Jan. 1997, 19 Oct. 1999.

MICHELS, I. **Aspectos tecnológicos do processamento mínimo de tubérculos de yacon (*Polymnia sonchifolia*) armazenados em embalagens com atmosfera modificada**. 2005. 108 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MOURA, C. P. **Aplicação de redes neuronais para a predição e otimização do processo de secagem de yacon (*Polymnia sonchifolia*) com pré-tratamento osmótico**. 2004. 115 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MOURA, N. A. de et al. Protective effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) intake on experimental colon carcinogenesis. **Food and Chemical Toxicology**, Oxford, v. 50, n. 8, p. 2902-2910, Aug. 2012.

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**, Chicago, v. 72, n. 6, p. S381-S387, Aug. 2007.

NEVES, V. A.; SILVA, M. A. Polyphenol oxidase from yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 55, n. 6, p. 2424-30, Mar. 2007.

OJANSIVU, I.; FERREIRA, C. L.; SALMINEN, S. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 22, n. 1, p. 40-46, Jan. 2011.

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

OLIVEIRA, R. B. de et al. Renal toxicity caused by oral use of medicinal plants: the yacon example. **Journal of Ethnopharmacology**, Lausanne, v. 133, n. 2, p. 434-441, 2011.

OZDEMIR, M. et al. Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. **LWT-Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 41, n. 10, p. 2044-2050, Dec. 2008.

PADILHA, V. M. et al. Tempo de secagem e da atividade de óxido-redutases de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) sob tratamento químico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 2178-2184, 2009.

PADILHA, V. M.; ROLIM, P. Perfil sensorial de bolos de chocolate formulados com farinha de yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, n. 3, p. 735-740, 2010.

PARK, J. S. et al. Hypoglycemic effect of yacon tuber extract and its constituent, chlorogenic acid, in streptozotocin-induced diabetic rats. **Biomolecules & Therapeutics**, Bethesda, v. 17, n. 3, p. 256-262, 2009.

PAYNE, A. N.; CHASSARD, C.; LACROIX, C. Gut microbial adaptation to dietary consumption of fructose, artificial sweeteners and sugar alcohols: implications for host-microbe interactions contributing to obesity. **International Association for the Study of Obesity**, London, v. 13, n. 9, p. 799-809, Sept. 2012.

PEDRESCHI, R. et al. Andean yacon root (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. Endl) fructooligosaccharides as a potential novel source of prebiotics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 51, n. 18, p. 5278-5284, Aug. 2003.

PEPPER, T.; OLINGER, P. M. Xylitol in sugar-free confections. **Food Technology**, Oxford, v. 42, n. 10, p. 23-31, 1988.

PRATI, P. et al. Estabilidade dos componentes funcionais de geléia de yacon, goiaba e acerola, sem adição de açúcares. **Brazilian Journal Food Technology**, Campinas, v. 12, n. 4, p. 285-294, 2009.

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**, Westport, v. 36, n. 1, p. 67-73, Feb. 2012.

RIBEIRO, J. D. E. A. **Estudos químicos e bioquímicos do yacon (*Smallanthus sonchifolius*) in natura e processado e influência de seu consumo sobre níveis glicêmicos e lipídeos fecais de ratos**. 2008. 166 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

RODRIGUES, J. et al. Prevention of crown and root caries in adults. **Periodontology 2000**, Copenhagen, v. 55, n. 1, p. 231-249, 2011.

RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons. **Drying Technology**, New York, v. 25, n. 10, p. 1791-1796, Oct. 2007.

ROLIM, P. M. et al. Análise de componentes principais de pães de forma formulados com farinha de yacon (*Smallanthus sonchifolius* (Poepp.) H. Rob.). **Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 1, p. 12-17, 2010.

SANTANA, I.; CARDOSO, M. H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus Sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 3, p. 898-905, 2008.

SCHER, C. F.; RIOS, A. O.; NOREÑA, C. P. Z. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 44, n. 11, p. 2169-2175, Nov. 2009.

SEMINARIO, J.; VALDERRAMA, M.; MANRIQUE, I. **El yacon:** fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio. Lima: Centro Internacional de la Papa, 2003. 60 p.

SILVA, E. B. **Processamento de bebida funcional à base de yacon (*Polymnia sonchifolia* Poepping e Endlicher)**. 2004. 113 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SILVA, R. F. Use of inulin as a natural texture modifier. **Cereal Food World**, Minneapolis, v. 41, n. 10, p. 792-794, Oct. 1996.

SIMAL, S. et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 8774, n. 98, p. 323-336, 1998.

SIMONOVSKA, B. et al. Investigation of phenolic acids in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves and tubers. **Journal of Chromatography A**, Amsterdam, v. 1016, n. 1, p. 89-98, Oct. 2003.

SNART, J. et al. Supplementation of the diet with high-viscosity beta-glucan results in enrichment for lactobacilli in the rat cecum. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 72, n. 3, p. 1925-1931, 2006.

SORIA, A. C.; VILLAMIEL, M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 21, n. 7, p. 323-331, July 2010.

SRITONGTAE, B.; MAHAWANICH, T.; DUANGMAL, K. Drying of osmosed cantaloupe: effect of polyols on drying and water mobility. **Drying Technology**, New York, v. 29, n. 5, p. 527-535, Mar. 2011.

TAKENAKA, M. et al. Caffeic acid derivatives in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Easton, v. 51, n. 3, p. 793-796, Dec. 2003.

TONON, R.; BARONI, A.; HUBINGER, M. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 82, n. 4, p. 509-517, Oct. 2007.

VALENTOVÁ, K. et al. The biological and chemical variability of yacon. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 4, p. 1347-1352, Feb. 2006.

VALENTOVÁ, K. et al. The effect of *Smallanthus sonchifolius* leaf extracts on rat hepatic metabolism. **Cell Biology and Toxicology**, Dordrecht, v. 20, n. 2, p. 109-120, Mar. 2004.

VALENTOVÁ, K.; FRČEK, J.; ULRICHOVÁ, J. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and Maca (*Lepidium meyenii*), traditional andean crops as new functional foods on the european market. **Chemistry Listy**, Praha, v. 95, n. 2, p. 594-601, Dec. 2001.

VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. *Smallanthus Sonchifolius* and *Lepidium meyenii*: prospective andean crops for the prevention of chronic diseases. **Biomedicines Papers**, Chicago, v. 147, n. 2, p. 119-130, 2003.

VICENTE, S.; NIETO, A.; HODARA, K. Changes in structure, rheology, and water mobility of apple tissue induced by osmotic dehydration with glucose or trehalose. **Food and Bioprocess Technology**, Chicago, v. 5, n. 8, p. 3075-3089, 2012.

WONG, J. M. W. et al. Colonic health: fermentation and short chain fatty acids. **Journal of Clinical Gastroenterology**, New York, v. 40, n. 3, p. 235-243, Mar. 2006.

YAN, X. et al. Extraction and identification of antioxidants in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 47, n. 11, p. 4711-4713, Nov. 1999.

YUN, E. Y. et al. A case of anaphylaxis after the ingestion of yacon. **Allergy Asthma Immunology Research**, Yeongtong-Gu, v. 2, n. 2, p. 149-152, 2010.

ZARDINI, E. Ethnobotanical Notes on "Yacon" *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). **Economic Botany**, Bronx, v. 45, n. 1, p. 72-85, 1991.

ZHAO, J. H. et al. Osmotic dehydration pretreatment for improving the quality attributes of frozen mango: effects of different osmotic solutes and concentrations on the samples. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 49, n. 4, p. 1-9, Nov. 2013.

**SEGUNDA PARTE****ARTIGO 1****Osmotic dehydration of yacon slices: effect of different polyols on mass transfer parameters.**

Running title: Effect of different polyols on osmotic dehydration of yacon.

Kamilla Soares de Mendonça<sup>a</sup>, João Renato de Jesus<sup>a</sup>, Michel Cardoso de Angelis Pereira<sup>a</sup>, Jefferson Luiz Gomes Corrêa<sup>a\*</sup>

\*Correspondence to: Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brazil. E-mail: jefferson@dca.ufla.br

<sup>a</sup> Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos, 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brazil.

**(artigo submetido para publicação no International Journal of Food Science and Technology).**

**Summary:** The aim of this study was to evaluate the parameters of mass transfer of different polyols as osmotic agents in the dehydration of yacon slices. The samples were immersed in hypertonic solutions (40 °Brix) of xylitol, maltitol, erythritol, isomalt and sorbitol at 25 °C. The kinetics of solid gain, water loss and water activity of the yacon slices were evaluated over 120 minutes of osmotic dehydration. The effective diffusion coefficients of water and solids were calculated by Fick's model. The results showed that the solid gain was greater in samples treated with solutions of erythritol and lower in isomalt and maltitol solutions. Samples immersed in solutions of sorbitol and xylitol showed intermediate solids gain. The samples treated in solutions of sorbitol, xylitol and erythritol had higher water diffusion coefficients and were more effective at reducing parameters of water loss and water activity than the other polyols.

**Keywords:** *Smallanthus sonchifolius*; polyols; solid gain; water loss; water activity.



## 1. Introduction

Yacon is an edible root originally from the Andean region of South America (Valentová *et al.*, 2006). Due to their high content of fructooligosaccharides (FOS), yacons have been studied for their prebiotic properties (Genta *et al.*, 2009, Ojansivu *et al.*, 2011, Campos *et al.*, 2012). FOS type carbohydrates are low in calories and have a low glycemic index, which contribute to the control of diseases such as obesity and diabetes. (Ojansivu *et al.*, 2011, Pereira *et al.*, 2013).

Yacon is highly perishable; therefore, the development of processing techniques to expand their shelf life and facilitate their commercialisation is needed. Dehydration, a process that reduces water content and the rates of biochemical reactions involved in degradation, is widely used in preserving fruits (Chauhan *et al.*, 2011). However, exposure to elevated temperatures for excessive periods causes a decrease in prebiotics as well as in the nutritional and sensory profile of yacons (Lenart and Dabrowska, 1999). One method to obtain a high quality dehydrated product is to use osmotic dehydration as a pretreatment. Moreover, osmotic dehydration has a lower energy demand during the drying process (Bchir *et al.*, 2012) and improves the quality of the final product (Mujumdar and Law, 2010).

The osmotic dehydration process (OD) occurs due to a chemical potential gradient between the product and the osmotic solution, promoting mass transfer in two main directions: water from the product into the solution and soluble solids from the solution into the product. OD is widely used in the preparation of minimally processed products (Panadés *et al.*, 2003). This technique improves the quality of conventional products (Monnerat *et al.*, 2010) because it preserves the characteristics of a fresh product (colour, flavour, texture, nutrients) and extends the shelf life (Ferrari *et al.*, 2011).

The nature of the osmotic agent and the gradient of the chemical potential are among the factors that determine the efficiency of OD. The composition of the solution determines the degree of the changes that occur in the product during OD. Although it is generally accepted that the solution concentration controls osmotic dehydration efficiency, the molecular size of the solute has an effect on the rate of water loss and solid gain (Sritongtae *et al.*, 2011). Processes involving low molecular weight solutes tend to have higher levels of solids gain (Riva *et al.*, 2005; Chauhan *et al.*, 2011). The chemical potential of an osmotic solution is dependent on its water activity (Labuza, 1975): the higher the gradient of water activity between product and solution, the higher the chemical potential gradient of the system. The chemical potential gradient enhances the driving force for mass transfer, which increases the rates of output water, resulting in a more intense water flow out of the product matrix.

Polyols are solutes increasingly employed in osmotic dehydration processes (Ozdemir *et al.*, 2008; Sritongtae *et al.*, 2011; Chauhan *et al.*, 2011). The main advantage of polyols is that their impregnation in food does not cause an increase in the caloric value or the glycemic index of the product. Therefore, they are recommended for consumption by diabetics and obese persons. The molar mass of the osmotic agent directly affects the ability of the solute to diffuse through the product matrix.

Because the characteristics of osmotic agents may affect dehydrated products differently, this study aimed to evaluate the parameters of mass transfer during osmotic dehydration of yacon slices in the presence of different polyols. The effective diffusivity of water and solids, water loss (WL), solid gain (SG) and the water activity ( $A_w$ ) were analysed over a 2 hour OD process.

## 2. Materials and Methods

### Materials

Yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*) were obtained from a local market (Lavras, Minas Gerais state, Brazil). Roots were visually chosen to guarantee the homogeneity of the sample. The roots were washed, manually peeled and cut into slices of 2.00 x 2.00 x 0.50 cm with the aid of a form, so that the pieces would be considered semi-infinite plates with unidirectional diffusion. After cutting, slices were soaked for 3 minutes in a solution of citric acid 1% (w/v) to avoid enzymatic browning (Reis *et al.*, 2012).

The moisture content of the samples was determined by heating in a vacuum drying oven at 70 °C until constant weight according to the Association of Official Analytical Chemists method (2002).

The osmotic solutions used in each experiment were prepared by mixing distilled water with a low glycemic osmotic agent (xylitol, maltitol, erythritol, isomalt and sorbitol) to give a final concentration of 40 °Brix (°B). The molecular weight of different polyols and the water activity of their solutions at 40 °B are shown in **Table 1**. The osmotic dehydration treatments were carried out in quintuplicate in 250 mL Erlenmeyer flasks in a roots:solution ratio of 1:10 (w/w) (Fernandes *et al.*, 2009). The trials were carried out in a climate controlled chamber set to 25 °C.

The kinetics of osmotic dehydration were measured for each osmotic agent with time points taken at 10, 30, 45, 60, 90 and 120 minutes. After removal from the solution, each osmodehydrated sample was immersed in a cold-water bath for 20 seconds to stop the dehydration process. The surface of each sample was then carefully dried with absorbent paper.

**Table 1** Molecular weight of polyols used as osmotic agents and the water activity of their solutions at 40 °B

Osmotic Agents	Molecular weight* [g.mol <sup>-1</sup> ]	Water activity
Erythritol	122.10	0.928±0.001
Xylitol	152.15	0.931±0.002
Sorbitol	182.17	0.944±0.002
Maltitol	344.31	0.960±0.000
Isomalt	362.32	0.961±0.001

\*Supplier data (Nutramax, Catanduva, São Paulo, Brazil).

Analyses of moisture content and water activity were carried out. Water loss (WL) and solid gain (SG) were calculated in accordance with **Equations (1-2)**, respectively.

$$WL[\%] = \frac{X_0 M_0 - X_f M_f}{M_0} 100 \quad (1)$$

$$SG[\%] = \frac{(M_f x_{sf} - M_0 x_{s0})}{M_0} 100 \quad (2)$$

where:  $M_0$  = initial weight of sample [Kg];  $M_f$  = final weight of sample [Kg];  $X_0$  = initial moisture content, wet basis (w.b.) [Kg/100Kg];  $X_f$  = final moisture content (w.b.) [Kg/100Kg];  $x_{s0}$  = initial soluble solid content [Kg/100Kg] and  $x_{sf}$  = final soluble solid content [Kg/100Kg].

The water activity determination was made on Aqualab equipment (model CX-2T, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, EUA).

The experimental data were used to determine the effective water and solid diffusion coefficients in yacon slices during osmotic dehydration according to Fick's law of diffusion. The solid samples were considered as semi-infinite plates of thickness,  $2L$ . The internal transference of moisture is unidirectional, based on **Equation 3** (Crank, 1975):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial z} \left( D_{eff} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (3)$$

where:  $X$  is the moisture content at instant  $t$ ,  $D_{eff}$  is the effective diffusivity and  $z$  is a generic directional coordinate.

The initial conditions are as follows: the effective diffusivity is a constant, and there is a uniform distribution of the initial amounts of moisture and solids. The boundary conditions are as follows: the superficial moisture and solids content is constant and equal at equilibrium ( $X_e$ ) and there is no external resistance to water exit or to shrinkage of the samples during osmotic dehydration (Corrêa *et al.*, 2010). Considering the initial and boundary conditions, equation 3 is resolved as **Equation 4**, for effective diffusivity of water and **Equation 5** for effective diffusivity of solids:

$$\frac{(X - X_e)}{(X_0 - X_e)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{effw} t}{4L^2} \right] \quad (4)$$

$$\frac{(X - X_e)}{(X_0 - X_e)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{effs} t}{4L^2} \right] \quad (5)$$

where:  $X$  = medium moisture or solids content [Kg/Kg];  $X_e$  = moisture or solids content at the equilibrium state [Kg/Kg];  $X_0$  = initial moisture or solids content [Kg/Kg];  $(X - X_e)/(X_0 - X_e)$  = moisture or solids content ratio, dry basis (d.b.), dimensionless;  $D_{effw}$  = effective diffusivity of water or solids [ $m^2s^{-1}$ ];  $D_{effs}$  = effective diffusivity of solids [ $m^2s^{-1}$ ];  $t$  = time [s]; and  $L$  = characteristic length [m].

The calculations were carried out using a nonlinear estimation procedure by the software Statistica for Windows 8.0<sup>®</sup> from StatSoft, Inc. (Tulsa, OK, USA). The fitting of the model was performed by standard error estimation (SE) (Corrêa *et al.*, 2010). The statistical analyses of the diffusivity coefficients were calculated using the Tukey test conducted at a 5% significance level to compare the means.

### 3. Result and Discussion

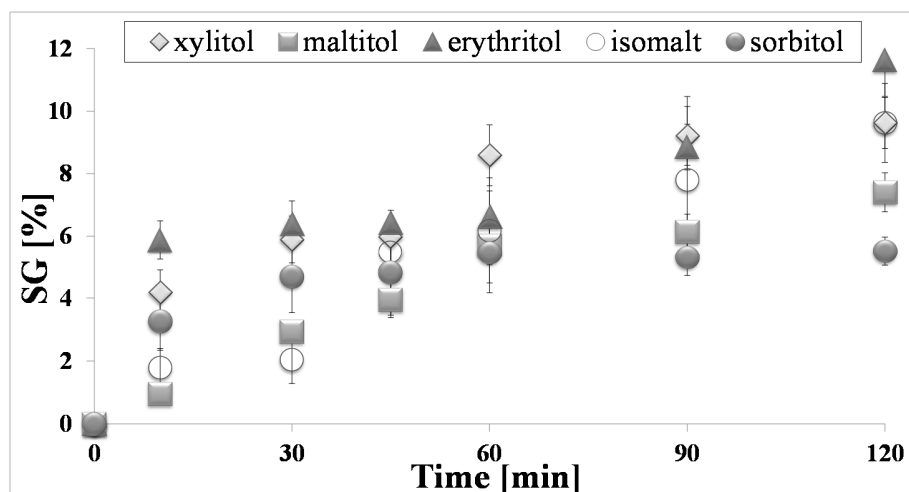
#### Characterisation of Samples

The fresh yacon slices used in the experiments had an average moisture content of  $92.93 \pm 1.15\%$  (w.b.) and a water activity of  $0.985 \pm 0.001$  (Scher *et al.*, 2009, Lago *et al.*, 2012, Pereira, *et al.*, 2013).

#### Kinetics of Mass Transfer

The analysis of the solid gain (SG) rates showed that mass transfer was attenuated after the first hour of osmotic treatment (**Figure 1**). Similar behaviour

was observed in other OD studies (e.g., Maldonado *et al.* (2008) with yacon in sucrose solution 40 °B). The difference in solid gain can be attributed to the size of the molecules of the osmotic agents employed. The smaller the molecule, the more easily it can diffuse through the product matrix. High molecular weight molecules are more likely to be retained on the surface of the tissue, resulting in a low solid gain. On the other hand, smaller molecules diffuse more easily through the product matrix (Chauhan *et al.*, 2011). Samples treated with erythritol stood out due to their solid gain by the end of the OD process ( $11.62 \pm 1.15\%$ ). This result can be attributed to the lower molar weight of erythritol in relation to the other osmotic agents used in this study (**Table 1**). Lower solid gains were observed for samples treated with maltitol and isomalt,  $5.50 \pm 0.46\%$  and  $7.40 \pm 0.62\%$ , respectively. Samples subjected to treatments with sorbitol and xylitol showed solid gain at intermediate levels of  $9.62 \pm 1.26\%$  and  $9.62 \pm 0.81\%$ , respectively. The same relationship was observed by Sritongtae *et al.* (2011) in the osmotic dehydration of cantaloupe with sorbitol and sucrose. They observed a higher solid gain with sorbitol due to the smaller size of the sorbitol molecules.



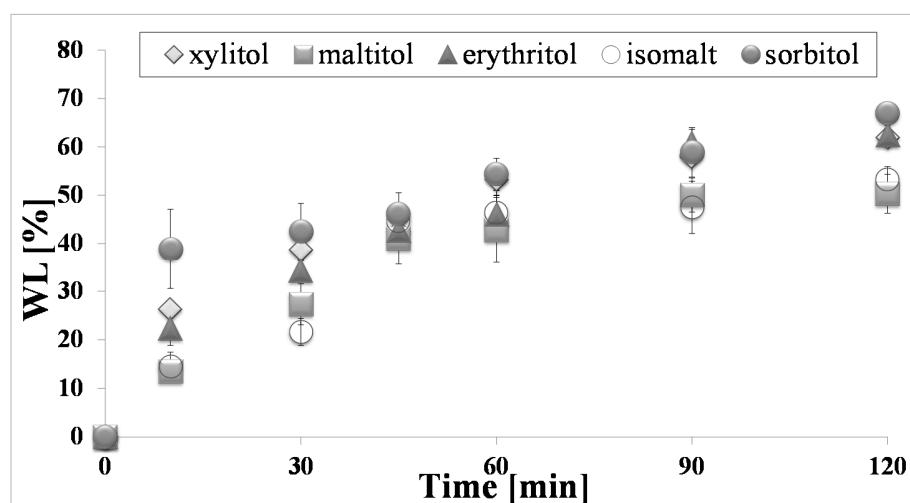
**Figure 1** Kinetics of solid gains of yacon slices during osmotic dehydration by different polyols.

According to Corrêa *et al.* (2010), the lower the solid gain, the better the preservation of the original characteristics of the food. Therefore, the minimisation of solid gain during OD is highly desirable. Hence, the use of erythritol solutions has a distinct disadvantage in food preservation as erythritol causes high levels of solid gain during OD.

Yacon slices subjected to osmotic dehydration with different polyols (**Figure 2**) had the greatest rate of water loss (WL) and SG during the first hour of OD in all treatment groups. Others studies have observed similar results (Maldonado *et al.*, 2008; Mercali *et al.*, 2010). The rate of water loss of the samples was driven by the chemical potential gradient between the sample and the solution. The higher the chemical potential gradient, the more pronounced the water loss. Dehydration kinetics mainly depend on the water activity of the osmotic solution a high difference between water activities of sample and solution results in a greater mass transfer during OD (Galmarini *et al.*, 2008; Allali *et al.*, 2010). At the end of the OD treatment with different polyols, water loss was more pronounced in samples treated with solutions of sorbitol ( $66.95 \pm$



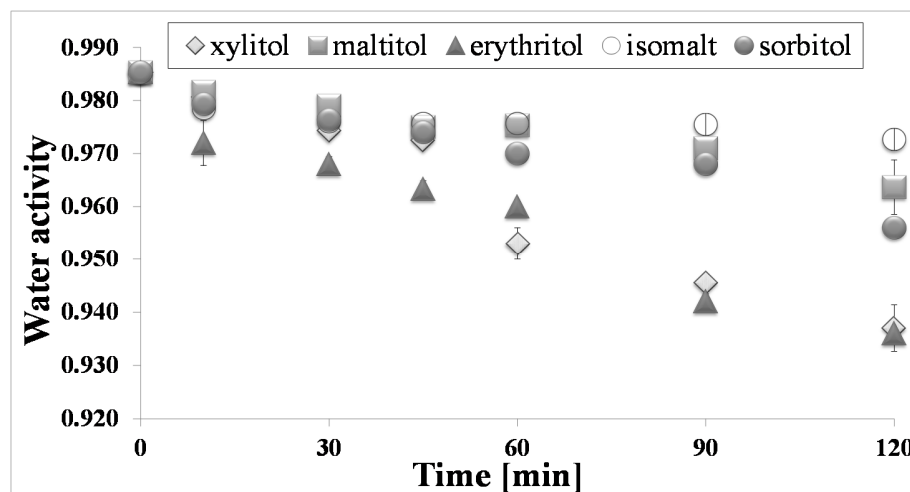
1.08%), erythritol ( $62.43 \pm 1.96\%$ ) and xylitol ( $61.94 \pm 1.88\%$ ) and smaller in samples treated with solutions of isomalt ( $53.25 \pm 2.67\%$ ) and maltitol ( $50.29 \pm 4.01\%$ ). The same relationship was observed by Ferrari and Hubinger (2008) in the osmotic dehydration of melons in solutions of maltose and sucrose.



**Figure 2.** Kinetics of water loss of yacon slices during osmotic dehydration by different polyols.

The water activity of yacon slices during the osmotic dehydration process with different polyols is shown in **Figure 3**. As observed for the other parameters, the first hour of treatment resulted in the greatest reduction of water activity ( $A_w$ ). The reduction of the water activity of the samples was directly correlated to the water activity of each osmotic solution; a larger reduction of  $A_w$  was observed in samples in the presence of solutions with lower water activities (**Table 1**). Thus, a greater reduction of  $A_w$  was observed in solutions with lower molecular weight solutes: erythritol ( $0.936 \pm 0.002$ ), xylitol ( $0.937 \pm 0.004$ ) and sorbitol ( $0.956 \pm 0.001$ ). These solutions also showed higher water loss and solid gain than solutions with higher molecular weight solutes. Samples immersed in solutions with the smaller molecular weight solutes, maltitol and isomalt,

achieved less of a reduction in  $A_w$ ,  $0.964 \pm 0.005$  and  $0.973 \pm 0.002$ , respectively. The reduction of water activity followed the same trend as seen for the water loss of the samples and correlated with the molecular size of the osmotic agent. However, it is noteworthy that the water activities of the solutions are directly related to the molar mass of the solute it is composed of. The water activity of the osmotic solution decreases as the molecular weight of the solute is reduced (Ferrari and Hubinger, 2008).



**Figure 3** Kinetics of water activity reduction of yacon slices during osmotic dehydration by different polyols.

#### Effective Diffusion Coefficients of Water and Solids

The effective diffusion coefficients of water ( $D_{\text{effw}}$ ) and solids ( $D_{\text{effs}}$ ) obtained for the osmotic processing of yacon slices are shown in **Table 2**. The values of diffusion coefficients were found to be in the range of  $10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . These values are in agreement with literature values (Allalli *et al.*, 2010; Uribe *et al.*, 2011). Good correlation was observed between the experiments and the proposed model of the diffusion of water and solids through the yacon matrix.

The regression coefficient ( $R^2$ ) ranged between 0.94 and 0.98 with standard errors (SE) of less than 8%.

**Table 2** Analysis of variance for the effective diffusion coefficients of water ( $D_{\text{effw}}$ ) and for solids ( $D_{\text{effs}}$ ) in yacon slices during osmotic dehydration with different osmotic agents

Osmotic agent	$D_{\text{effw}} \times 10^{-10} [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$	SE	$R^2$	$WL_{\infty} [\%]$	$D_{\text{effs}} \times 10^{-10} [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$	SE	$R^2$	$SG_{\infty} [\%]$
Xylitol	4.17±0.49 <sup>a</sup>	0.04	0.98	64.94±1.88	1.96±0.27 <sup>a</sup>	0.03	0.97	19.61±3.58
Sorbitol	2.89±0.05 <sup>b</sup>	0.08	0.96	67.15±2.40	1.20±0.18 <sup>b</sup>	0.05	0.96	21.40±0.99
Erythritol	2.58±0.73 <sup>bc</sup>	0.03	0.96	68.03±1.69	2.24±0.09 <sup>a</sup>	0.06	0.96	19.61±1.42
Maltitol	1.82±0.71 <sup>cd</sup>	0.06	0.94	57.98±2.85	1.39±0.09 <sup>b</sup>	0.04	0.96	15.73±2.60
Isomalt	1.25±0.18 <sup>d</sup>	0.05	0.96	53.83±1.15	0.90±0.11 <sup>c</sup>	0.04	0.96	18.80±1.97

Values followed by the same letters are not significantly different according to the Tukey test ( $p < 0.05$ ).

The effective diffusivities for the water ( $D_{\text{effw}}$ ) ranged from  $4.17 \pm 0.49 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  to  $1.25 \pm 0.18 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . A larger effective diffusivity coefficient for water was observed in samples treated with xylitol. Samples treated with sorbitol and erythritol showed statistically similar values for  $D_{\text{effw}}$ . The lowest values of  $D_{\text{effw}}$  were observed in solutions of maltitol and isomalt. These results agree with the results of the WL and  $A_w$ , where the major water losses were observed in samples treated in solutions with a greater chemical potential gradient or in solutions with a lower water activity. The lower water activity of the solution resulted in a greater driving force of the process and thus a more vigorous mass transfer, as expressed in the effective diffusivity of water.

The effective diffusivities for solids ( $D_{\text{effs}}$ ) ranged from  $0.90 \pm 0.11 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  to  $2.24 \pm 0.09 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  (**Table 2**). Samples treated with erythritol or xylitol solutions had larger  $D_{\text{effs}}$ , and samples treated with isomalt solutions had smaller  $D_{\text{effs}}$ . These results are in agreement with typical SG trends; high molar weight solutes diffuse quickly through the yacon slice matrix.

#### 4. Conclusions

Rates of osmotic dehydration were greater during the first hour of the process for all osmotic agents. However, osmotic agents of lower molar weight provided greater water loss and reduction in water activity than higher molar weight agents.

Lower solid gain was observed in samples treated with isomalt and maltitol. Nevertheless, these agents have not been the most effective agents in reducing water activity and water loss during the osmotic process. Samples treated with erythritol reached the highest solid gain.

Sorbitol and xylitol were the most effective osmotic agents and are recommended for the osmotic treatment of yacon slices. Sorbitol and xylitol reduced the water activity and the water loss, and they had intermediary values for the effective diffusivities for water and for solid gain from 60 minutes to osmotic process.

#### 5. Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge CAPES, FAPEMIG and CNPq for financial support.

#### References

- A.O.A.C. (2002). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 17th edn. Gaithersburg: William Horwitz.
- Allali, H., Marchal, L. and Vorobiev, E. (2010). Blanching of Strawberry by Ohmic Heating: Effects on the Kinetics of Mass Transfer during Osmotic Dehydration. *Food Bioprocess Technology*, 3 (3), p. 406-414. Available at: DOI: 10.1007/s11947-008-0115-5.

- Bchir, B., Besbes, S., Karoui, R., Attia, H., Paquot, M. and Blecker, C. (2012). Effect of Air-Conditions on Physico-chemical Properties of Osmotically Pre-treated Pomegranate Seeds. *Food Bioprocess Technology*, 5 (5), p. 1840-1852. Available at: DOI: 10.1007/s11947-010-0469-3.
- Campos, D., Betalleluz-Pallardel, I., Chirinos, R., Aguilar-Galvez, A., Noratto, G. and Pedreschi, R. (2012). Prebiotic effects of yacon (*Smilax tuberosa*), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. *Food Chemistry*, 135 (3), p.1592-1599. Available at: DOI:10.1016/j.foodchem.2012.05.088.
- Chauhan, O. P., Singh, A., Singh, A., Raju, P. S. and Bawa, A. S. (2011). Effects of osmotic agents on colour, textural, structural, thermal, and sensory properties of apple slices. *International Journal of Food Properties*, 14 (5), p.1037-1048. Available at:DOI:10.1080/10942910903580884.
- Corrêa, J., Pereira, L., Vieira, G. and Hubinger, M. (2010). Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *Journal of Food Engineering*, 96 (4), p.498-504. Available at: DOI:10.1016/j.jfoodeng.2009.08.032.
- Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. (2<sup>nd</sup>ed.). New York: Oxford University Press.
- Fernandes, F., Gallão, M. and Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90 (2), p.186-190. Available at: DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.021.
- Ferrari, C. C. and Hubinger, M. D. (2008). Evaluation of the mechanical properties and diffusion coefficients of osmodehydrated melon cubes. *International Journal of Food Science and Technology*, 43 (11), p. 2065-2074. Available at: DOI: 10.1111/j.1365-2621.2008.01824.x.
- Ferrari, C. C., Arballo, J. R., Mascheroni, R. H. and Hubinger, M. D. (2011). Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum. *International Journal of Food Science and Technology*, 46 (2), p. 436-443. Available at: DOI :10.1111/j.1365-2621.2010.02510.x.
- Galmarini, M.V., Chirife, J., Zamora, M. C. and Pérez, A. (2008). Determination and correlation of the water activity of unsaturated, supersaturated and saturated trehalose solutions. *LWT – Food Science and Technology*, 41 (4), p. 628-631. Available at: DOI: 10.1016/j.lwt.2007.04.007.
- Genta, S., Cabrera, W., Habib, N., Pons, J., Carillo, I. M., Grau, A. and Sánchez, S. (2009). Yacon syrup: beneficial effects on obesity and insulin resistance in humans. *Clinical nutrition*, 28 (2), p. 182-187. Available at: DOI: 10.1016/j.clnu.2009.01.013.

- Labuza, T. P. (1975). Oxidative changes in foods at low and intermediate moisture levels. In: Duckworth, R. B. *Water relations of foods*. ed. New York: Academic Press, 455p.
- Lago, C. C., Bernstein, A., Brandelli, A. and Noreña. (2012). Characterization of Powdered Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) Juice and Pulp. *Food Bioprocess Technology*, 5 (6), p.2183-2191. Available at: DOI: 10.1007/s11947-011-0617-4.
- Lenart, A. and Dabrowska, R. (1999). Kinetics of osmotic dehydration of apples with pectin coatings. *Drying Technology*, 17 (7-8), p. 1359 - 1373. Available at: DOI:10.1080/07373939908917620.
- Maldonado, S., Santapaola, J. E., Singh, J., Torrez, M. and Garay, A. (2008). Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacon (*Smallanthus sonchifolius*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28 (1), p. 251-256. Available at: DOI: 10.1590/S0101-20612008000100036.
- Mercali, G. D., Tessaro, I. C., Noreña, C. P. Z. and Marczak, L. D. F. (2010). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum.). *International Journal of Food Science and Technology*, 45 (11), p. 2281–2289. Available at: DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02418.x.
- Monnerat, S. M., Pizzi, T. R. M., Mauro, M. A. and Menegalli, F. C. (2010). Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: Concentration profiles and effective diffusion coefficients. *Journal of Food Engineering*, 100 (4), p.604-612. Available at: DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.05.008.
- Mujundar, A. and Law, C. (2010). Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food Bioprocess Technology*, 3 (6), p. 843-852. Available at: DOI: 10.1007/s11947-010-0353-1.
- Ojansivu, I., Ferreira, C. L. and Salimen, S. (2011). Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. *Trends in Food Science & Technology*, 22 (1), p. 40-46. Available at: DOI: 10.1016/j.tifs.2010.11.005.
- Ozdemir, M., Ozen, B. F., Dock, L. L. and Floros, J. D. (2008). Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT –Food Science and Technology*, 41 (10), p. 2044-2050. Available at: DOI: 10.1016/j.lwt.2008.01.010.
- Panadés, G., Chiralt, A., Fito, P., Rodríguez, I., Nuñez, M., Albors, A. and Jiménez, R. (2003). Influence of Operating Conditions on Sensory Quality of Minimally Processed Osmotically Dehydrated Guava. *Journal of Food Quality*, 26 (2), p.91–103. Available at: DOI: 10.1111/j.1745-4557.2003.tb00230.x

- Pereira, J. A. R., Barcelos, M. F. P., Pereira, M. C. A and Ferreira, E. B. (2013). Studies of chemical and enzymatic characteristics of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its flours. *Food Science and Technology*, 33 (1), p. 75-83. Available at: DOI: 10.1590/S0101-20612013005000020.
- Riva, M., Campolongo, S., Leva, A., Maestrelli, A. and Torreggiani, D. (2005). Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Research International*, 38 (5), p.533-542. Available at: DOI: 10.1016/j.foodres.2004.10.018.
- Sritongtae, B., Mahawanich, T. and Duangmal, K. (2011). Drying of osmosed cantaloupe: effect of polyols on drying and water mobility. *Drying Technology*, 29 (5), p.527-535. Available at: DOI: 10.1080/07373937.2010.513615.
- Reis, F. R., Lenzi, M. K., Muñoz, G. I. B, Nisgoski, S. and Masson, M. L. (2012) Vacuum Drying Kinetics of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and Effect of Process Conditions on Fractal Dimension and Rehydration Capacity. *Drying Technology*, 30 (1), p.13-19. Available at: DOI: 10.1080/07373937.2011.611307.
- Scher, C. F., Rios, A. O. and Noreña, C. P. Z. (2009). Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science and Technology*, 44 (11), p. 2169-2175. Available at: DOI: 10.1111/j.1365-2621.2009.02056.x.
- Uribe, E., Miranda, M., Vega-Gálvez, A., Quispe, I., Clavería, R. and Scala, K. (2011). Mass Transfer Modelling During Osmotic Dehydration of Jumbo Squid (*Dosidicus gigas*): Influence of Temperature on Diffusion Coefficients and Kinetic Parameters. *Food Bioprocess Technology*, 4 (2), p. 320-326. Available at: DOI: 10.1007/s11947-010-0336-2.
- Valentová, K., Lebeda, A., Doležalová, I., Jirovský, D., Simonovska, B., Vovk, I. and Kosina, P., Gasmanová, N., Dziechciarková, M. and Ulrichová, J. (2006). The Biological and Chemical Variability of Yacon. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (4), p. 1347-1352. Available at: DOI: 10.1021/jf052645u.

**ARTIGO 2****Otimização da desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de yacon visando a retenção do teor de frutanos**

Título curto: Otimização da DOAU de yacon: retenção de frutanos

Kamilla Soares de Mendonça<sup>a</sup>, Marina Barbosa Vilela<sup>a</sup>, José Guilherme Lembi Ferreira<sup>a</sup>, Michel Cardoso de Angelis Pereira<sup>a</sup>, Jefferson Luiz Gomes Corrêa<sup>a\*</sup>.

\*Correspondência para: Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: jefferson@dca.ufla.br

<sup>a</sup> Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos, 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

**(artigo a ser submetido para publicação no International Journal of Food Science and Technology).**



**Resumo:** Os efeitos do tempo de aplicação de ultrassom ( $t_{us}$ ) e da concentração da solução osmótica (C.S.) durante a desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU) de fatias de yacon foram avaliados com o auxílio da metodologia de superfície de resposta. O experimento foi desenvolvido segundo um delineamento central composto rotacional (DCCR), foi montado um fatorial completo  $2^2$ , com 4 pontos axiais e 5 pontos centrais para cada agente osmótico avaliado (sorbitol e xilitol). Os fatores investigados foram o  $t_{us}$  (0 a 40 minutos) e a C.S. (20 a 60 °B). Avaliou-se os resultados de perda de água (PA), ganho de sólidos (GS), retenção de frutanos (RFru) e atividade de água ( $a_w$ ). A função desejabilidade foi aplicada com o intuito de se obter valores máximos de PA e RFru e mínimos de GS e  $a_w$ . A análise de variância mostrou que o  $t_{us}$  e a C.S. apresentaram efeito significativo no aumento da PA e do GS e na redução da RFru e  $a_w$ , para ambos os agentes osmóticos. A função desejabilidade aplicada aos resultados forneceu pontos de desejabilidade aceitáveis e excelentes, tanto para os tratamentos com sorbitol (0 min; 60 °B) quanto com xilitol (2,67 min; 60 °B).

**Palavras-chave:** *Smallanthus sonchifolius*, frutooligossacarídeos, xilitol, sorbitol.

## 1. Introdução

O yacon (*Smallanthus sonchifolius* [Poepp. & Endl.] H. Robinson ) é um tubérculo originário das regiões andinas da América do Sul (Graefe et al. 2004), mas atualmente é cultivado em diversos países (Ojansivu et al. 2011). O interesse por esse tubérculo aumentou recentemente pela descoberta de suas propriedades prebióticas e hipoglicemiantes, associadas ao alto conteúdo de frutanos do tipo frutooligossacarídeos (FOS) em suas raízes (Genta et al. 2009; Bibas Bonet et al. 2010; Campos et al. 2012; Moura et al. 2012). Devido à elevada atividade de água e às rápidas reações de despolimerização dos frutanos que ocorrem após a colheita (Narai-Kanayama et al. 2007; Fukai et al. 1997) o yacon tem vida útil bastante curta. O processamento dos tubérculos de yacon em temperaturas superiores a 70 °C mostrou importante redução do conteúdo dos frutooligossacarídeos, por decomposição da molécula em açúcares simples (Lago et al. 2012; Scher et al. 2009), que não detêm as propriedades benéficas do FOS.

Desidratação osmótica (DO) é um processo utilizado para a remoção parcial da umidade de diversos vegetais (Ferrari & Hubinger 2008; Noshad et al. 2012; Nowacka et al. 2014). A preservação de nutrientes é uma das características atribuídas à DO. Como a remoção da umidade é promovida pelo gradiente de potencial químico entre a amostra e a solução, esse processo não envolve mudança de estado físico e temperaturas elevadas, minimizando danos térmicos aos componentes do alimento (Therdthai et al. 2011). No entanto, simultaneamente à remoção da umidade, o gradiente de potencial químico também promove a migração dos sólidos presentes na solução osmótica para o interior da matriz do alimento, podendo promover alterações indesejáveis em sua composição (Corrêa et al. 2010).

A taxa de penetração do soluto depende da natureza e da concentração do agente osmótico, além das condições em que ocorre a DO. Diferentes agentes osmóticos podem atribuir características distintas ao produto ao desidratá-lo. A utilização de substitutos de sacarose, como o sorbitol e o xilitol, tem sido feita em diversos trabalhos de desidratação osmótica (Ozdemir et al. 2008; Sritongtae et al. 2011; Chauhan et al. 2011; Mendonça et al. 2013). Além de menores teores de calorias que a tradicional sacarose, eles não contribuem para o aumento do índice glicêmico do produto, favorecendo consumidores diabéticos e obesos.

A associação da energia ultrassônica em sistemas de desidratação osmótica tem se mostrado eficiente na intensificação da transferência de massa (Li et al. 2012), mas seus efeitos dependem das características do produto em que são aplicadas. Em geral, ela produz séries alternadas de compressões e descompressões na matriz do produto, fenômeno conhecido como “efeito esponja”. O efeito esponja cria microcanais na estrutura do produto e as forças envolvidas nesse mecanismo podem ser maiores que a tensão superficial que mantém as moléculas de água nos capilares do produto (Garcia-Noguera et al. 2010). Essas alterações facilitam a liberação de água da parte interna do alimento e a entrada de fluido do meio externo. Quando a energia ultrassônica aplicada atinge um limiar inerente de cada sistema, os gases oclusos no interior da matriz do produto geram bolhas de cavitação. O desenvolvimento dessas bolhas causa o seu colapso. O colapso das bolhas de cavitação é caracterizado por pontos de altíssima pressão e temperatura e o surgimento de microjatos que injetam solução na superfície do produto. Tanto o efeito esponja quanto a ocorrência de microjatos e a formação de microcanais na estrutura do produto reduzem a resistência interna e externa à transferência de massa, intensificando os efeitos da desidratação osmótica (Cárcel et al. 2012). Não existem trabalhos anteriores que relatem o comportamento de frutanos em sistemas de DOAU.

O objetivo deste trabalho foi otimizar o processamento de fatias de yacon por desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU) quanto aos parâmetros da concentração osmótica das soluções (C.S.) de sorbitol e xilitol e o tempo de aplicação de ultrassom ( $t_{us}$ ) no início da DOAU; através da avaliação dos parâmetros de transferência de massa e retenção de frutanos nas fatias ao fim da desidratação osmótica com sorbitol e com xilitol.

## 2. Material e Métodos

### Matéria-prima e preparo das amostras

Os tubérculos de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) foram adquiridos no comércio local de Lavras, M.G., Brasil, entre os meses de julho e novembro de 2013. As raízes foram selecionadas visualmente quanto a danos mecânicos para que fosse garantida a uniformidade das amostras. Os tubérculos foram lavados, descascados manualmente e cortados em fatias de 2,00 x 2,00 x 0,50 cm, com o auxílio de um cortador de aço inox. Após o corte, as fatias foram imersas por 3 minutos em solução de ácido cítrico 1% a fim de que o escurecimento enzimático fosse inibido (Reis et al. 2012).

### Experimentos de desidratação osmótica

Os processos de desidratação osmótica foram executados paralelamente, um utilizando o sorbitol como agente osmótico, e outro empregando o xilitol. A concentração osmótica de cada solução seguiu o planejamento experimental descrito a seguir (**Tabelas 1a e 1b**). Para todos os ensaios a proporção solução:amostra foi superior a 10:1 (massa:massa) a fim de que a diluição significativa da solução proporcionada pela saída de água das amostras fosse evitada (Fernandes et al. 2008 a; Garcia-Noguera et al. 2010). Fatias de yacon (totalizando aproximadamente 150g) foram colocadas em suportes de rede de

nylon, a fim de garantir que permanecessem individualizadas e completamente submersas na solução osmótica. Para a aplicação das ondas ultrassônicas cerca de 7000 mL de solução osmótica foi colocada diretamente na câmara do banho ultrassônico (Unique, modelo USC 2850A, Indaiatuba, Brasil), onde as amostras foram introduzidas. Aplicou-se densidade de potência ultrassônica de  $8 \text{ kWm}^{-3}$  determinada segundo metodologia de Fernandes et al. (2008 b) e frequência de 25 kHz (Garcia-Noguera et al. 2010). A temperatura da solução foi mantida em  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  durante todo o tratamento osmótico com o auxílio de bolsa de gelo para evitar extrapolação da temperatura limite. Todos os tratamentos osmóticos tiveram duração total de 40 minutos, o tempo de aplicação das ondas ultrassônicas no início do processo foi definido pelo planejamento experimental (**Tabelas 1a e 1b**). Ao fim do processo de desidratação, as amostras foram imersas em água gelada ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para cessar a desidratação e retirada do excesso de solução da superfície. Em seguida, foram secas com papel absorvente para remoção da umidade superficial e as análises se procederam.

#### Métodos analíticos

O conteúdo de umidade, a atividade de água ( $a_w$ ), a retenção de frutanos (RFru), a perda de água (PA) e o ganho de sólidos (GS) foram determinados.

O teor de umidade das amostras foi avaliado em quintuplicata por método gravimétrico de secagem em estufa a vácuo (Solab modelo SL 104/12, Piracicaba, Brazil) a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  até peso constante, de acordo com a metodologia A.O.A.C. (2002).

A atividade de água foi determinada em equipamento Aqualab (modelo CX- 2T, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, EUA) em triplicata.

O teor de frutanos foi avaliado em duplicata de acordo com metodologia enzimática-espectrofotométrica (Megazyme Fructan Assay Procedure, Megazyme, Bray, Ireland) correspondente à modificação do método 999.03 da

AOAC (Megazyme Fructan HK Procedure). Após o processamento, as amostras destinadas à determinação de frutanos foram imediatamente congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas por até 10 dias em ultrafreezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ . O cálculo da retenção de frutanos (RFru) após o processamento desconsiderou a porção de matéria seca oriunda da ganho de sólidos da solução osmótica e considerou as variações pertinentes a diferentes lotes de amostras (Oliveira 2013). O valor da RFru foi calculado com base na quantidade de frutanos presente em amostras in natura de cada lote.

As variáveis resposta perda de água (PA) e ganho de sólidos (GS) foram determinadas utilizando a massa das fatias de yacon antes e após a desidratação osmótica (DO), assim como o conteúdo de umidade (base úmida) antes e após o processo (Garcia-Noguera et al. 2010; Corrêa et al. 2010). PA e GS foram calculados de acordo com as **Equações 1 e 2**:

$$PA[\%] = \frac{X_0 M_0 - X_f M_f}{M_0} 100 \quad (1)$$

$$GS[\%] = \frac{(M_f x_{sf} - M_0 x_{s0})}{M_0} 100 \quad (2)$$

onde,  $M_0$  = massa inicial da amostra [g];  $M_f$  = massa final da amostra [g];  $X_0$  = conteúdo de umidade inicial, base úmida (b.u.) [g/g de amostra];  $X_f$  = conteúdo de umidade final, (b.u.) [g/g de amostra];  $x_{s0}$  = conteúdo inicial de matéria seca [g/g de amostra] e  $x_{sf}$  = conteúdo final de matéria seca [g/g de amostra].

### Delineamento experimental

Para a otimização do processo de desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU) de fatias de yacon estabeleceu-se um planejamento experimental (Rodrigues & Iemma 2012). Foi feito um delineamento composto central rotacional (DCCR), sendo um fatorial completo  $2^2$ , incluindo 4 pontos axiais e 5 repetições no ponto central, totalizando 13 ensaios. Os níveis utilizados e os ensaios experimentais se encontram na **Tabela 1a**, para os ensaios com sorbitol e na **Tabela 1b** para os ensaios com xilitol. Foram realizados dois planejamentos completos com relação às variáveis independentes: tempo de aplicação do ultrassom ( $t_{us}$ ) (0 a 40 min), concentração da solução osmótica (C.S.) (20 a 60 °Brix), diferindo o tipo de solução (sorbitol e xilitol). Totalizando 26 experimentos.

O seguinte modelo polinomial de segunda ordem foi utilizado para ajustar os dados experimentais, **Equação 3**:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 t_{us} + \beta_2 C.S. + \beta_{11} t_{us}^2 + \beta_{22} C.S.^2 + \beta_{12} t_{us} C.S. + \varepsilon \quad (3)$$

onde:  $Y_i$  é o valor predito da variável resposta (PA, GS, RFru,  $a_w$ );  $t_{us}$  e C.S são as variáveis independentes;  $\beta_0$  é o valor da resposta ajustada ao ponto central do planejamento (i.e., ao ponto 0,0);  $\beta_1$  são os coeficientes lineares;  $\beta_{11}$  e  $\beta_{22}$  são os coeficientes quadráticos;  $\beta_{12}$  é o coeficiente da interação entre as variáveis independentes;  $\varepsilon$  é o erro experimental.

### Análises estatísticas

A significância dos modelos gerados foi testada através de análise de variância (ANOVA), teste-F e valor do coeficiente de correlação ( $R^2$ ), a fim de verificar a significância dos modelos propostos,  $p$ -valor < 0,05 e  $R^2$  > 0,85 (Vieira et al. 2012) com o auxílio do software Statistica Versão 8.0 (StatSoft, Inc.,

Tulsa, OK, EUA) (STATISTICA 2008). Foram considerados os modelos completos para a predição da condição ótima da DOAU de fatias de yacon, uma vez que cada variável resposta é influenciada por diferentes fatores, a condição final depende de todos os fatores (Oliveira 2013).

Processo de otimização: função desejabilidade

O processo de otimização através da função desejabilidade foi utilizado para se obter as condições ótimas da DOAU de fatias de yacon em processos utilizando sorbitol ou xilitol. A abordagem geral da função desejabilidade transforma cada variável resposta estimada ( $Y_i$ ) em um valor de desejabilidade ( $d_i$ ), onde  $0 < d_i < 1$ . Através dessa função são atribuídas escalas de desejabilidade, na qual  $d_i=0$  é aplicada para uma resposta indesejável, enquanto  $d_i=1$ , para uma resposta desejável. As pontuações individuais dos valores preditos de cada variável dependente são combinados na função desejabilidade ( $D$ ), onde  $0 < D < 1$  através da média geométrica dos diferentes valores de  $d_i$  (Derringer & Suich 1980), **Equação 4:**

$$D = \left( d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

onde:  $d_i$ : desejabilidade da resposta. O formato da função desejabilidade depende dos objetivos dos experimentos, cada resposta ( $Y_i$ ) pode ser maximizada ou minimizada, ou ainda apresentar-se na forma ideal de desejabilidade (Derringer & Suich 1980). No presente estudo a função desejabilidade foi desenvolvida a fim de se maximizar PA e RFru e minimizar GS e  $a_w$  das fatias de yacon.



### 3. Resultados e Discussão

As amostras frescas de yacon utilizadas nos experimentos apresentaram teores médios de umidade de  $91,60 \pm 0,52$ g/100g de amostra, atividade de água de  $0,991 \pm 0,020$  e sólidos solúveis totais de  $12,0 \pm 0,5$  °B. Esses valores são próximos aos observados por Kotovicz et al. (2013), umidade de  $88,0 \pm 10,2$ g/100g e  $12,2 \pm 2,4$  °B e por Pereira et al. (2013), umidade de  $87,5 \pm 4,5$ g/100g e  $15 \pm 2$  °B. O conteúdo de frutanos das amostras frescas de yacon foi de  $60,47 \pm 5,48$ g/100g de matéria seca, esses valores são próximos aos relatados em trabalhos anteriores com yacon (Itaya et al. 2002; Campos et al. 2012; Oliveira 2013).

#### Análises estatísticas

Os resultados experimentais dos efeitos das variáveis independentes tempo de aplicação do ultrassom ( $t_{us}$ ) e concentração da solução osmótica (C.S.) sobre funções resposta (PA, GS, RFru e  $a_w$ ) para os procedimentos com sorbitol e xilitol são apresentados nas **Tabelas 1a e 1b**.

**Tabela 1a** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais e desvios padrões das variáveis resposta das fatias de yacon tratadas com sorbitol

t <sub>us</sub> [min]	C.S. [°B]	PA [%]	GS [%]	RFru [%]	a <sub>w</sub>
5,858 (-1)	25,858 (-1)	34,39±2,05	1,90±0,62	61,17±4,65	0,976±0,002
34,142 (1)	25,858 (-1)	38,23±1,27	2,20±0,96	42,73±3,82	0,973±0,003
5,858 (-1)	54,142 (1)	48,73±2,09	2,47±1,15	59,10±3,55	0,952±0,005
34,142 (1)	54,142 (1)	53,43±1,36	3,75±0,34	40,19±6,66	0,949±0,007
0 (-1,4142)	40 (0)	44,82±2,12	2,35±0,77	64,42±4,87	0,975±0,001
40 (1,4142)	40 (0)	50,18±2,06	3,24±0,78	30,32±6,84	0,963±0,002
20 (0)	20 (-1,4142)	30,20±1,54	2,21±0,96	56,52±6,59	0,975±0,002
20 (0)	60 (1,4142)	51,59±0,95	4,20±0,69	50,56±5,71	0,952±0,005
20 (0)	40 (0)	45,20±2,06	3,54±0,20	45,84±4,62	0,973±0,001
20 (0)	40 (0)	46,06±1,45	3,50±0,26	42,19±4,28	0,973±0,001
20 (0)	40 (0)	46,03±1,32	3,50±0,24	45,15±5,95	0,974±0,003
20 (0)	40 (0)	46,27±1,91	3,50±0,32	43,92±4,52	0,973±0,001
20 (0)	40 (0)	45,56±1,54	3,59±0,50	43,90±6,09	0,974±0,002

Min: minutos; °B: Brix; t<sub>us</sub>: tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; PA: perda de água; GS: ganho de sólidos; RFru: retenção de frutanos; a<sub>w</sub>: atividade de água. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.

**Tabela 1b** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais e desvios padrões das variáveis resposta das fatias de yacon tratadas com xilitol

t <sub>us</sub> [min]	C.S. [°B]	PA [%]	GS [%]	RFru [%]	a <sub>w</sub>
5,858 (-1)	25,858 (-1)	35,04±1,50	3,05±0,25	66,06±3,65	0,978±0,002
34,142 (1)	25,858 (-1)	38,74±0,78	3,33±0,75	49,57±3,21	0,974±0,001
5,858 (-1)	54,142 (1)	52,15±3,38	4,09±0,92	65,54±5,45	0,962±0,001
34,142 (1)	54,142 (1)	55,15±2,93	5,79±0,89	43,55±7,23	0,956±0,003
0 (-1,4142)	40 (0)	40,16±3,12	4,09±0,71	67,57±5,32	0,971±0,000
40 (1,4142)	40 (0)	47,98±5,21	5,54±0,34	24,96±3,91	0,969±0,002
20 (0)	20 (-1,4142)	30,82±0,48	3,45±0,28	64,81±6,31	0,980±0,002
20 (0)	60 (1,4142)	49,96±3,72	7,48±0,60	56,18±5,87	0,958±0,001
20 (0)	40 (0)	45,13±2,28	7,20±0,68	59,67±4,91	0,964±0,002
20 (0)	40 (0)	44,82±2,52	7,23±0,61	50,76±5,27	0,964±0,001
20 (0)	40 (0)	45,43±3,26	7,27±0,25	59,68±4,22	0,963±0,001
20 (0)	40 (0)	42,20±3,10	7,37±0,18	51,33±6,13	0,963±0,003
20 (0)	40 (0)	42,69±3,04	7,49±0,55	54,41±5,05	0,964±0,001

Min: minutos; °B: Brix; t<sub>us</sub>: tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; PA: perda de água; GS: ganho de sólidos; RFru: retenção de frutanos; a<sub>w</sub>: atividade de água. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.

Os coeficientes de regressão de cada modelo gerado e sua significância estatística (p-valor) são apresentados nas **Tabelas 2a** e **2b**. As análises de

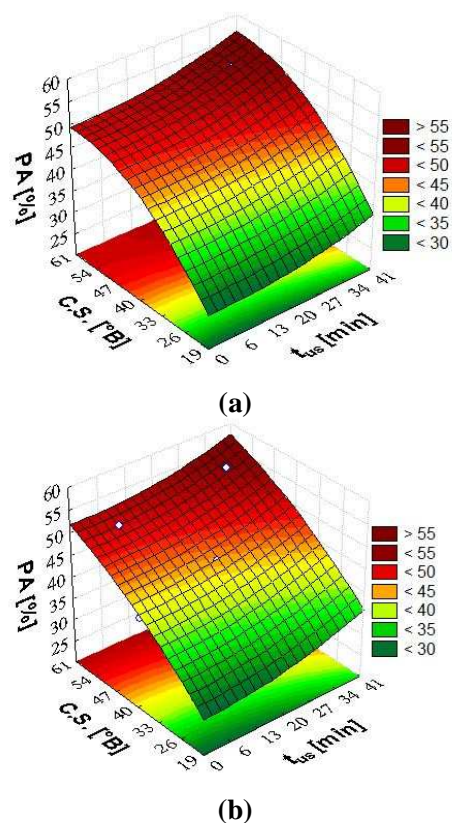
variância (ANOVA) foram conduzidas para determinar a significância das variáveis do processo para cada resposta. Os modelos propostos mostraram-se adequados, apresentando significância estatística e valores satisfatórios de  $R^2$  (**Tabela 3**). Os valores de  $R^2$  para as respostas de sorbitol e xilitol foram superiores a 0,90, indicando que os modelos de regressão explicam boa parte da variação dos dados de DOAU.

Na apresentação dos coeficientes obtidos com o modelo polinomial proposto são utilizados os subíndices “s”, referentes a tratamentos com sorbitol e “x”, indicando tratamentos com xilitol.

#### Perda de água

A magnitude dos p-valores da **Tabela 2a** revelaram que todos os termos lineares dos efeitos de  $t_{us}$  e C.S. tiveram efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para perda de água durante a DOAU, tanto para amostras tratadas com sorbitol quanto xilitol. A magnitude relativa dos coeficientes de regressão (CR) mostrou que o efeito da concentração ( $\beta_s = 7,473$ ;  $\beta_x = 7,573$ ) foi superior ao efeito do tempo de aplicação do ultrassom ( $\beta_s = 2,014$ ;  $\beta_x = 2,221$ ) para ambos os agentes osmóticos. Entretanto, tanto a concentração da solução osmótica quanto o tempo de aplicação do US contribuíram positivamente para o aumento da perda de água das amostras ( $\beta > 0$ ). O efeito quadrático foi significativo apenas para as amostras tratadas com sorbitol, ainda assim, seu efeito foi menor quando comparado com o termo linear. Os demais termos quadráticos e a interação entre os termos não apresentaram significância estatística.

As superfícies de resposta geradas pelo modelo proposto (**Figura 1**) permitem observar o aumento da perda de água promovido pelo aumento do tempo de aplicação do ultrassom e pela concentração da solução osmótica de sorbitol (a) e de xilitol (b).



**Figura 1** Superfícies de resposta para perda de de água (PA) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b).

O aumento da concentração promoveu intensificação da saída de água da amostra, como esperado teoricamente, com o aumento do gradiente de pressão osmótica entre as amostras e a solução osmótica (Arballo et al. 2012). Em trabalho de desidratação osmótica ordinária de yacon em solução de frutose a concentração da solução osmótica apresentou efeito positivo significativo sobre a PA (Kotovicz et al. 2013). O efeito do tempo de aplicação do ultrassom aumentando a PA foi observado em DOAU de melão (Fernandes et al. 2008 a), abacaxi (Fernandes et al. 2009), manga (Kek et al. 2013) e kiwi (Nowacka et al. 2014).

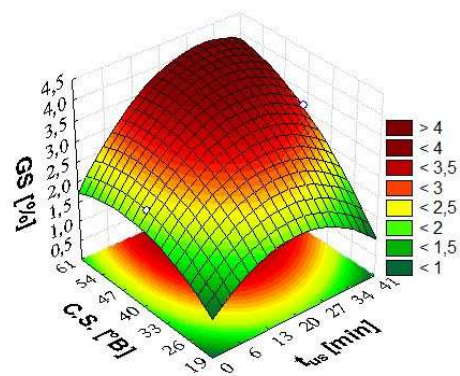
A intensificação da saída de água pode ser atribuída à redução de resistência interna à transferência de massa, proporcionada pelas ondas ultrassônicas. A redução da resistência interna por efeito da sonicação ocorre através de séries alternadas de compressões e expansões (efeito esponja) que ocorrem na matriz do produto. Esse processo mecânico envolve forças que podem ser superiores à tensão superficial que mantêm a umidade no interior dos capilares do produto, criando canais microscópicos que tornam mais fácil a remoção da água (Fernandes et al. 2008 a; Cárcel et al. 2012; Li et al. 2012). Além disso, a formação de microcanais no tecido de diversos frutos foi relatada em estudos com DOAU, esse fenômeno contribui para facilitar a transferência de massa no sistema (Garcia-Noguera et al. 2010).

#### Ganho de sólidos

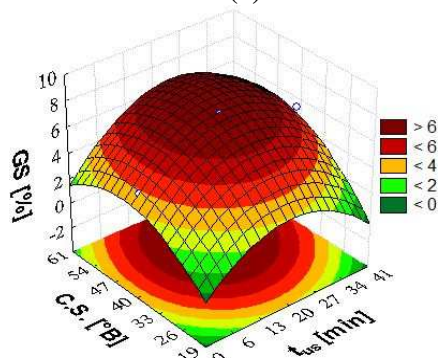
Conforme observado nas **Tabelas 1a e 1b**, as amostras tratadas com xilitol apresentaram maior ganho de sólidos (3,046% a 7,494%) do que aquelas tratadas com sorbitol (1,901% a 4,198%). Observou-se maior efeito da concentração de xilitol ( $\beta_x=1,150$ ) no aumento do GS, quando comparado com a concentração de sorbitol ( $\beta_s=0,615$ ). As respostas de ganho de sólidos foram positivamente relacionadas ao efeito linear da C.S., para ambos agentes osmóticos, com  $p<0,05$  (**Tabela 2a**). Kotovicz et al. (2013) observaram efeito positivo da concentração da solução osmótica sobre o ganho de sólidos de fatias de yacon durante desidratação osmótica ordinária utilizando frutose. Essa influência pode ser atribuída ao gradiente de concentração entre a solução e o produto, proporcionado por maiores concentrações de soluto, que resultam em altas taxas de difusão para o interior da amostra (Mundada et al. 2010). O destaque dos tratamentos com xilitol nas respostas de ganho de sólidos pode estar associado ao fato do peso molecular do xilitol (152,146 g/mol) ser menor que o peso molecular do sorbitol (182,172 g/mol), uma vez que moléculas

menores exercem mais facilmente a difusão através da matriz do produto (Rózek et al. 2009; Chauhan et al. 2011; Sritongtae et al. 2011). Relação semelhante entre maltose e sacarose foi observada para DO de melões (Ferrari & Hubinger 2008). O efeito quadrático da concentração foi observado apenas em amostras tratadas com xilitol.

O  $t_{us}$  apresentou efeito linear significativo ( $p_s=0,005$ ) para amostras com sorbitol, as amostras submetidas a xilitol, no entanto, não tiveram efeito linear significativo do tempo de aplicação de ultrassom ( $p_x=0,065$ ). Em experimentos de DOAU de marmelo com sacarose também não foi encontrado efeito linear significativo do tempo de aplicação do ultrassom sobre o GS, apenas efeito quadrático dessa variável (Noshad et al. 2012). O efeito quadrático do  $t_{us}$  foi observado para ambos os agentes osmóticos. A influência do ultrassom no aumento do ganho de sólidos é devida à cavitação, que quando aplicada em sistemas sólido-líquidos reduz a resistência externa à transferência de massa. A implosão das bolhas geradas pela cavitação, quando próximas à superfície da amostra, promove a formação de microjatos em direção à essa superfície que tendem a contribuir para o incremento do ganho de sólidos das amostras por microinjeção do soluto (Mason & Lorimer 2002; Cárcel et al. 2012). Além disso, o efeito do  $t_{us}$  pode ser devido à microcanais formados pela aplicação de ondas ultrassônicas por distorção ou colapso celular e descritos como facilitadores de transferência de massa (Garcia-Noguera et al. 2010; Li et al. 2012). As superfícies de respostas para o ganho de sólidos de amostras submetidas a sorbitol (a) e xilitol (b) permitem observar o comportamento dessa variável sobre efeito do  $t_{us}$  e da C.S. (**Figura 2**).



(a)



(b)

**Figura 2** Superfícies de resposta para ganho de sólidos (GS) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b).

#### Retenção de Frutanos

A aplicação de ultrassom e a concentração da solução osmótica contribuíram para reduzir a retenção de frutanos nas amostras de yacon. O  $t_{us}$  apresentou efeito linear negativo para a retenção de frutanos (**Tabela 2b**) tanto de amostras tratadas com sorbitol como daquelas desidratadas em solução de xilitol. A C.S. foi significativa apenas para os tratamentos com sorbitol, o aumento da concentração da solução osmótica de sorbitol contribuiu para reduzir a retenção frutanos nas fatias de yacon e apresentou significância dos efeitos linear e quadrático. A interação não apresentou significância em nenhum dos

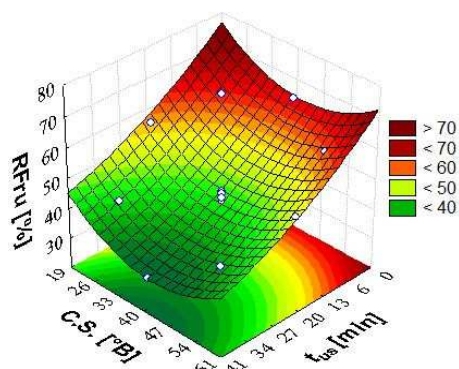
agentes osmóticos ( $p > 0,05$ ). O efeito do  $t_{us}$  ( $\beta_s = -10,698$ ;  $\beta_x = -12,343$ ) sobre a retenção de frutanos foi maior que o efeito da concentração da solução osmótica ( $\beta_s = -1,630$ ;  $\beta_x = -2,344$ ).

A despolimerização de frutanos por hidrólise foi descrita em trabalhos que observaram formação de moléculas de menor peso molecular, como açúcares redutores, glicose e frutose em detrimento dos teores de inulinas, como o FOS (Kim et al. 2001; Lago et al. 2012). A degradação das moléculas dos frutooligossacarídeos por ação das ondas ultrassônicas pode estar relacionada à cavitação. Esse fenômeno age sobre carboidratos reduzindo seu peso molecular, por formação de radicais livres e efeitos mecanoquímicos (Czechowska-Biskup et al. 2005; Stojanovic & Silva 2007; Iida et al. 2008; Jambrak et al. 2010; Pingret et al. 2013). Segundo Popa-Nita et al. (2009), a sonicação induz à despolimerização por mecanismos que atuam primeiramente quebrando as cadeias poliméricas e, em seguida, reduzindo a sua polidispersidade. A despolimerização causada pela sonicação foi observada em diversos polissacarídeos, como dextranas (Lorimer et al. 1995), pululanas (Koda et al. 1994), quitosana (Czechowska-Biskup et al. 2005), ácido hialurônico (Miyazaki et al. 2001), xiloglucana (Vodeničarová et al. 2006) e amido de diversas fontes (Iida et al. 2008).

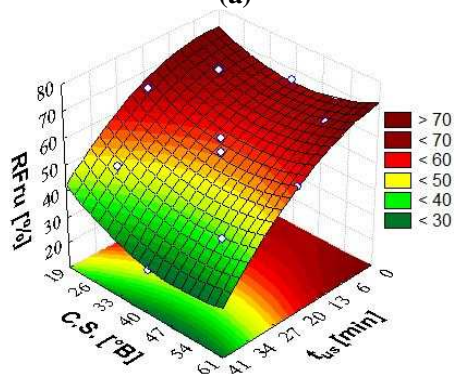
Segundo o trabalho de Baxter et al. (2005) o tempo de aplicação do ultrassom aumentou a degradação de quitosana, fato constatado pela redução da viscosidade da solução. O efeito da concentração de sorbitol na diminuição da retenção de frutanos nas fatias de yacon após desidratação osmótica pode ser atribuída a processos de lixiviação. Devido ao fluxo intenso de saída de água promovido pelo elevado gradiente de pressão osmótica entre amostra e solução, uma fração dos frutanos pode ter se solubilizado e ter sido lixiviada em direção à solução osmótica (Devic et al. 2010).



As superfícies de resposta geradas pelos modelos propostos permitem observar a grande influência do  $t_{us}$  na variação da retenção de frutanos em tratamentos com sorbitol (a) e xilitol (b), além do efeito da C.S. em tratamentos com sorbitol, **Figura 3**.



(a)



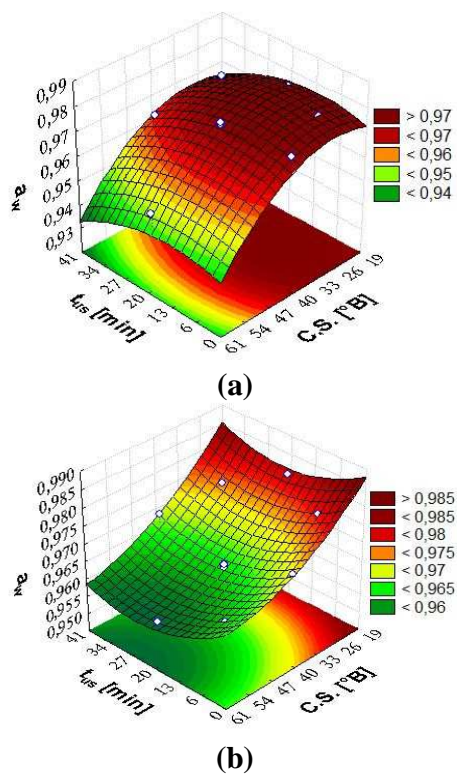
(b)

**Figura 3** Superfícies de resposta para retenção de frutanos (RFru) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b).

#### Atividade de água

A resposta de atividade de água das fatias de yacon após DOAU apresentou efeito linear significativo negativo tanto de  $t_{us}$  ( $p_s=0,041$ ;  $p_x=0,022$ ) como da C.S. ( $p_s=p_x<0,001$ ), os efeitos quadráticos também foram significativos

(**Tabela 2b**). Os efeitos da C.S. ( $\beta_s=-0,010$ ;  $\beta_x=-0,008$ ) foram mais intensos que os efeitos do  $t_{us}$  ( $\beta_s=-0,003$ ;  $\beta_x=-0,002$ ) na redução da  $a_w$  das fatias de yacon após DOAU. Menores índices de atividade de água promovem a extensão da vida útil e a preservação dos alimentos, devido à minimização das alterações físicas, químicas e microbiológicas (Lee & Lim 2011), no entanto os níveis de  $a_w$  apresentados após tratamentos de DO não são suficientemente baixos para promover a estabilidade do produto, que ocorre em  $a_w < 0,60$  (Tonon et al. 2007; Fennema et al. 2010), fazendo-se necessário tratamento posterior para que a preservação do produto seja efetiva. A redução da atividade de água de fatias de yacon com o aumento da concentração das soluções osmóticas e com o tempo de aplicação das ondas ultrassônicas ocorre devido à intensificação das transferências de massa proporcionada por essas condições de processo. Por isso, a atividade de água apresentou comportamento semelhante aos parâmetros de PA e GS, prevalecendo até mesmo a maior influência da C.S. frente ao  $t_{us}$ . As amostras tratadas com xilitol apresentaram redução mais intensa da atividade de água, quando comparada com aquelas submetidas a sorbitol (**Tabelas 1a e 1b**). Esse fato pode ser atribuído ao ganho de sólidos intenso promovido pelo xilitol, que, uma vez incorporado em maior quantidade na amostra desidratada osmoticamente, contribuiu para a redução da  $a_w$  (Kotovicz et al. 2013). As superfícies de resposta geradas pelos modelos propostos permitem observar a influência da C.S e do  $t_{us}$  na variação da atividade de água em tratamentos com sorbitol (a) e xilitol (b).



**Figura 4** Superfícies de resposta para atividade de água ( $a_w$ ) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) e com solução de xilitol (b).

**Tabela 2a** Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis PA e GS observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

	Sorbitol			
	Perda de água (PA)		Ganho de sólidos (GS)	
	CR	p-valor	CR	p-valor
Intercepto	45,824	<0,001*	3,528	<0,001*
$\beta_1$	2,014	<0,001*	0,353	0,005*
$\beta_{11}$	0,711	0,004*	-0,471	0,002*
$\beta_2$	7,473	<0,001*	0,615	<0,001*
$\beta_{22}$	-2,589	<0,001*	-0,267	0,026
$\beta_1 \beta_2$	0,216	0,373	0,245	0,091
	Xilitol			
Intercepto	44,052	<0,001*	7,313	<0,001*
$\beta_1$	2,221	0,026*	0,505	0,065
$\beta_{11}$	0,770	0,394	-1,517	<0,001*
$\beta_2$	7,573	<0,001*	1,150	0,002*
$\beta_{22}$	-1,072	0,247	-1,194	0,002*
$\beta_1 \beta_2$	-0,174	0,881	0,355	0,312

(\*) indica coeficiente significativo, com p-valor<0,05;  $t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; CR: coeficiente da regressão.

**Tabela 2b** Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis RFru e  $a_w$  observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

	Sorbitol			
	Retenção de Frutanos (RFru)		Atividade de água ( $a_w$ )	
	CR	p-valor	CR	p-valor
Intercepto	44,201	<0,001*	0,973	<0,001*
$\beta_1$	-10,698	<0,001*	-0,003	0,041*
$\beta_{11}$	1,670	0,051	-0,003	0,040*
$\beta_2$	-1,630	0,044*	-0,010	<0,001*
$\beta_{22}$	4,755	0,001*	-0,006	0,002*
$\beta_1 \beta_2$	-0,116	0,905	<-0,001	0,942
	Xilitol			
Intercepto	55,170	<0,001*	0,964	<0,001*
$\beta_1$	-12,343	<0,001*	-0,002	0,022*
$\beta_{11}$	-3,753	0,073*	0,003	0,003*
$\beta_2$	-2,344	0,201	-0,008	<0,001*
$\beta_{22}$	3,362	0,101	0,002	0,009*
$\beta_1 \beta_2$	-1,376	0,576	<0,001	0,541

(\*) indica coeficiente significativo, com p-valor<0,05;  $t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; CR: coeficiente da regressão.

**Tabela 3** Análise de variância do modelo quadrático para fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

Variáveis	Modelo			
	GL	QM	p-valor	R <sup>2</sup>
PA				
sorbitol	5	106,770	<0,001	0,997
xilitol	5	102,444	<0,001	0,936
GS				
sorbitol	5	1,222	0,001	0,933
xilitol	5	7,234	0,001	0,924
RFru				
sorbitol	5	220,397	<0,001	0,978
xilitol	5	294,652	0,002	0,905
a <sub>w</sub>				
sorbitol	5	2,4x10 <sup>-4</sup>	<0,001	0,939
xilitol	5	1,2x10 <sup>-4</sup>	<0,001	0,973

PA: perda de água; GS: ganho de sólidos; RFru: retenção de frutanos; a<sub>w</sub>: atividade de água; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; R<sup>2</sup>: coeficiente de correlação.

#### Otimização da DOAU de fatias de yacon através da função desejabilidade

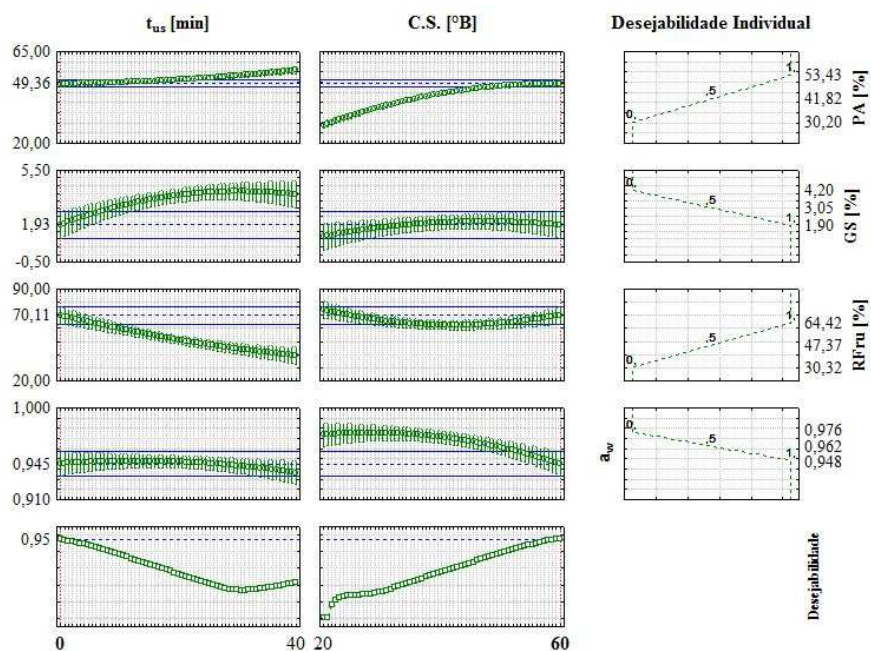
Durante a otimização do processo de DOAU, normalmente, diversas variáveis resposta descrevem a performance do sistema que está sendo otimizado. Os resultados obtidos pelo planejamento experimental de superfície de resposta mostrou que todos os modelos preditos se ajustaram bem aos dados (**Tabela 3**). Então, a otimização da DOAU de fatias de yacon com sorbitol ou com xilitol, utilizando-se a função desejabilidade e considerando as condições do processo apresentadas na **Tabela 4** resultaram em maximização da perda de água (PA) e da retenção de frutanos (RFru) e minimização das demais variáveis resposta (GS e a<sub>w</sub>).

**Tabela 4** Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade

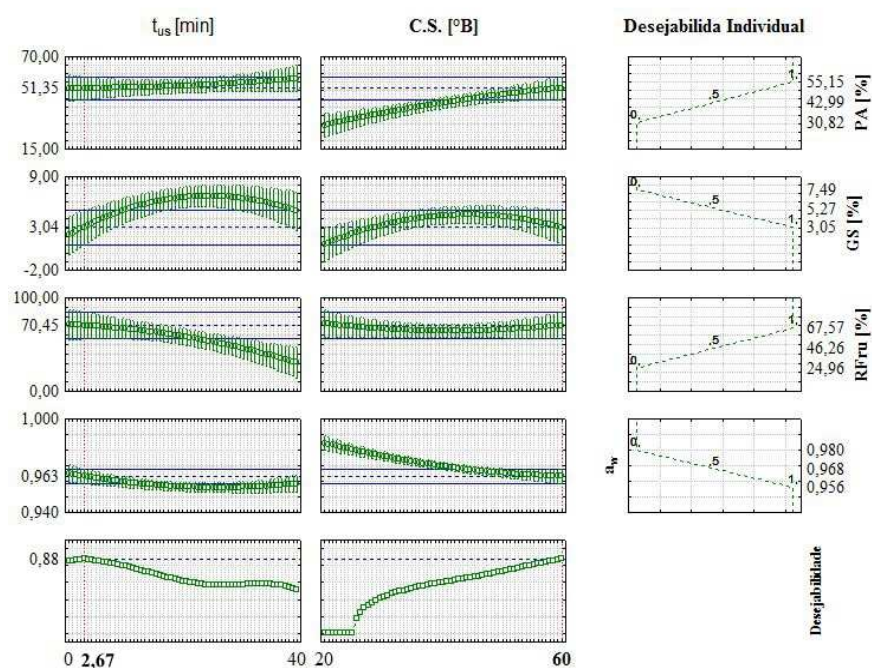
Valor atribuído	Condições para as respostas			
	sorbitol			
	PA [%]	GS [%]	RFru [%]	a <sub>w</sub>
Mínimos	30,20 (0)	1,90 (1)	30,32 (0)	0,948 (1)
Médios	41,82 (0,5)	3,05 (0,5)	47,37 (0,5)	0,962 (0,5)
Máximos	53,43 (1)	4,20 (0)	64,42 (1)	0,976 (0)
xilitol				
Mínimos	30,82 (0)	3,05 (1)	24,96 (0)	0,956 (1)
Médios	42,99 (0,5)	5,27 (0,5)	46,26 (0,5)	0,968 (0,5)
Máximos	55,15 (1)	7,49 (0)	67,57 (1)	0,980 (0)

PA: perda de água; GS: ganho de sólidos; RFru: retenção de frutanos; a<sub>w</sub>: atividade de água.

As avaliações simultâneas dos modelos de cada variável resposta resultaram nos perfis de desejabilidade que são apresentados nas **Figuras 5a** e **5b** para amostras tratadas com sorbitol e com xilitol, respectivamente.



**Figura 5a** Otimização simultânea de desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de yacon com solução de sorbitol, variáveis do processo e perfil deseabilidade individual e global.



**Figura 5b** Otimização simultânea de desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de yacon com solução de xilitol, variáveis do processo e perfil desejabilidade individual e global.

A condição otimizada obtida através da função desejabilidade para a DOAU de fatias de yacon com soluções de sorbitol foi de 0 minuto de aplicação de ultrassom e 60 °B de concentração de sorbitol na solução osmótica, com uma desejabilidade de 0,95. Os experimentos com xilitol apresentaram as seguintes condições ótimas a partir da aplicação da função desejabilidade: 2,67 min de aplicação de ultrassom no início do processo e 60 °B de solução de xilitol, e desejabilidade de 0,88 nesse ponto. Baseado nas condições ótimas de operação dos sistemas de DOAU de fatias de yacon, os valores preditos para todas as respostas estão apresentados na **Tabela 5**.



**Tabela 5** Critérios de otimização da DOAU de fatias de yacon com sorbitol e com xilitol e soluções das condições ótimas

	Sorbitol		Xilitol
	Objetivo	Condição otimizada	Condição otimizada
$t_{us}$		0 min	2,67 min
C.S.		60 °B	60 °B
PA	Max.	49,35 %	51,35 %
GS	Min.	1,93 %	3,04 %
RFru	Max.	70,11 %	70,46 %
$a_w$	Min.	0,945	0,963

$t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; PA: perda de água; GS: ganho de sólidos; RFru: retenção de frutanos;  $a_w$ : atividade de água; min: minutos; °B: grau Brix.

Observa-se que a função desejabilidade atendeu às características estabelecidas para ambos os planejamentos experimentais executados, pois apresentou um resultado de desejabilidade global (D) maior que 0,80, valor considerado aceitável e excelente (Akhazarova & Kafarov 1982). A análise da condição otimizada para cada agente osmótico permite concluir que, apesar de ambos terem apresentado valores preditos numericamente semelhantes para a retenção de frutanos e bastante próximos para o teor de umidade, o conteúdo de sólidos solúveis totais e a atividade de água de amostras tratadas com sorbitol apresentou valores preditos mais próximos do ideal. Portanto, o sorbitol foi considerado mais adequado para o tratamento de DOAU de fatias de yacon.

#### 4. Conclusão

Os modelos polinomiais de segunda ordem propostos para descrever os dados experimentais da DOAU de fatias de yacon permitiram inferir que o aumento do tempo de aplicação do ultrassom e da concentração da solução osmótica têm efeito sobre o aumento da PA e do GS e na redução RFru e da  $a_w$ .

A metodologia de otimização simultânea utilizando a função desejabilidade aplicada a este estudo mostrou ser uma ferramenta eficiente para

fornecer parâmetros de processo em que puderam ser observados valores maximizados PA e RFru e minimizados de GS e  $a_w$ , para ambos os agentes osmóticos estudados. A condição otimizada fornecida para tratamentos com sorbitol foi: 0 minuto de aplicação de ultrassom e 60°B. Enquanto que a condição otimizada encontrada para tratamentos com xilitol foi: 2,67 minutos de aplicação de ultrassom e 60°B. Os pontos fornecidos apresentaram valores de desejabilidade superiores a 0,88.

A análise das respostas previstas para as condições otimizadas mostrou que o uso do sorbitol na DOAU de fatias de yacon apresentou maior adequação aos resultados pretendidos, com menores GS e  $a_w$

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à Fapemig (476019/2012-5) pelo apoio financeiro.

## Referências

- Akhazarova, S. & Kafarov, V., 1982. *Experiment optimization in chemistry and chemical engineering*. Mir, ed., Moscow.
- Arballo, J.R. et al., 2012. Mass transfer kinetics and regression-desirability optimisation during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(2), pp.306–314.
- Baxter, S., Zivanovic, S. & Jochen, W., 2005. Molecular weight and degree of acetylation of high-intensity ultrasonicated chitosan. *Food Hydrocolloids*, 19, pp.821–830.
- Bibas Bonet, M.E. et al., 2010. Prebiotic effect of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) on intestinal mucosa using a mouse model. *Food and Agricultural Immunology*, 21(2), pp.175–189.
- Campos, D. et al., 2012. Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic

- compounds with antioxidant activity. *Food Chemistry*, 135, pp.1592–1599.
- Cárcel, J. a. et al., 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 110(2), pp.200–207.
- Chauhan, O.P. et al., 2011. Effects of Osmotic Agents on Colour, Textural, Structural, Thermal, and Sensory Properties of Apple Slices. *International Journal of Food Properties*, 14(5), pp.1035–1048.
- Corrêa, J.L.G. et al., 2010. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *Journal of Food Engineering*, 96(4), pp.498–504.
- Czechowska-Biskup, R. et al., 2005. Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound. *Carbohydrate Polymers*, 60, pp.175–184.
- Derringer, G. & Suich, R., 1980. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal Quality Technology*, 12, pp.214–219.
- Devic, E. et al., 2010. Kinetics of polyphenol losses during soaking and drying of cider apples. *Food and Bioprocess Technology*, 3, pp.867–877.
- Fennema, O.R., Damodaran, S. & Parkin, K.L., 2010. *Food Chemistry* 4th Ed. M. Dekker, ed., New York, NY: CRC Press.
- Fernandes, F., Gallão, M. & Rodrigues, S., 2008 a. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT-Food Science and Technology*, 41, pp.604–610.
- Fernandes, F. , Linhares Jr., F.E., Rodrigues, S., 2008 b. Ultrasound as a pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics sonochemistry*, 15, pp.1049-1054.
- Fernandes, F.A.N., Gallão, M.I. & Rodrigues, S., 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), pp.186–190.
- Ferrari, C.C. & Hubinger, M., 2008. Evaluation of the mechanical properties and diffusion coefficients of osmodehydrated melon cubes. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(11), pp.2065–2074.
- Fukai, K. et al., 1997. Seasonal fluctuations in fructan content and related enzyme activities in yacon (*Polymnia sonchifolia*). *Soil Science and Plant Nutrition*, 43(1), pp.171–177.
- Garcia-Noguera, J. et al., 2010. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), pp.294–303.
- Genta, S. et al., 2009. Yacon syrup: beneficial effects on obesity and insulin resistance in humans. *Clinical nutrition*, 28(2), pp.182–7.
- Graefe, S. et al., 2004. Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. *Field Crops Research*, 86(2-3), pp.157–165.

- Iida, Y. et al., 2008. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9, pp.140–146.
- Itaya, N.M., Carvalho, M.A.M. & Figueiredo-Ribeiro, R.D.L., 2002. Fructosyl transferase and hydrolase activities in rhizophores and tuberous roots upon growth of *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). *Physiologia Plantarum*, 116, pp.451–459.
- Jambrak, A.R. et al., 2010. Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), pp.91–100.
- Kek, S., Chin, N. & Yusof, Y., 2013. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91, pp.495–506.
- Kim, Y., Faqih, M. & Wang, S., 2001. Factors affecting gel formation of inulin. *Carbohydrate Polymers*, 46(2), pp.135–145.
- Koda, S. et al., 1994. Ultrasonic degradation of water-soluble polymers. *Polymer*, 35, p.30–33.
- Kotovicz, V. et al., 2013. Influence of process conditions on the kinetics of the osmotic dehydration of yacon (*Polymnia sonchifolia*) in fructose solution. *Journal of Food Process and Preservation*.
- Lago, C.C. et al., 2012. Characterization of powdered yacon (*Smallanthus sonchifolius*) juice and pulp. *Food Bioprocess Technology*, 5, pp.2183–2191.
- Lee, J. & Lim, L., 2011. Osmo-dehydration pretreatment for drying of pumpkin slice. *International Food Research Journal*, 18(4), pp.1223–1230.
- Li, H. et al., 2012. Mass transfer evaluation of ultrasonic osmotic dehydration of cherry tomatoes in sucrose and salt solutions. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(5), pp.954–960.
- Lorimer, J.P. et al., 1995. Effect of ultrasound on the degradation of aqueous native dextran. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2, p.s55–s57.
- Mason, T.J. & Lorimer, J.P., 2002. *Applied Sonochemistry: The Uses Of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*, Weinheim, Germany.: Wiley-VCH.
- Mendonça, K.S. et al., 2013. Otimização da desidratção osmótica de yacon assitida por ultrassom. In *Livro de resumos do XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados: ENEMP*. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, p. 241.
- Miyazaki, T., Yamamoto, C. & Okada, S., 2001. Ultrasonic depolymerization of hyaluronic acid. *Polymer Degradation and Stability*, 74, p.77–85.
- Moura, N.A. de et al., 2012. Protective effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) intake on experimental colon carcinogenesis. *Food and Chemical Toxicology*.

- Mundada, M., Singh, B. & Maske, S., 2010. Optimisation of processing variables affecting the osmotic dehydration of pomegranate arils. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, pp.1732–1738.
- Narai-Kanayama, a, Tokita, N. & Aso, K., 2007. Dependence of fructooligosaccharide content on activity of fructooligosaccharide-metabolizing enzymes in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) tuberous roots during storage. *Journal of food science*, 72(6), pp.S381–7.
- Noshad, M. et al., 2012. Multi-objective optimization of osmotic–ultrasonic pretreatments and hot-air drying of quince using response surface methodology. *Food Bioprocess Technology*, 5, pp.2098–2010.
- Nowacka, M. et al., 2014. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry*, 144, pp.18–25.
- Ojansivu, I., Ferreira, C.L. & Salminen, S., 2011. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. *Trends in Food Science & Technology*, 22(1), pp.40–46.
- Oliveira, L.F. de, 2013. *Desidratação osmótica com pulso de vácuo e secagem a vácuo de yacon (Smallanthus sonchifolius)*. Universidade Federal de Lavras: Programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos. Tese de doutorado.
- Ozdemir, M. et al., 2008. Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 41, pp.2044–2050.
- Pereira, J.A.R. et al., 2013. Studies of chemical and enzymatic characteristics of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its flours. *Food Science and Technology*, 33(1), pp.75–83.
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S. & Chemat, F., 2013. Degradation during application of ultrasound in food processing: a review. *Food Control*, 31, pp.593–606.
- Popa-Nita, S., Lucas, J. & Ladaviere, C., 2009. Mechanisms involved during the ultrasonically induced depolymerization of chitosan: characterization and control. , 10, pp.1203–1211.
- Reis, F.R. et al., 2012. Vacuum drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and the effect of process conditions on fractal dimension and rehydration capacity. *Drying Technology*, 30(1), pp.13–19.
- Rodrigues, M. & Iemma, A., 2012. *Experimental Design and Process Optimization*, Capinas, SP, Brazil: Ed. Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor.
- Rózek, A. et al., 2009. Grape phenolic impregnation by osmotic treatment: Influence of osmotic agent on mass transfer and product characteristics. *Journal of Food ...*, (94), pp.59–68.

- Scher, C.F., Rios, A.O. & Noreña, C.P.Z., 2009. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(11), pp.2169–2175.
- Sritongtae, B., Mahawanich, T. & Duangmal, K., 2011. Drying of osmosed cantaloupe: Effect of polyols on drying and water mobility. *Drying Technology*, 29, pp.527–535.
- STATISTICA, 2008. Data Analysis Software System. Available at: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Stojanovic, J. & Silva, J.L., 2007. Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries. *Food Chemistry*, (101), pp.898–906.
- Therdthai, N., Zhou, W. & Pattanapa, K., 2011. Microwave vacuum drying of osmotically dehydrated mandarin cv.(Sai-Namphaung). *International Journal of Food Science and Technology*, 46, pp.2401–2407.
- Tonon, R., Baroni, A. & Hubinger, M., 2007. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. *Journal of Food Engineering*, 82, pp.509–517.
- Vieira, G.S., Pereira, L.M. & Hubinger, M.D., 2012. Optimisation of osmotic dehydration process of guavas by response surface methodology and desirability function. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(1), pp.132–140.
- Vodeničarová, M. et al., 2006. Xyloglucan degradation using different radiation sources: A comparative study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 13, p.157–164.

**ARTIGO 3****Otimização da desidratação osmótica assistida por ultrassom de fatias de  
yacon quanto alterações de volume, cor e propriedades mecânicas.**

Título curto: Parâmetros de qualidade na otimização da DOAU

Kamilla Soares de Mendonça <sup>a</sup>, José Guilherme Lembi Ferreira <sup>a</sup>, Michel Cardoso de Angelis Pereira <sup>a</sup>, Jefferson Luiz Gomes Corrêa <sup>a\*</sup>.

\*Correspondência para: Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: jefferson@dca.ufla.br

<sup>a</sup> Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos, 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

**(artigo a ser submetido para publicação no International Journal of Food Science and Technology).**

**Resumo:** Neste estudo foram investigados os efeitos da desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU) de fatias de yacon sobre respostas que refletem padrões de qualidade do produto. Os experimentos foram planejados segundo um delineamento composto central rotacional, com um fatorial completo  $2^2$ , com 4 pontos axiais e 5 repetições no ponto central, somando 13 ensaios. Foram montados dois planejamentos experimentais, um para cada agente osmótico (sorbitol e xilitol), totalizando 26 ensaios. Foram investigados a concentração da solução osmótica (C.S.) (20-60 °B) e o tempo de aplicação do ultrassom ( $t_{us}$ ) (0-40 min) sobre as variáveis resposta: teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST), volume proporcional ( $V/V_0$ ), parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ), variação total de cor ( $\Delta E$ ), tensão de ruptura ( $\sigma_{HF}$ ), deformação na ruptura ( $\epsilon_{HF}$ ) e módulo de elasticidade ( $E_d$ ). A metodologia de superfície de resposta foi utilizada para modelar o comportamento das variáveis resposta, a função desejabilidade foi empregada na otimização das condições do processo. A análise dos resultados mostrou que o  $t_{us}$  e a C.S. apresentaram efeito significativo sobre todas as variáveis resposta analisadas, ao menos para um dos agentes osmóticos empregados. A análise de variância dos modelos gerados mostrou que os dados se ajustaram bem ao modelo, exceto para a resposta de  $E_d$  com sorbitol. As condições otimizadas com o auxílio da função desejabilidade foram, para tratamentos com sorbitol; 31,33 min de aplicação de ultrassom e 22,23 °B, e para tratamentos com xilitol; 29,33 min de aplicação de ultrassom e 27,33 °B.

**Palavras-chave:** *Smallanthus sonchifolius*, DCCR, encolhimento, propriedades mecânicas, sorbitol, xilitol, coloração.



## 1. Introdução

O yacon (*Smallanthus sonchifolius* [Poepp. & Endl.] H. Robinson) é uma planta de raiz tuberosa comestível e de sabor agradável. É considerado um alimento funcional devido às suas propriedades prebióticas, hipoglicemiantes, hipolipidêmicas e antioxidantes (Genta et al. 2009; Habib et al. 2011).

A elevada atividade de água dos tubérculos de yacon permite o desenvolvimento microbiano e reações enzimáticas de degradação, implicando ainda em perdas econômicas e na qualidade do produto. Devido à vida de prateleira curta do yacon, se faz necessário que se desenvolvam técnicas de processamento que viabilizem o consumo e a distribuição e preservem as características de qualidade do produto. Uma das alternativas para aumentar a vida útil do produto seria a obtenção de yacon desidratado (Scher et al. 2009; Reis et al. 2012; Justus 2012; Oliveira 2013; Kotovicz et al. 2013).

A desidratação osmótica (DO) consiste na imersão do produto em solução aquosa hipertônica, de forma a produzir a difusão em dois fluxos contracorrentes: água para fora da matriz e agentes osmóticos da solução para o interior do produto. Existe ainda um terceiro fluxo, caracterizado pela lixiviação de componentes hidrossolúveis pelo fluxo de saída de água (Tonon et al. 2007; Sagar & Kumar 2009).

Levando-se em conta o reduzido valor calórico e glicêmico do yacon (Habib et al. 2011), durante a DO é interessante preservar essas atribuições com a utilização de agentes osmóticos que mantenham essas características do produto. Apesar da sacarose ser o agente osmótico mais comum empregado na DO de frutas, diversos trabalhos já estudaram o emprego de substitutos de sacarose, como sorbitol, xilitol, frutose, trealose e maltose no processo osmótico (Ferrari & Hubinger 2008; Ozdemir et al. 2008; Castro-Giráldez et al. 2011; Sritongtae et al. 2011; Chauhan et al. 2011; Rodríguez & Mascheroni 2012).

Sritongtae et al. (2011) avaliaram o emprego de sorbitol na desidratação osmótica de melão cantaloupe. Os parâmetros de perda de água e ganho de sólidos aumentaram com a concentração de sorbitol na solução, mas em comparação com soluções de sacarose a perda de água foi menor e o ganho de sólidos maior, devido ao tamanho das moléculas. Gliemmo et al. (2010) observaram que a adição de xilitol em purê de abóbora contribuiu para a redução da atividade de água do produto.

A desidratação osmótica é um importante processo para remoção parcial da umidade de produtos alimentícios, sendo empregada como pré-tratamento para secagem, liofilização e congelamento (Khan 2012; Derossi et al. 2008). As principais vantagens relacionadas à sua utilização em etapas complementares da cadeia de processamento de alimentos são a sua capacidade de remover parcelas de umidade com baixo consumo energético e sob temperaturas reduzidas. Adicionalmente, costuma minimizar as alterações nas características de qualidade em um processo posterior de secagem, pois pode reduzir a exposição prolongada a temperaturas elevadas (Singh et al. 2010; Lee & Lim 2011).

A associação da desidratação osmótica com a energia ultrassônica mostrou ser um método eficaz para acelerar a transferência de massa do processo (Garcia-Noguera et al. 2010; Cárcel et al. 2012). Isso ocorre devido aos fenômenos de “efeito esponja” e cavitação induzidos pelas ondas ultrassônicas nos sistemas solido-líquido. O efeito esponja consiste em uma série alternada de compressões e descompressões da matriz alimentícia que expulsa água e gases do interior do alimento, permitindo a entrada de solução osmótica. A cavitação, além de auxiliar na remoção da umidade fortemente ligada (Fernandes et al. 2008), provoca colapso de bolhas de ar presentes no meio osmótico, que, por sua vez, promove a injeção de solução osmótica na matriz no produto (Mason & Lorimer 2002; Cárcel et al. 2012). Além disso, o ultrassom causa a deformação nos tecidos vegetais, criando microcanais na estrutura no produto, que se

comportam como vias preferenciais em que a camada limite de difusão é reduzida (Fernandes et al. 2011). A desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU) tem os processos de difusão facilitados devido à redução da camada limite de difusão e das resistências interna e externa à transferência de massa (De la Fuente et al. 2006; Karizaki et al. 2013).

A transferência simultânea de massa no sistema osmótico provoca modificações físicas, microestruturais e macroestruturais no tecido desidratado. Além da redução no teor de umidade e aumento do conteúdo de sólidos solúveis totais, ocorrem modificações na coloração, dimensões e formato e propriedades mecânicas de textura do material (Kek et al. 2013). No entanto, a maioria dos trabalhos com desidratação osmótica assistida por ultrassom de frutos e vegetais focam suas discussões em cinéticas de transferência de massa (perda de água e ganho de sólidos) e no efeito qualitativo da aplicação do pré-tratamento osmótico no produto final (após secagem, liofilização, congelamento), sendo encontradas poucas avaliações das alterações de qualidade atribuídas à desidratação osmótica assistida por ultrassom.

Em estudo de secagem por micro-ondas com pré-tratamento de desidratação osmótica de cranberries com e sem o emprego de ultrassom, Shamaei et al. (2012) observaram que após a secagem por micro-ondas amostras sonicadas apresentaram maior dureza e menores alterações de coloração do que aquelas pré-tratadas em processo ordinário. Em estudo de DOAU de fatias de goiaba, Kek et al. (2013) observaram que a aplicação de pré-tratamento osmótico com ultrassom reduziu a variação total de cor das amostras após a secagem.

Este trabalho foi executado com o objetivo principal de investigar os efeitos da concentração da solução e do tempo de aplicação do ultrassom durante o tratamento osmótico assistido por ultrassom, utilizando sorbitol e xilitol como agentes osmóticos, sobre as propriedades que refletem a qualidade das fatias de

yacon desidratadas. Para isso foram investigadas as alterações em parâmetros indicativos de transferência de massa (teor de umidade e conteúdo de sólidos solúveis totais), variação de volume, coloração e textura para cada agente osmótico. As condições otimizadas dos processos foram estabelecidas por aplicação da função desejabilidade.

## 2. Material e Métodos

### Matéria-prima e preparo das amostras

As amostras de tubérculos de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) foram adquiridos no comércio local de Lavras, M.G., Brasil, durante os meses de julho e novembro de 2013. Os tubérculos foram sempre adquiridos no mesmo fornecedor para minimizar as diferenças. As amostras foram escolhidas quanto à uniformidade e de forma a se evitar danos mecânicos nas amostras. Os tubérculos foram lavados, descascados manualmente e cortados em fatias de 2,00 x 2,00 x 0,50 cm, com o auxílio de um cortador de aço inox. A fim de se evitar o escurecimento enzimático demasiado após o corte, as fatias foram imersas por 3 minutos em solução de ácido cítrico 1% (Reis et al. 2012).

### Desidratação osmótica assistida por ultrassom

Os experimentos de desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU) foram executados com soluções osmóticas de sorbitol ou xilitol, cujas concentrações seguiram o planejamento experimental descrito nas **Tabelas 1a** e **1b**, respectivamente para sorbitol e xilitol. Para todos os ensaios a proporção solução:amostra foi superior a 10:1 (massa:massa) para se evitar diluição significativa da solução proporcionada pela saída de água das amostras (Fernandes et al. 2008; Garcia-Noguera et al. 2010b).

As fatias de yacon foram acomodadas em suportes de rede de náilon, de forma que se mantivessem individualizadas e completamente imersas no meio desidratante. A solução osmótica utilizada (sorbitol ou xilitol) foi colocada diretamente na câmara do banho ultrassônico (Unique, modelo USC 2850A, Indaiatuba, Brasil), onde as amostras foram introduzidas. As ondas ultrassônicas foram utilizadas na intensidade de energia ultrassônica de  $8 \text{ kWm}^{-3}$  e frequência de 25kHz (Garcia-Nogueira et al. 2010b). A temperatura da solução foi mantida em  $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  durante todo o tratamento osmótico.

Cada experimento de desidratação osmótica foi executado pelo período total de 40 minutos, o tempo de aplicação do ultrassom no início do processo foi definido pelo planejamento experimental (**Tabelas 1a e 1b**). Após finalizado o processo de desidratação osmótica, as amostras foram imersas em banho de gelo para cessar a desidratação e retirada do excesso de solução da superfície. Em seguida, foram secas com papel absorvente para remoção da umidade superficial e as análises se procederam.

#### Métodos analíticos

##### Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi estabelecido por método gravimétrico em estufa a vácuo (260mmHg) a  $70^\circ\text{C}$  até peso constante (A.O.A.C 1995), método 934.06.

##### Determinação do conteúdo de sólidos solúveis totais (SST)

Para determinação do teor de sólidos solúveis totais, porções de aproximadamente 10g foram pesadas, diluídas em água destilada na proporção 1:5 (v/v) e dilaceradas com o auxílio de um triturador de tecidos. A leitura foi feita em refratômetro digital (Hanna instruments, modelo HI9680), em triplicata.

Alterações no volume proporcional ( $V/V_0$ )

A determinação do volume proporcional ( $V/V_0$ ) foi feita por análise de imagem, em quintuplicata. As amostras foram fotografadas antes e após a DOAU.

A área superficial foi determinada pela imagem das fotografias, com auxílio do software livre Image J<sup>®</sup> 1.45s (Rasband, 2014), que fornece a área da amostra pela conversão dos pixels na imagem em dimensões reais, a partir de uma escala conhecida (Andreola 2013). A espessura das amostras foi estabelecida antes e após a DOAU com o auxílio de um paquímetro, onde foi tomada a média aritmética das espessuras de cinco pontos distintos da amostra.

O volume aparente foi obtido multiplicando-se a área superficial fotografada pela espessura média da amostra, enquanto o volume proporcional foi calculado pela razão entre os volumes aparentes da amostra desidratada ( $V$ ) (após DOAU) e da amostra fresca ( $V_0$ ) (antes da DOAU). A variação do volume proporcional foi determinada pela razão entre os volumes aparentes antes e após a DOAU, **Equação 1:**

$$\frac{V}{V_0} \cdot 100 \quad (1)$$

Determinações colorimétricas

As alterações na cor das amostras foram avaliadas através do colorímetro Minolta CR400/410 (Konica Minolta Inc.; Mahwah, NJ). A calibração foi feita com reflectância especular excluída, fonte de iluminação D65 e ângulo visual de 10°. A determinação dos parâmetros  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , do sistema de cores CIE Lab, foi feita por leitura direta no aparelho e a variação total de cor ( $\Delta E$ ), em relação à amostra fresca, calculada de acordo com a **Equação 2:**

$$\Delta E \left[ \left( L_0^* - L^* \right) + \left( a_0^* - a^* \right) + \left( b_0^* - b^* \right) \right]^{0,5} \quad (2)$$

onde o índice “0” indica amostras frescas. A determinação dos parâmetros de cor foi feita em quintuplicata e a média utilizada para os cálculos.

#### Determinação das propriedades mecânicas de compressão

As propriedades mecânicas de compressão das amostras foram determinadas pelo teste de compressão uniaxial realizado em texturômetro universal TA-XT2i (Stable Microsystems, Inglaterra) (Li et al. 2012) com probe quadrangular de 70 mm de comprimento. Os testes de compressão foram realizados com taxa de compressão de  $1 \text{ mm s}^{-1}$ , temperatura de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  e compressão de até 75% de deformação da altura original. Os testes de compressão foram realizados em cinco amostras diferentes, escolhidas aleatoriamente, para cada tratamento do planejamento experimental. Os dados de cada ensaio referem-se à média de cinco medidas. Através do registro da força  $F(t)$  [N] e da altura  $H(t)$  [m] durante a compressão das amostras foi possível obter os parâmetros de Hencky: tensão ( $\sigma_H$ ) [Pa] e deformação ( $\varepsilon_H$ ), pelas **Equações 3 e 4**, respectivamente (Mayor et al. 2007):

$$\sigma_H = \frac{F(t)}{A(t)} \quad (3)$$

$$\varepsilon_H = \left| \ln \frac{H(t)}{H_0} \right| \quad (4)$$

onde  $F(t)$ :força do material [N] após um tempo (t) [s];  $A(t)$ : área de contato [m<sup>2</sup>] em função do tempo;  $H_0$ : altura da amostra [m] no início do teste de compressão;

H(t): altura [m] após um tempo t [s] de deformação. Com a análise da curva tensão X deformação, considerando-se o ponto de pico máximo foram obtidas a tensão de ruptura ( $\sigma_{HF}$ ) [Pa] e a deformação na ruptura ( $\varepsilon_{HF}$ ). O módulo de elasticidade ( $E_d$ ) [Pa] foi obtido pelo coeficiente angular da porção inicial da curva tensão X deformação (Katsiferis et al. 2008; Ramallo & Mascheroni 2010), **Equação 5**:

$$E_d = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\varepsilon \rightarrow 0} \quad (5)$$

Delineamento experimental por superfície de resposta

Visando-se otimizar o processo de DOAU, o planejamento dos experimentos foi feito seguindo a Metodologia de Superfícies de Resposta (Rodrigues & Iemma 2012). O delineamento central composto rotacional (DCCR) empregado tratou-se de um fatorial completo  $2^2$ , incluindo 4 pontos axiais e 5 repetições no ponto central, totalizando 13 ensaios. Foram feitos dois planejamentos (totalizando 26 ensaios), uma para amostras desidratadas com soluções de sorbitol e outro para processos executados em soluções de xilitol.

A relação dos níveis das variáveis independentes associados às respectivas variáveis codificadas são apresentados na **Tabela 1**. Os planejamentos experimentais para as soluções de sorbitol e xilitol com as variáveis experimentais codificadas e reais, juntamente com os resultados, são apresentados nas **Tabelas 2a** e **2b**, respectivamente. Os experimentos foram realizados em ordem randômica, para minimizar os efeitos de fatores externos sobre as respostas (Mundada et al. 2010).



**Tabela 1** Variáveis independentes estudadas na DOAU de fatias de yacon com soluções de sorbitol ou xilitol nas formas codificadas e reais e os respectivos níveis aplicados

Variáveis independentes	Níveis codificados				
	-1,4142	-1	0	1	1,4142
	Níveis reais				
$t_{us}$ [min]	0	5,858	20	34,142	40
C.S. [°B]	20	25,858	40	54,142	60

$t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; [min]: minutos; C.S.: concentração da solução osmótica; [°B]: grau Brix.

Análises estatísticas e otimização pela função desejabilidade

Uma equação polinomial de segunda ordem foi ajustada aos dados experimentais para cada variável dependente, **Equação 6**:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 t_{us} + \beta_2 C.S. + \beta_{11} t_{us}^2 + \beta_{22} C.S.^2 + \beta_{12} t_{us} C.S. + \varepsilon \quad (6)$$

onde:  $Y_i$  é o valor predito da variável resposta ( $U_{bs}$ , SST,  $V/V_0$ ,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E$ ,  $\sigma_{HF}$ ,  $\varepsilon_{HF}$ ,  $E_d$ );  $X_1$  e  $X_2$  são as variáveis independentes ( $t_{us}$  e C.S., respectivamente);  $\beta_0$  é o valor da resposta ajustada ao ponto central do planejamento (i.e., ao ponto 0,0);  $\beta_1$  são os coeficientes lineares;  $\beta_{11}$  e  $\beta_{22}$  são os coeficientes quadráticos;  $\beta_{12}$  é o coeficiente da interação entre as variáveis independentes;  $\varepsilon$  é o erro experimental.

O dados experimentais foram tratados com o auxílio do software Statistica Versão 8.0 (STATISTICA 2008). A verificação da significância estatística dos termos do modelo foi feita por análise de variância (ANOVA) utilizando p-valor < 0,05, além do teste F e  $R^2$  (coeficiente de correlação) na verificação dos ajustes dos modelos. Para ajuste dos modelos adotou-se os modelos completos, visando a preservação da influência que as variáveis poderiam ter na resposta final do produto (Oliveira 2013). O mesmo programa

foi utilizado para gerar as superfícies de resposta dos modelos viáveis e executar a otimização segundo a função desejabilidade.

O processo de otimização através da função desejabilidade foi utilizado para se obter as condições ótimas da DOAU de fatias de yacon em processos utilizando sorbitol ou xilitol. A abordagem geral da função desejabilidade transforma cada variável resposta estimada ( $Y_i$ ) em um valor de desejabilidade ( $d_i$ ), onde  $0 < d_i < 1$ . Através dessa função são atribuídas escalas de desejabilidade, na qual  $d_i=0$  é aplicada para uma resposta indesejável, enquanto  $d_i=1$ , para uma resposta desejável. As pontuações individuais dos valores preditos de cada variável dependente são combinados na função desejabilidade ( $D$ ), através da média geométrica dos diferentes valores de  $d_i$  (Derringer & Suich 1980),

**Equação 7:**

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_{10})^{\frac{1}{10}} \quad (7)$$

onde:  $d_i$ : desejabilidade da resposta. O formato da função desejabilidade depende dos objetivos dos experimentos, cada resposta ( $Y_i$ ) pode ser maximizada ou minimizada, ou ainda apresentar-se na forma ideal de desejabilidade (Derringer & Suich 1980). No presente estudo a função desejabilidade foi desenvolvida a fim de se maximizar  $V/V_0$ ,  $L^*$ ,  $b^*$ ,  $\sigma_{HF}$ ,  $E_d$  e minimizar  $U_{bs}$ ,  $SST$ ,  $a^*$ ,  $\Delta E$  e  $\varepsilon_{HF}$  das fatias de yacon.

### 3. Resultados e Discussão

Neste item são apresentados os resultados dos planejamentos experimentais deste trabalho. Na apresentação dos mesmos, utilizou-se os subíndices “s”, para sorbitol, e “x”, para xilitol.

Teor de umidade ( $U_{bs}$ ) e conteúdo de sólidos solúveis totais (SST)

As amostras frescas de yacon apresentaram teores de umidade ( $U_{bs}$ ) de  $11,29 \pm 1,59$  g/g amostra seca (b.s.) e SST de  $12,0 \pm 0,5$  °Brix, valores próximos aos observados por Scher et al. (2009), Kotovicz et al. (2013) e Pereira et al. (2013). As **Tabelas 2a** e **2b** apresentam as respostas das variáveis  $U_{bs}$  e conteúdo de SST das fatias de yacon após DOAU tratadas com sorbitol e xilitol, respectivamente. A magnitude dos p-valores da **Tabela 3** revelaram que as variáveis  $t_{us}$  e C.S. contribuíram significativamente para a redução da umidade das amostras de yacon durante DOAU ( $p < 0,05$ ), em amostras tratadas com ambos os agentes osmóticos.

Todos os fatores da regressão para as respostas de  $U_{bs}$  apresentaram significância estatística, exceto o termo quadrático do  $t_{us}$  e a interação, ambos referentes às amostras tratadas com xilitol. A magnitude relativa dos coeficientes de regressão (CR) mostrou que o efeito linear da concentração da solução ( $\beta_s = -0,8005$ ;  $\beta_x = -0,8478$ ) foi superior ao efeito do tempo de aplicação do ultrassom ( $\beta_s = -0,2466$ ;  $\beta_x = -0,1198$ ) na redução do teor de umidade das amostras, para ambos os agentes osmóticos. O conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) das fatias de yacon após DOAU sofreu aumento tanto do tempo de aplicação do ultrassom como da concentração da solução osmótica ( $p < 0,05$ ;  $\beta > 0$ ), essa última variável apresentou efeito superior ao efeito do  $t_{us}$ , para ambos os agentes osmóticos empregados, **Tabela 3**. As interações  $t_{us}$  X C.S. não apresentaram significância estatística.

O efeito do tempo de aplicação do ultrassom na redução da umidade e no aumento do conteúdo de sólidos solúveis das amostras pode estar relacionado com sua ação na redução da resistência interna e externa à transferência de massa, tornando mais fácil a saída de água e a entrada de solutos presentes no meio osmótico para a matriz do produto. Este efeito do ultrassom em sistemas de DOAU foi descrito em maçãs (Cárcel et al. 2007), banana, jenipapo, jambo,

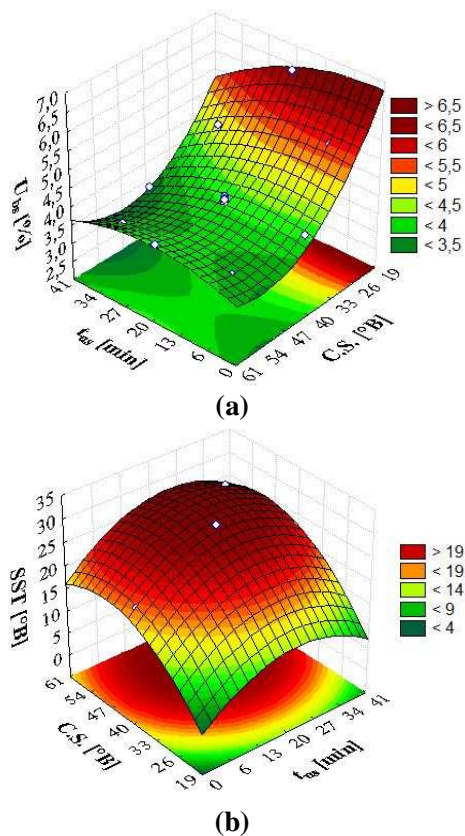
melão, mamão, abacaxi, pinha e sapoti (Fernandes & Rodrigues 2008), tomate cereja (Li et al. 2012) e cranberry (Shamaei et al. 2012). Os mecanismos envolvidos na facilitação da transferência de massa pelas ondas ultrassônicas são conhecidos como “efeito esponja” e cavitação, suas intensidades e consequências, no entanto dependem das características do meio em que são aplicadas (Cárcel et al. 2012; Garcia-Perez et al. 2012).

O “efeito esponja” consiste em uma série alternada de compressões e descompressões da matriz do produto. Durante a compressão ocorre a expulsão de líquido e gases oclusos, seguida pela entrada da solução osmótica presente no meio até a região intercelular, durante a descompressão (Cárcel et al. 2012). A consequência do efeito esponja aplicado de maneira cíclica é o favorecimento da desidratação e da impregnação por solutos pela diminuição da resistência interna à transferência de massa. Além disso, quando a energia ultrassônica ultrapassa um limiar energético, o desprendimento de grandes volumes de gases na matriz do alimento leva à formação de bolhas de cavitação (Soria & Villamiel 2010). O estímulo contínuo leva ao crescimento e implosão dessas bolhas, esse acontecimento cria pontos de alta pressão e temperatura, turbulência e ondas com efeito cisalhante. Quando as implosões ocorrem próximas à superfície do produto produzem microjatos em direção à superfície sólida do alimento atuando como injetoras de solução osmótica nessa matriz (Mason 1998; Cárcel et al. 2012). Esse comportamento reduz a resistência externa à entrada de sólidos.

Além dos microjatos, é atribuída à cavitação o desenvolvimento de microcanais na região intercelular das amostras, tornando mais fácil e intensa a saída de água e a entrada de solutos oriundos do meio osmótico (Fernandes et al. 2008; Fernandes et al. 2009; Cárcel et al. 2007). Esses microcanais surgem por rompimento e quebra das células devido ao efeito combinado da cavitação e da pressão osmótica durante DOAU (Garcia-Noguera et al. 2010).

O efeito da C.S. sobre a redução da umidade e aumento do conteúdo de sólidos solúveis totais na matriz das fatias de yacon após processo de DOAU pode ser atribuído ao incremento do gradiente de potencial químico entre a matriz do produto e o meio desidratação. Essa diferença entre as concentrações osmóticas promove os fluxos de saída de água do material e a entrada de sólidos solúveis para a matriz do alimento (Mayor et al. 2011). O incremento na força motriz que promove esses fluxos leva ao aumento do montante de massa transferida no sistema. O aumento na concentração da solução osmótica apresentou resultados semelhantes em morangos desidratados em solução de sacarose (Allali et al. 2010) e melão cantaloupe desidratado osmoticamente em soluções de sorbitol e glicerol (Sritongtae et al. 2011).

A análise de variância dos modelos experimentais propostos mostraram bom ajuste da regressão aos dados experimentais, **Tabela 4**. Com valores de p-valor < 0,05 e  $R^2 > 95\%$ , sendo assim as superfícies geradas pela metodologia de superfícies de resposta são representativas do comportamento dos dados nessas condições. A **Figura 1** apresenta a superfície de resposta gerada a partir dos modelos ajustados para  $U_{bs}$  e SST das fatias de yacon tratadas com soluções de sorbitol, os gráficos de amostras tratadas com xilitol não foram apresentados.



**Figura 1** Superfícies de resposta para teor de umidade ( $U_{bs}$ ) (a) e conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) (b) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol.

A otimização da DOAU busca alcançar produtos com maior grau de desidratação, porém, com menor incremento no conteúdo de sólidos a fim de reduzir alterações na qualidade característica do produto. Assim, a DOAU de fatias de yacon busca minimizar o teor de umidade ( $U_{bs}$ ) e o conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) das amostras.

**Tabela 2a** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta de teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) das fatias de yacon tratadas com sorbitol

$t_{us}$ [min]	C.S. [°B]	$U_{bs}$ [%]	SST [°B]	$V/V_0$
5,858 (-1)	25,858 (-1)	5,4371±0,4622	13,98±0,00	62,29±2,53
34,142 (1)	25,858 (-1)	4,6266±0,1717	18,44±0,00	54,82±4,14
5,858 (-1)	54,142 (1)	3,6108±0,3510	21,83±0,80	49,26±3,21
34,142 (1)	54,142 (1)	3,4970±0,6665	28,02±0,00	43,63±3,2
0 (-1,4142)	40 (0)	4,1239±0,1867	20,15±0,00	53,77±5,43
40 (1,4142)	40 (0)	3,3827±0,2840	22,31±0,22	45,21±4,84
20 (0)	20 (-1,4142)	6,4478±0,6590	14,17±0,36	64,65±3,61
20 (0)	60 (1,4142)	4,0098±0,1605	28,21±0,00	46,61±4,22
20 (0)	40 (0)	4,0290±0,4619	27,10±0,00	52,69±5,80
20 (0)	40 (0)	4,1370±0,2292	27,29±0,35	52,15±3,47
20 (0)	40 (0)	4,0770±0,2944	26,51±0,00	52,88±1,63
20 (0)	40 (0)	3,9622±0,2227	26,81±0,00	54,92±2,31
20 (0)	40 (0)	4,0435±0,0991	30,35±0,00	54,20±2,56

$t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; min: minutos; °B: grau Brix;  $U_{bs}$ : teor de umidade; SST: conteúdo de sólidos solúveis totais;  $V/V_0$ : volume proporcional. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.

**Tabela 2b** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta de teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) das fatias de yacon tratadas com xilitol

$t_{us}$ [min]	C.S. [°B]	U [%]	SST [°B]	$V/V_0$
5,858 (-1)	25,858 (-1)	4,4077±0,2018	17,41±0,00	56,46±3,69
34,142 (1)	25,858 (-1)	4,1955±0,1785	19,35±0,00	52,76±5,95
5,858 (-1)	54,142 (1)	2,8383±0,2897	23,43±0,17	44,83±4,28
34,142 (1)	54,142 (1)	2,7974±0,2886	33,44±0,00	38,19±4,69
0 (-1,4142)	40 (0)	3,4896±0,3629	22,06±0,18	50,58±3,76
40 (1,4142)	40 (0)	2,9907±0,0938	27,59±0,18	40,95±4,79
20 (0)	20 (-1,4142)	5,4353±0,1440	19,16±0,00	55,46±2,31
20 (0)	60 (1,4142)	2,7375±0,1988	39,48±0,00	36,66±2,22
20 (0)	40 (0)	3,1960±0,2249	35,73±0,00	43,16±2,71
20 (0)	40 (0)	3,1963±0,0516	35,86±0,19	43,32±2,30
20 (0)	40 (0)	3,2119±0,2288	37,29±0,00	43,26±2,79
20 (0)	40 (0)	3,2389±0,2048	35,81±0,17	43,53±4,21
20 (0)	40 (0)	3,2405±0,1697	34,78±0,00	43,69±1,90

$t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; min: minutos; °B: grau Brix;  $U_{bs}$ : teor de umidade; SST: conteúdo de sólidos solúveis totais;  $V/V_0$ : volume proporcional. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.



**Tabela 3** Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

	Sorbitol					
	Umidade ( $U_{bs}$ )		Sólidos Solúveis (SST)		$V/V_0$	
	CR	p-valor	CR	p-valor	CR	p-valor
Intercepto	4,0497	<0,0001*	27,6122	<0,0001*	53,370	<0,001*
$\beta_1$	-0,2466	0,0013*	1,7141	0,0204*	-3,152	<0,001*
$\beta_{11}$	-0,1978	0,0061*	-3,3503	0,0010*	-1,958	0,001*
$\beta_2$	-0,8005	<0,0001*	4,6607	0,0001*	-6,217	<0,001*
$\beta_{22}$	0,5400	<0,0001*	-3,3718	0,0009*	1,116	0,014*
$\beta_1 \beta_2$	0,1742	0,0363*	0,4323	0,6113	0,462	0,3370
	Xilitol					
Intercepto	3,2167	<0,0001*	35,8950	<0,0001*	43,392	<0,001*
$\beta_1$	-0,1198	0,0469*	2,4724	0,0239*	-2,995	<0,001*
$\beta_{11}$	-0,0142	0,7980	-6,4511	0,0002*	1,724	0,008*
$\beta_2$	-0,8478	<0,0001*	6,1057	0,0002*	-6,598	<0,001*
$\beta_{22}$	0,4089	0,0001*	-4,2038	0,0026*	1,870	0,005*
$\beta_1 \beta_2$	0,0428	0,5622	2,0145	0,1418	-0,733	0,276

(\*) indica coeficiente significativo, com p-valor<0,05;  $t_{us}$ :tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; CR: coeficiente da regressão; (L):linear; (Q):quadrático;  $V/V_0$ : volume proporcional.

**Tabela 4** Análise de variância dos modelos quadráticos para teor de umidade ( $U_{bs}$ ), conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e volume proporcional ( $V/V_0$ ) de fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

Variáveis	Modelo			
	GL	QM	p-valor	R <sup>2</sup>
$U_{bs}$				
sorbitol	5	1,6542	0,0000	98%
xilitol	5	1,4137	0,0000	98%
SST				
sorbitol	5	67,4132	0,0002	95%
xilitol	5	146,5782	0,0003	95%
$V/V_0$				
sorbitol	5	85,905	<0,001	99%
xilitol	5	92,412	<0,001	98%

$U_{bs}$ : teor de umidade; SST: conteúdo de sólidos solúveis totais;  $V/V_0$ : volume proporcional; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; R<sup>2</sup>: coeficiente de correlação.

### Variações no volume proporcional

As respostas para o volume proporcional ( $V/V_0$ ) das fatias de yacon após DOAU são apresentadas nas **Tabelas 2a e 2b**, para amostras tratadas com sorbitol e xilitol, respectivamente. Tanto do tempo de aplicação do ultrassom como a concentração das soluções osmóticas apresentaram efeito significativo ( $p < 0,05$ ), em termos lineares e quadráticos (**Tabela 3**). A interação não apresentou efeito estaticamente significativo. Tanto o  $t_{us}$  ( $\beta_s = -3,152$ ;  $\beta_x = -2,995$ ) como a C.S. ( $\beta_s = -6,217$ ;  $\beta_x = -6,598$ ) promoveram o encolhimento das amostras, o efeito da C.S., porém, foi maior. Efeitos semelhantes do  $t_{us}$  e da C.S. foram observados para as respostas de  $U_{bs}$ .

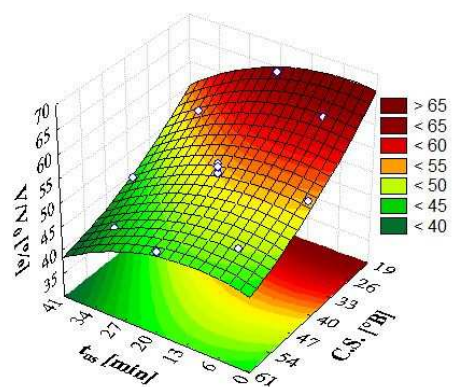
O encolhimento das matrizes alimentícias pode ser linearmente relacionado com a redução do teor de umidade (Nahimana et al. 2011; Mayor et al. 2011). Isso explica o fato de terem sido observados efeitos semelhantes da C.S. e do  $t_{us}$  para  $U_{bs}$  e  $V/V_0$ .

O efeito da C.S. sobre o volume proporcional pode ser atribuído à perda de água promovida pela força motriz gerada no sistema de DO. O aumento na concentração das soluções osmóticas atuou incrementando o potencial osmótico do sistema, estimulando maiores taxas de saída de água (Arballo et al. 2012; Li et al. 2012). Segundo Mayor e Sereno (2004) a remoção da umidade de um alimento causa um desequilíbrio de pressão entre o interior e o meio extracelular, essas tensões contrastantes levam ao encolhimento do material. Devido ao arranjo celular do tecido desidratado, a perda de turgidez de uma célula altera as interações de pressão nas paredes das células vizinhas, promovendo deformações no tecido como um todo (Mayor et al. 2011; Fanta et al. 2014), devido a isso foi observada uma grande influência da C.S. sobre a variável  $V/V_0$  durante DOAU das fatias de yacon. Em processo de DO ordinária de maçãs, Souraki et al. (2013) observaram proporção linear entre a redução do

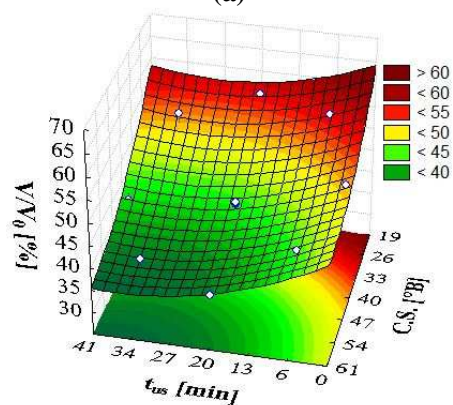
volume proporcional ( $V/V_0$ ) e variáveis relacionadas à transferência de massa, como perda de água, a umidade e a redução de peso.

O efeito do tratamento ultrassônico pode ser atribuído à intensificação da transferência de massa que, por mecanismos conhecidos como cavitação e “efeito esponja”, reduz a resistência interna e externa à saída de água, permitindo maiores taxas de desidratação (Cárcel et al. 2012). Logo, sistemas que intensificam a transferência de massa de processos de DO, como o emprego de ultrassom, intensificam também o encolhimento das amostras. Além disso, a redução do volume das fatias de yacon também pode ser atribuída à expulsão dos gases oclusos na matriz do alimento durante a sonicação (Nahimana et al. 2011) por ação dos mesmos mecanismos descritos anteriormente.

A análise de variância dos modelos gerados mostrou bom ajuste aos dados experimentais, com  $p$ -valor < 0,05 e  $R^2$  superior a 98%, **Tabela 4**. **Figura 2** mostra o efeito do  $t_{us}$  e da C.S. sobre o volume proporcional das fatias de yacon tratadas com sorbitol (a) e com xilitol (b), respectivamente.



(a)



(b)

**Figura 2** Superfícies de resposta para variação de volume proporcional ( $V/V_0$ ) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol (a) xilitol (b).

A variação de volume configura uma alteração comum em processos de desidratação. Além do aspecto da qualidade do produto, reduções de volume implicam em diminuição na produtividade do processo. Na tentativa de reduzir o encolhimento promovido durante a DOAU, a otimização foi executada visando maximizar o volume proporcional das fatias de yacon.

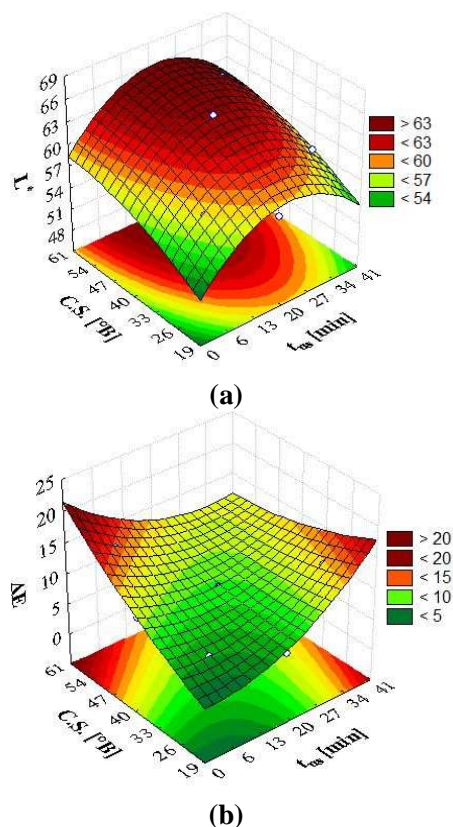
### Alterações colorimétricas

A coloração do produto é um dos principais parâmetros indicativos da qualidade (Singh et al. 2008). Amostras frescas de yacon apresentaram valores de  $L^*=53,96\pm 2,56$ ,  $a^*=3,42\pm 2,12$  e  $b^*=15,56\pm 1,29$ , valores próximos aos observados por Bernstein e Noreña (2013), as amostras apresentaram coloração amarelo claro (Fante et al. 2013). Os valores obtidos para a coloração das fatias de yacon após DOAU analisada em termos dos parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e  $\Delta E$ ) são apresentadas nas **Tabelas 5a e 5b**, para amostras tratadas em soluções de sorbitol e xilitol, respectivamente.

A magnitude dos p-valores da **Tabela 6** revelaram que o  $t_{us}$  apresentou efeito linear significativo apenas sobre a redução dos valores de  $a^*$  ( $p_s=0,0026$ ;  $p_x=0,0034$ ), contribuindo portanto para tornar as amostras mais esverdeadas. O  $t_{us}$  apresentou ainda efeito quadrático significativo sobre os parâmetros  $a^*$  e  $b^*$ , de ambos os agentes osmóticos e sobre  $L^*$  e  $\Delta E$  de amostras tratadas com xilitol. O efeito do ultrassom em alterações na coloração de maçãs durante DOAU foram retratadas por Deng e Zhao (2008), o efeito das ondas ultrassônicas é associado ao fato de promoverem danos físicos que aumentam a permeabilidade das membranas celulares, contribuindo para facilitar a lixiviação de pigmentos através do tecido do produto (Gabaldo'n-Leyva et al. 2007). Além disso, o ultrassom é empregado com a função de reduzir a atividade enzimática (Awad et al. 2012), sendo portanto possível que seu efeito na coloração das amostras tenha ação na inativação da atividade residual das enzimas polifenoloxidasas, que atuam no escurecimento do yacon.

A concentração da solução apresentou efeito linear positivo sobre os valores de todos os parâmetros de cor ( $p<0,05$ ) (**Tabela 6**), para ambos os agentes osmóticos avaliados. Contribuindo portanto para tornar as amostras mais claras (pelo aumento do  $L^*$ ), com coloração mais avermelhada (pelo aumento do  $a^*$ ) e amareladas (pelo aumento do valor de  $b^*$ ) após a desidratação osmótica. A

variação total de cor ( $\Delta E$ ), que exprime a combinação dos valores de  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , é um parâmetro colorimétrico extensivamente utilizado para caracterizar a variação na cor de alimentos durante processos (Bernstein & Noreña 2013). Na DOAU de fatias de yacon, a análise de  $\Delta E$  mostrou que o incremento na concentração das soluções osmóticas aumentou a diferença entre as amostras após DOAU e as amostras padrão (yacon fresco), a C.S. também promoveu aumento na variação total da cor durante DO de groselha indiana (Shafiq et al. 2010). A C.S. apresentou efeito positivo ( $\beta_s=4,0106$ ;  $\beta_x=2,3965$ ) sobre os valores de  $L^*$ , tornando as amostras mais claras, efeito semelhante da C.S. foi observado em cenouras (Singh et al. 2008). Esse resultado mostra que o aumento da C.S. inibiu os efeitos do escurecimento enzimático nas fatias de yacon, provavelmente devido à intensa transferência de massa que resultou em migração parcial de pigmentos (Deng & Zhao 2008). A significância do efeito da interação  $t_{us}$  X C.S. ( $p<0,05$ ), mostrou que o aumento concomitante dos tempos de ultrassom e das concentrações das soluções osmóticas contribuíram para a redução dos valores de  $a^*$ ,  $b^*$  e  $\Delta E$  das fatias de yacon após DOAU. A **Figura 3** mostra o efeito da C.S. e  $t_{us}$  sobre os valores de  $L^*$  (a) e  $\Delta E$  (b) de fatias de yacon tratadas com solução de xilitol.



**Figura 3** Superfícies de resposta para valores de  $L^*$  (a) e variação total de cor ( $\Delta E$ ) (b) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de xilitol.

A adequação dos modelos experimentais obtidos para os parâmetros de cor foi testada segundo análise de variância dos dados, **Tabela 7**. Todos os modelos mostraram-se válidos, com  $p$ -valor < 0,05; além de coeficientes de correlação superiores a 80%. Para a otimização dos resultados, buscando manter as características das amostras o mais próximas possível das amostras frescas, os valores de  $L^*$  e  $b^*$  devem ser maximizados, enquanto  $a^*$  e  $\Delta E$  minimizados para que se confira melhores atributos de qualidade aos produtos, permanecendo-se a descrição de visual de amarelo-claro nas amostras.

**Tabela 5a** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta dos parâmetros de cor das fatias de yacon tratadas com sorbitol

t <sub>us</sub> [min]	C.S. [°B]	L*	a*	b*	ΔE
5,858 (-1)	25,858 (-1)	57,58±4,72	2,14±0,49	15,03±2,07	5,21±3,04
34,142 (1)	25,858 (-1)	57,73±2,77	5,00±0,90	19,66±0,91	7,51±2,41
5,858 (-1)	54,142 (1)	63,30±4,27	7,93±0,25	24,16±1,25	13,02±3,59
34,142 (1)	54,142 (1)	63,15±5,86	2,30±0,60	18,19±1,09	9,17±2,39
0 (-1,4142)	40 (0)	55,82±1,64	5,38±0,72	20,28±1,55	5,63±1,52
40 (1,4142)	40 (0)	54,66±1,94	3,99±0,76	23,55±0,62	9,63±1,14
20 (0)	20 (-1,4142)	51,62±2,52	3,67±0,72	15,42±0,78	3,38±1,26
20 (0)	60 (1,4142)	66,42±0,60	4,10±0,95	20,36±1,22	15,35±4,65
20 (0)	40 (0)	56,79±3,21	3,62±1,06	17,91±1,25	7,17±1,75
20 (0)	40 (0)	56,33±1,41	3,42±0,99	17,89±1,29	7,15±1,35
20 (0)	40 (0)	57,58±2,77	3,65±0,35	18,71±0,68	7,20±1,06
20 (0)	40 (0)	56,16±2,64	3,77±0,77	18,01±1,89	7,85±3,70
20 (0)	40 (0)	56,22±0,78	3,48±0,22	19,13±1,70	7,67±1,32

t<sub>us</sub>: tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; min: minutos; °B: grau Brix; L\*, a\* e b\*: parâmetros de cor; ΔE: variação total de cor. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.

**Tabela 5b** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta dos parâmetros de cor das fatias de yacon tratadas com xilitol

t <sub>us</sub> [min]	C.S. [°B]	L*	a*	b*	ΔE
5,858 (-1)	25,858 (-1)	58,73±3,89	2,26±2,79	18,67±2,11	7,21±2,98
34,142 (1)	25,858 (-1)	60,86±3,43	5,30±0,89	23,32±3,66	13,46±2,86
5,858 (-1)	54,142 (1)	61,20±2,34	7,85±0,98	26,29±3,40	14,57±2,94
34,142 (1)	54,142 (1)	63,44±4,02	2,49±0,40	23,24±3,11	10,34±3,83
0 (-1,4142)	40 (0)	56,75±3,06	5,56±0,68	23,63±2,55	10,06±1,38
40 (1,4142)	40 (0)	58,22±5,04	3,67±1,29	23,75±1,36	12,73±2,69
20 (0)	20 (-1,4142)	56,82±1,59	2,91±0,46	16,81±2,40	5,53±2,74
20 (0)	60 (1,4142)	66,81±1,64	3,50±1,65	20,59±3,17	13,24±6,31
20 (0)	40 (0)	64,32±2,89	2,91±3,02	21,94±4,73	7,45±4,60
20 (0)	40 (0)	62,03±2,34	3,08±0,89	19,72±3,31	8,70±2,94
20 (0)	40 (0)	63,81±1,80	3,09±1,49	21,29±4,53	8,83±3,57
20 (0)	40 (0)	64,10±2,74	3,11±0,80	21,22±4,01	9,12±3,53
20 (0)	40 (0)	64,86±3,24	3,12±0,21	21,76±3,24	8,98±4,56

t<sub>us</sub>: tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; min: minutos; °B: grau Brix; L\*, a\* e b\*: parâmetros de cor; ΔE: variação total de cor. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.



**Tabela 6** Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis de parâmetros de cor observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

	Sorbitol							
	L*		a*		b*		ΔE	
	CR	p-valor	CR	p-valor	CR	p-valor	CR	p-valor
Intercepto	56,6148	<0,0001*	3,5900	<0,0001*	18,3296	<0,0001*	7,4061	<0,0001*
β <sub>1</sub>	-0,2029	0,8065	-0,5921	0,0026*	0,4104	0,2708	0,5135	0,3385
β <sub>11</sub>	0,1402	0,8744	0,5628	0,0048*	1,6315	0,0030*	0,1695	0,7610
β <sub>2</sub>	4,0106	0,0015*	0,4629	0,0090*	1,8295	0,0011*	3,2988	0,0003*
β <sub>22</sub>	2,0285	0,0495*	0,1601	0,2864	-0,3819	0,3341	1,0389	0,0938
β <sub>1</sub> β <sub>2</sub>	-0,0727	0,9504	-2,1250	<0,0001*	-2,6494	0,0009*	-1,5375	0,0661
	Xilitol							
Intercepto	63,8244	<0,0001*	3,0616	<0,0001*	21,1869	<0,0001*	8,6158	<0,0001*
β <sub>1</sub>	0,8054	0,2149	-0,6239	0,0034*	0,2215	0,6096	0,7234	0,1264
β <sub>11</sub>	-2,8169	0,0030*	0,9178	0,0006*	1,6736	0,0070*	1,6414	0,0080*
β <sub>2</sub>	2,3965	0,0048*	0,4515	0,0163*	1,6105	0,0060*	1,8925	0,0027*
β <sub>22</sub>	-0,6541	0,3361	0,2138	0,2075	-0,8232	0,1065	0,6376	0,1971
β <sub>1</sub> β <sub>2</sub>	0,0272	0,9750	-2,1003	<0,0001*	-1,9221	0,0135*	-2,6214	0,0030*

(\*) indica coeficiente significativo, com p-valor<0,05; t<sub>us</sub>: tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; CR: coeficiente da regressão; L\*, a\* e b\*: parâmetros de cor; ΔE: variação total de cor.

**Tabela 7** Análise de variância dos modelos quadráticos para os parâmetros de cor de fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

Variáveis	Modelo			
	GL	QM	p-valor	R <sup>2</sup>
L*				
sorbitol	5	31,5520	0,0165	81%
xilitol	5	21,3834	0,0093	84%
a*				
sorbitol	5	4,9675	0,0001	96%
xilitol	5	5,6624	0,0001	96%
b*				
sorbitol	5	15,4441	0,0010	92%
xilitol	5	12,6157	0,0056	87%
ΔE				
sorbitol	5	21,2282	0,0036	88%
xilitol	5	16,0677	0,0028	89%

L\*, a\* e b\*: parâmetros de cor; ΔE: variação total de cor; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; R<sup>2</sup>: coeficiente de correlação.

#### Alterações nas propriedades mecânicas: Compressão uniaxial

As amostras frescas de fatias de yacon apresentaram valores de tensão de ruptura ( $\sigma_{HF}$ ) de  $267,75 \pm 18,44$  kPa, deformação na ruptura de ( $\epsilon_{HF}$ ) de  $0,63 \pm 0,08$  e módulo de elasticidade ( $E_d$ ) de  $36,29 \pm 12,48$  kPa. Após DOAU das amostras observou-se redução nos valores da tensão de ruptura e módulo de elasticidade, que variaram de 82,04 a 222,86 kPa e 1,71 a 17,31 kPa, respectivamente; além de aumento na deformação, que variou na amplitude de 0,81 a 1,39; **Tabelas 8a e 8b**. Esses resultados mostraram que o produto se tornou mais macio e borrachento, apesar de menos rígido. Comportamentos semelhantes foram observados por Vicente et al. (2012) após desidratação osmótica de maçãs tanto utilizando solução de glicose e como de trealose.

A avaliação dos efeitos das variáveis independentes mostrou que a C.S. apresentou efeito linear negativo para a tensão de ruptura ( $\beta_s = -36963,25$ ;  $\beta_x = -24502,36$ ) e módulo de elasticidade ( $\beta_s = -2590,13$ ;  $\beta_x = -584,64$ ) e efeito linear positivo para a deformação ( $\beta_s = 0,1729$ ;  $\beta_x = 0,1277$ ) para ambos os agentes osmóticos (**Tabela 9**). O  $t_{us}$  também influenciou nas alterações das propriedades mecânicas das fatias de yacon durante DOAU, apresentando efeito quadrático significativo sobre a tensão de ruptura e a deformação na ruptura das amostras de ambas as soluções e efeito quadrático sobre o módulo de elasticidade de amostras tratadas com xilitol.

A influência da C.S. na textura das amostras desidratadas pode ser associada ao fato de exercer influência na redução dos teores de umidade e na incorporação de solutos durante a DOAU. O colapso promovido nas células devido aos efeitos da plasmólise causa intensa perda do turgor celular, podendo provocar até a ruptura de membranas, essas alterações reduzem o módulo de elasticidade e aumentam a deformação das amostras (Vicente et al. 2012). A redução da tensão de ruptura é atribuída, além da perda de turgor das células, a alterações ocorridas na parede celular (Vicente et al. 2012). O  $t_{us}$ , além de

promover danos celulares por mecanismos de cavitação e “efeito esponja” (Cárcel et al. 2012), com formação de microcanais, atua acentuando a saída de água e a entrada de sólidos solúveis na matriz das amostras (Garcia-Noguera et al. 2010; Noshad et al. 2012). A intensificação da transferência de massa, que nesse trabalho foi promovida pelo aumento da C.S. e do  $t_{us}$ , tende a reduzir valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade e aumentar a deformação das amostras devido ao maior nível de desidratação (com perda da turgescência) e degradação nas regiões de ligações intercelulares na zona da lamela média (Mayor et al. 2007; Castelló et al. 2009; Nieto et al. 2013). A redução do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura durante processos osmóticos são amplamente retratadas na literatura (Castelló et al. 2009; Vicente et al. 2012; Nieto et al. 2013) e estão relacionados à perda de turgor celular promovido pela saída de água das amostras e à penetração dos açúcares que tendem a ocupar os espaços intercelulares, reduzindo a elasticidade e tornando a estrutura do produto mais plástica (Mayor et al. 2007). O efeito positivo da C.S. no aumento da deformação está relacionado à sua grande influência na redução da umidade durante o processo osmótico, e foi observado em abóboras (Mayor et al. 2007) e maçãs (Castelló et al. 2009) após DO.

**Tabela 8a** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta das propriedade mecânicas das fatias de yacon tratadas com sorbitol

$t_{us}$ [min]	C.S. [°B]	$\sigma_{HF}$ [kPa]	$\epsilon_{HF}$	$E_d$ [kPa]
5,858 (-1)	25,858 (-1)	222,86±23,36	0,86±0,12	4,55±1,19
34,142 (1)	25,858 (-1)	209,04±8,90	0,94±0,27	6,20±0,95
5,858 (-1)	54,142 (1)	101,39±8,87	1,22±0,24	5,17±1,99
34,142 (1)	54,142 (1)	132,40±16,90	1,36±0,22	3,38±0,57
0 (-1,4142)	40 (0)	122,08±25,60	1,23±0,09	2,87±0,44
40 (1,4142)	40 (0)	137,27±21,79	1,09±0,20	4,18±0,92
20 (0)	20 (-1,4142)	226,30±9,06	0,87±0,39	17,31±5,97
20 (0)	60 (1,4142)	157,30±23,09	1,29±0,13	4,22±0,19
20 (0)	40 (0)	216,60±18,47	1,34±0,27	5,34±1,04
20 (0)	40 (0)	202,86±12,21	1,32±0,26	5,04±1,10
20 (0)	40 (0)	196,07±31,64	1,33±0,23	4,49±0,76
20 (0)	40 (0)	204,34±26,28	1,39±0,22	4,46±1,09
20 (0)	40 (0)	209,70±17,20	1,35±0,18	4,15±1,01

$t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; min: minutos; °B: grau Brix;  $\sigma_{HF}$ : tensão de ruptura;  $\epsilon_{HF}$ : deformação na ruptura;  $E_d$ : módulo de elasticidade; kPa: quilopascal. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.

**Tabela 8b** Delineamento central composto rotacional com valores experimentais das variáveis resposta das propriedade mecânicas das fatias de yacon tratadas com xilitol

$t_{us}$ [min]	C.S. [°B]	$\sigma_{HF}$ [kPa]	$\epsilon_{HF}$	$E_d$ [kPa]
5,858 (-1)	25,858 (-1)	159,41±9,79	0,81±0,22	3,76±1,30
34,142 (1)	25,858 (-1)	149,66±25,63	0,91±0,29	4,91±2,91
5,858 (-1)	54,142 (1)	82,04±29,05	1,06±0,13	2,66±2,04
34,142 (1)	54,142 (1)	100,21±14,03	1,21±0,16	4,24±1,26
0 (-1,4142)	40 (0)	101,77±30,95	1,13±0,24	4,25±1,74
40 (1,4142)	40 (0)	101,74±24,96	1,01±0,21	4,09±1,46
20 (0)	20 (-1,4142)	188,79±9,18	0,84±0,09	3,78±1,68
20 (0)	60 (1,4142)	139,85±9,93	1,18±0,06	1,71±0,94
20 (0)	40 (0)	149,47±16,04	1,18±0,59	2,86±0,55
20 (0)	40 (0)	149,83±25,56	1,19±0,54	2,51±1,66
20 (0)	40 (0)	140,77±21,45	1,23±0,16	2,83±0,71
20 (0)	40 (0)	148,10±14,57	1,15±0,07	2,64±0,22
20 (0)	40 (0)	152,57±22,90	1,15±0,59	2,75±1,67

$t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; min: minutos; °B: grau Brix;  $\sigma_{HF}$ : tensão de ruptura;  $\epsilon_{HF}$ : deformação na ruptura;  $E_d$ : módulo de elasticidade; kPa: quilopascal. Valores entre parênteses representam os pontos experimentais na escala codificada.

**Tabela 9** Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão para as variáveis de propriedades mecânicas observadas em relação às fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

	Sorbitol					
	$\sigma_{HF}$		$\varepsilon_{HF}$		$E_d$	
	CR	p-valor	CR	p-valor	CR	p-valor
Intercepto	205915,81	0,0000*	1,3478	0,0000*	4693,88	0,0045*
$\beta_1$	4835,65	0,3911	0,0041	0,8631	214,73	0,8184
$\beta_{11}$	-36697,71	0,0003*	-0,0977	0,0056*	-1166,11	0,2665
$\beta_2$	-36963,25	0,0002*	0,1729	0,0001*	-2590,13	0,0238*
$\beta_{22}$	-5635,08	0,3537	-0,1407	0,0008*	2456,60	0,0385*
$\beta_1 \beta_2$	11209,39	0,1777	0,0129	0,7054	-861,01	0,5207
	Xilitol					
Intercepto	148150,57	0,0000*	1,1811	0,0000*	2718,53	0,0000*
$\beta_1$	1048,25	0,7771	0,0104	0,6751	314,62	0,1160
$\beta_{11}$	-25750,37	0,0003*	-0,0656	0,0368*	835,06	0,0030*
$\beta_2$	-24502,36	0,0002*	0,1277	0,0010*	-584,64	0,0125*
$\beta_{22}$	5533,47	0,1908	-0,0957	0,0071*	122,57	0,5355
$\beta_1 \beta_2$	6979,40	0,2085	0,0122	0,7265	103,27	0,6897

(\*) indica coeficiente significativo, com p-valor<0,05;  $t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica; CR: coeficiente da regressão;  $\sigma_{HF}$ : tensão de ruptura;  $\varepsilon_{HF}$ : deformação na ruptura;  $E_d$ : módulo de elasticidade.

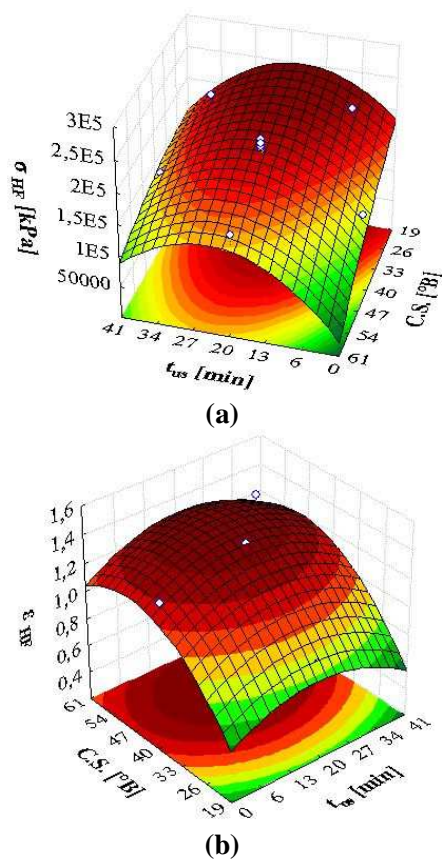
**Tabela 10** Análise de variância dos modelos quadráticos para as propriedades mecânicas das fatias de yacon desidratadas osmoticamente com ultrassom

Variáveis	Modelo			
	GL	QM	p-valor	R <sup>2</sup>
$\sigma_{HF}$				
sorbitol	5	4198703888,7172	0,0006	93%
xilitol	5	2035777156,9400	0,0005	93%
$\varepsilon_{HF}$				
sorbitol	5	0,0844	0,0005	93%
xilitol	5	0,0431	0,0050	87%
$E_d$				
sorbitol	5	22924967,7731	0,0651	71%
xilitol	5	1684251,5005	0,0127	83%

$\sigma_{HF}$ : tensão de ruptura;  $\varepsilon_{HF}$ : deformação na ruptura;  $E_d$ : módulo de elasticidade; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; R<sup>2</sup>: coeficiente de correlação.

A análise de variância dos modelos de regressão que predizem os parâmetros de compressão das fatias de yacon após DOAU mostrou bom ajuste dos modelos aos dados experimentais, com p-valor<0,05 e R<sup>2</sup> superior a 83%,

**Tabela 10.** Exceto o modelo gerado para a variável módulo de elasticidade obtida com solução de sorbitol, que não se ajustou aos dados. A **Figura 4** mostra o comportamento da tensão de ruptura (a) e da deformação na ruptura (b) sobre efeito do  $t_{us}$  e da C.S. de sorbitol.



**Figura 4** Superfícies de resposta para valores de tensão de ruptura (a) e deformação na ruptura (b) de fatias de yacon submetidas a DOAU com solução de sorbitol.

A otimização dos parâmetros de DOAU das fatias de yacon deve ser feita de modo a maximizar a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade e minimizar a deformação na ruptura. Essa configuração visa alcançar um produto

final com as características de textura próximas às observadas nos produtos frescos, reduzindo assim as alterações durante o processamento.

#### Otimização

Os resultados das análises de variância dos modelos preditos mostrou que apenas o modelo gerado para a variável  $E_d$  (módulo de elasticidade) de amostras tratadas com sorbitol não apresentou bom ajuste aos dados, não sendo portanto empregada na otimização do processo, as demais regressões apresentaram bons ajustes.

Na atribuição das condições de desejabilidade individual ( $0 \leq d \leq 1$ ) foram selecionadas as variáveis de maior relevância para a condição final: teor de umidade, conteúdo de sólidos solúveis totais, valor  $L^*$ , variação total de cor. Para as quais a maior desejabilidade individual (1) foi atribuída apenas para os valores desejados, sendo que os valores intermediários receberam desejabilidade mediana (0,5) e os valores não-desejados, desejabilidade nula (0). Enquanto que, para as variáveis de menor relevância no produto final ( $V/V_0$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\sigma_{HF}$ ,  $\varepsilon_{HF}$ ,  $E_d$ ) foram atribuídas a desejabilidade máxima (1) para os valores desejados e para os valores intermediários, os valores não-desejados receberam desejabilidade nula (0), **Tabelas 11a e 11b.**

**Tabela 11a** Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade para amostras tratadas com sorbitol

Valor atribuído	Condições para as respostas				
	U <sub>bs</sub> [%]	SST [°B]	V/V <sub>0</sub> [%]	L*	a*
Mínimos	3,38 (1)	13,98 (1)	43,63 (0)	51,61 (0)	2,14 (1)
Médios	4,91 (0,5)	22,16 (0,5)	54,14 (1)	59,02 (0,5)	5,03 (1)
Máximos	6,45 (0)	30,35 (0)	64,65 (1)	66,42 (1)	7,93 (0)
	b*	ΔE	σ <sub>HF</sub> [kPa]	ε <sub>HF</sub>	E <sub>d</sub> [kPa]
Mínimos	15,02 (0)	3,38 (1)	101,4 (0)	0,85 (1)	-
Médios	19,59 (1)	9,37(0,5)	163,8 (1)	1,12 (1)	-
Máximos	24,15 (1)	15,35 (0)	226,3 (1)	1,39 (0)	-

U<sub>bs</sub>: teor de umidade; SST: conteúdo de sólidos solúveis totais; V/V<sub>0</sub>: volume proporcional; L\*, a\* e b\*: parâmetros de cor; ΔE: variação total de cor; σ<sub>HF</sub>: tensão de ruptura; ε<sub>HF</sub>: deformação na ruptura; E<sub>d</sub>: módulo de elasticidade; °B: grau Brix; kPa: quilopascal.

**Tabela 11b** Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade para amostras tratadas com xilitol

Valor atribuído	Condições para as respostas				
	U <sub>bs</sub> [%]	SST [°B]	V/V <sub>0</sub> [%]	L*	a*
Mínimos	2,74 (1)	17,41 (1)	36,66 (0)	56,75 (0)	2,26 (1)
Médios	4,09 (0,5)	28,44 (0,5)	46,56 (1)	61,78 (0,5)	5,05 (1)
Máximos	5,43 (0)	39,48 (0)	56,46 (1)	66,81 (1)	7,85 (0)
	b*	ΔE	σ <sub>HF</sub> [kPa]	ε <sub>HF</sub>	E <sub>d</sub> [kPa]
Mínimos	16,81 (0)	5,53 (1)	82,04 (0)	0,81 (1)	1,71 (0)
Médios	21,55 (1)	10,05 (0,5)	135,4 (1)	1,02 (1)	3,31 (1)
Máximos	26,29 (1)	14,57 (0)	188,8 (1)	1,23 (0)	4,91 (1)

U<sub>bs</sub>: teor de umidade; SST: conteúdo de sólidos solúveis totais; V/V<sub>0</sub>: volume proporcional; L\*, a\* e b\*: parâmetros de cor; ΔE: variação total de cor; σ<sub>HF</sub>: tensão de ruptura; ε<sub>HF</sub>: deformação na ruptura; E<sub>d</sub>: módulo de elasticidade; °B: grau Brix; kPa: quilopascal.

As otimizações da DOAU de fatias de yacon considerando as condições do processo já descritas, para soluções de sorbitol e de xilitol são apresentadas na **Tabela 12**.

A avaliação simultânea das respostas experimentais de amostras tratadas com sorbitol resultou no perfil de desejabilidade apresentado na **Figura 5**. O processo otimizado de DOAU com sorbitol apresentou desejabilidade de 0,76; t<sub>us</sub> de 0,67 min e C.S. de 36,67 °B.

A análise simultânea das respostas experimentais das amostras tratadas com xilitol apresentaram o perfil de desejabilidade apresentado na **Figura 6**. Os



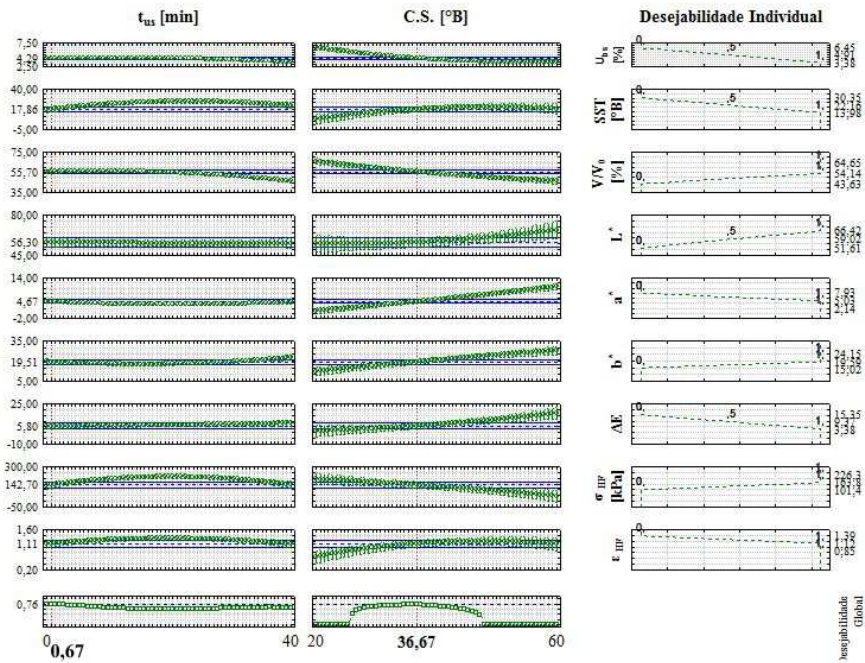
tratamentos com xilitol foram otimizados segundo uma função com desejabilidade de 0,76,  $t_{us}$  de 29,33 minutos e C.S. de 30,67 °B.

Os valores de desejabilidade encontrados para ambos os planejamentos avaliados (sorbitol e xilitol) foram considerados aceitáveis e bons segundo critérios de Akhnazarova e Kafarov (1982) que engloba valores entre 0,63 e 0,80 para a função desejabilidade. Baseados nas condições otimizadas, os valores preditos para cada variável resposta são listados na **Tabela 12**.

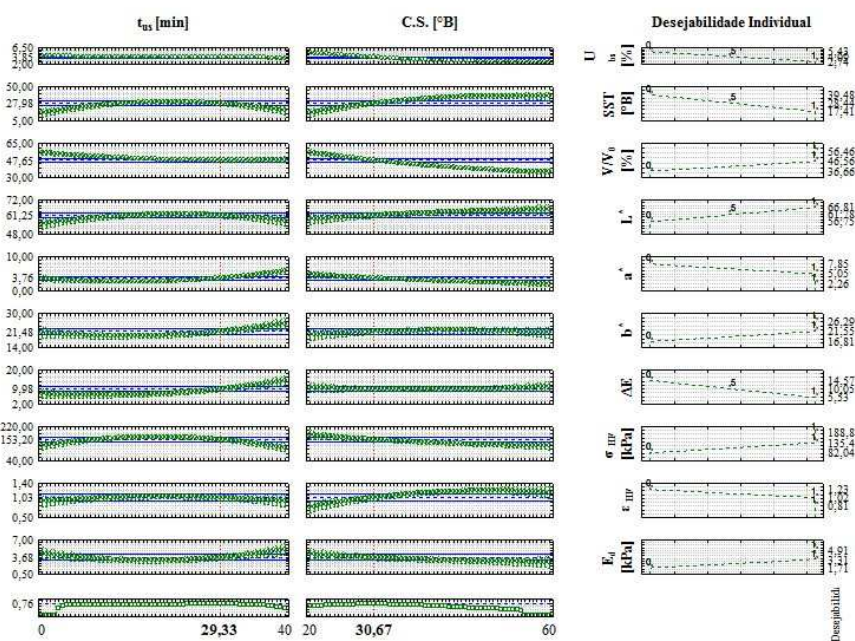
**Tabela 12** Critérios de otimização da DOAU de fatias de yacon com sorbitol e com xilitol e soluções das condições ótimas

	Sorbitol		Xilitol
	Objetivo	Condição otimizada	Condição otimizada
$t_{us}$		0,67 min	29,33 min
C.S.		36,67 °B	30,67 °B
$U_{bs}$	Min.	4,29 %	3,85 %
SST	Min.	17,86 %	27,98 %
$V/V_0$	Max.	55,70 %	47,65 %
$L^*$	Max.	56,30	61,25
$a^*$	Min.	4,67	3,76
$b^*$	Max.	19,51	21,48
$\Delta E$	Min.	5,80	9,98
$\sigma_{HF}$	Max.	142,70 kPa	153,20 kPa
$\epsilon_{HF}$	Min.	1,11	1,03
$E_d$	Max.	-	3,68 kPa

$t_{us}$ : tempo de aplicação do ultrassom; C.S.: concentração da solução osmótica;  $U_{bs}$ : teor de umidade; SST: conteúdo de sólidos solúveis totais;  $V/V_0$ : volume proporcional;  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ : parâmetros de cor;  $\Delta E$ : variação total de cor;  $\sigma_{HF}$ : tensão de ruptura;  $\epsilon_{HF}$ : deformação na ruptura;  $E_d$ : módulo de elasticidade; min: minutos; °B: grau Brix; kPa: quilopascal.



**Figura 5** Otimização simultânea da DOAU de fatias de yacon em solução de sorbitol, variáveis do processo e desejabilidade individual e global.



**Figura 6** Otimização simultânea da DOAU de fatias de yacón em solução de xilitol, variáveis do processo e deseabilidade individual e global.

Um fato importante a ser analisado é que apesar de ambos os processos de otimização terem alcançado o mesmo valor de deseabilidade (0,76), a condição otimizada para as amostras tratadas com sorbitol apresentou resultados preditos mais próximos dos desejados para as variáveis respostas de maior relevância (sólidos solúveis totais,  $L^*$  e variação total de cor), enquanto que a condição otimizada para o xilitol se destacou apenas para a resposta do conteúdo de sólidos solúveis totais, dentre as respostas de maior relevância. Desta forma, a condição de 36,67°B de solução osmótica de sorbitol e  $t_{us}$  de 0,67 minuto foi considerada mais adequada para obtenção de melhores respostas de parâmetros de qualidade na DOAU de fatias de yacón.

#### 4 Conclusão

O DCCR e as superfícies de respostas dos modelos gerados foram capazes de descrever o comportamento dos dados experimentais para as variáveis resposta analisadas, para as amostras tratadas com quaisquer agente osmótico testado. Exceto as respostas de  $E_d$  para amostras de sorbitol, cujos resultados não foram bem representados no modelo polinomial de segunda ordem proposto.

As análises de variância mostraram que tanto o  $t_{us}$  como a C.S. apresentaram efeitos significativos sobre todas as variáveis respostas analisadas, ao menos para um dos agentes osmóticos.

Foram encontradas condições otimizadas para os tratamentos com sorbitol e xilitol através da aplicação da função desejabilidade para maximizar as respostas de:  $V/V_0$ ,  $L^*$ ,  $b^*$ ,  $\sigma_{HF}$  e  $E_d$ ; e minimizar as respostas de:  $U_{bs}$ , SST,  $a^*$ ,  $\Delta E$  e  $\varepsilon_{HF}$ . A otimização das amostras tratadas com sorbitol corresponde ao  $t_{us}$  de 31,33 minutos e C.S. de 22,23 °B. Enquanto que a resposta otimizada para os tratamentos com xilitol condiz com os valores de  $t_{us}$  de 29,33 minutos e C.S. de 27,33 °B.

A análise das respostas preditas para ambas as condições otimizadas, tratamentos com sorbitol e xilitol, mostrou que a condição obtida com solução de sorbitol é mais adequada para a DOAU de fatias de yacon.

#### 5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à Fapemig (476019/2012-5) pelo apoio financeiro.

## Referências

- A.O.A.C., 1995. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists* 16th ed. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS, ed., Arlington:VA, USA.
- Akhnazarova, S. & Kafarov, V., 1982. *Experiment optimization in chemistry and chemical engineering*. Mir, ed., Moscow.
- Allali, H., Marchal, L. & Vorobiev, E., 2010. Blanching of strawberries by ohmic heating: effects on the kinetics of mass transfer during osmotic dehydration. *Food and Bioprocess Technology*, 3, pp.406–414.
- Andreola, K., 2013. *Secagem de cenoura (Daucus carota L.) assistida por micro-ondas*. Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia Química. Dissertação de mestrado.
- Arballo, J.R. et al., 2012. Mass transfer kinetics and regression-desirability optimisation during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(2), pp.306–314.
- Awad, T., Moharram, H. & Shaltout, O., 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48, pp.410–427.
- Bernstein, A. & Noreña, C., 2013. Study of thermodynamic, structural, and quality properties of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) during drying. *Food and Bioprocess Technology*.
- Cárcel, J. a. et al., 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 110(2), pp.200–207.
- Cárcel, J. a. et al., 2007. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78(2), pp.472–479.
- Castelló, M. et al., 2009. Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (Var. Granny Smith). *Journal of Food Engineering*, 91, pp.1–9.
- Castro-Giráldez, M. et al., 2011. Analysis of chemical and structural changes in kiwifruit (*Actinidia deliciosa* cv Hayward) through the osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 105(4), pp.599–608.
- Chauhan, O.P. et al., 2011. Effects of Osmotic Agents on Colour, Textural, Structural, Thermal, and Sensory Properties of Apple Slices. *International Journal of Food Properties*, 14(5), pp.1035–1048.
- Deng, Y. & Zhao, Y., 2008. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture,

- microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). *LWT-Food Science and Technology*, 41, pp.1575–1585.
- Derossi, a. et al., 2008. Mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 86(4), pp.519–528.
- Derringer, G. & Suich, R., 1980. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal Quality Technology*, 12, pp.214–219.
- Fanta, S., Abera, M. & Aregawi, W., 2014. Microscale modeling of coupled water transport and mechanical deformation of fruit tissue during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 124, pp.86–96.
- Fante, L. et al., 2013. Study of enzyme inactivation using steam in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) roots. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37, pp.16–24.
- Fernandes, F. a. N. & Rodrigues, S., 2008. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. *Drying Technology*, 26(12), pp.1509–1516.
- Fernandes, F., Gallão, M. & Rodrigues, S., 2008. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT-Food Science and Technology*, 41, pp.604–610.
- Fernandes, F.A.N. et al., 2011. Drying of exotic tropical fruits: a comprehensive review. *Food and Bioprocess Technology*, 4, pp.163–185.
- Fernandes, F.A.N., Gallão, M.I. & Rodrigues, S., 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), pp.186–190.
- Ferrari, C.C. & Hubinger, M., 2008. Evaluation of the mechanical properties and diffusion coefficients of osmodehydrated melon cubes. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(11), pp.2065–2074.
- Gabaldo'n-Leyva, C.A. et al., 2007. Effect of ultrasound on the mass transfer and physical changes in brine bell pepper at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, 81(374-379).
- Garcia-Noguera, J. et al., 2010a. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), pp.294–303.
- Garcia-Noguera, J. et al., 2010b. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), pp.294–303.
- Garcia-Perez, J., Ortuño, C. & Puig, A., 2012. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. *Food and Bioprocess Technology*, 5, pp.2256–2265.
- Genta, S. et al., 2009. Yacon syrup: beneficial effects on obesity and insulin resistance in humans. *Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland)*, 28(2), pp.182–7. Gliemmo, M.F. et al., 2010. Effect of sweet solutes on the

- quality of a pumpkin puree (*Cucurbita moschata* duchesne ex poiret) preserved by the hurdle technology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34, pp.1024–1040.
- Habib, N.C. et al., 2011. Hypolipidemic effect of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots on diabetic rats: biochemical approach. *Chemico-biological interactions*, 194(1), pp.31–9.
- Justus, A., 2012. *Influência da aplicação de ondas de ultrassom na desidratação osmótica de tomates (*Lycopersicon esculentum*) cv. Carmem*. Universidade Federal de Lavras: Programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos. Dissertação de mestrado.
- Karizaki, V.M. et al., 2013. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment on deep fat frying of potatoes. *Food and Bioprocess Technology*, 6, pp.3554–3563.
- Katsiferis, T., Zogzas, N. & Karathanos, V., 2008. Mechanical properties and structure of unripe oranges during processing of “spoon sweets.” *Journal of Food Engineering*, 89, pp.149–155.
- Kek, S., Chin, N. & Yusof, Y., 2013. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91, pp.495–506.
- Khan, M., 2012. Osmotic dehydration technique for fruits preservation-A review. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 22(2), pp.71–85.
- Kotovicz, V. et al., 2013. Influence of process conditions on the kinetics of the osmotic dehydration of yacon (*Polymnia sonchifolia*) in fructose solution. *Journal of Food Process and Preservation*.
- De la Fuente, S. et al., 2006. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, pp.e523–e527.
- Lee, J. & Lim, L., 2011. Osmo-dehydration pretreatment for drying of pumpkin slice. *International Food Research Journal*, 18(4), pp.1223–1230.
- Li, H. et al., 2012. Mass transfer evaluation of ultrasonic osmotic dehydration of cherry tomatoes in sucrose and salt solutions. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, pp.954–960. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.2011.02927.x/full> [Accessed December 22, 2013].
- Mason, T.J., 1998. Power ultrasound in food processing. The way forward. In T. J. Povey, M.J.W., Mason, ed. *Ultrasound in Food Processing*. London: Chapman & Hall, pp. 105–126.
- Mason, T.J. & Lorimer, J.P., 2002. *Applied Sonochemistry: The Uses Of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*, Weinheim, Germany.: Wiley-VCH.
- Mayor, L., Cunha, R. & Sereno, A., 2007. Relation between mechanical properties and structural changes during osmotic dehydration of pumpkin. *Food Research International*, 40, pp.448–460.

- Mayor, L., Moreira, R. & Sereno, A., 2011. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin ( Cucurbita pepo L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 103, pp.29–37.
- Mayor, L. & Sereno, A.M., 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), pp.373–386.
- Mundada, M., Singh, B. & Maske, S., 2010. Optimisation of processing variables affecting the osmotic dehydration of pomegranate arils. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, pp.1732–1738.
- Nahimana, H. et al., 2011. Mass transfer modeling and shrinkage consideration during osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Food Reviews International*, 27, pp.331–356.
- Nieto, A., Vicente, S. & Hodara, K., 2013. Osmotic dehydration of apple: influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility. *Journal of Food Engineering*, 119, pp.104–114.
- Noshad, M. et al., 2012. Multi-objective optimization of osmotic–ultrasonic pretreatments and hot-air drying of quince using response surface methodology. *Food Bioprocess Technology*, 5, pp.2098–2101.
- Oliveira, L.F. de, 2013. *Desidratação osmótica com pulso de vácuo e secagem a vácuo de yacon (Smallanthus sonchifolius)*. Universidade Federal de Lavras: Programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos. Tese de doutorado.
- Ozdemir, M. et al., 2008. Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 41, pp.2044–2050.
- Pereira, J.A.R. et al., 2013. Studies of chemical and enzymatic characteristics of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its flours. *Food Science and Technology*, 33(1), pp.75–83.
- Ramallo, L. & Mascheroni, R., 2010. Dehydrofreezing of pineapple. *Journal of Food Engineering*, 99, pp.269–275.
- Rasband, W.S., 2014. Image J. Available at: <http://imagej.nih.gov/ij/>.
- Reis, F.R. et al., 2012. Vacuum drying kinetics of yacon ( *Smallanthus sonchifolius* ) and the effect of process conditions on fractal dimension and rehydration capacity. *Drying Technology*, 30(1), pp.13–19.
- Rodrigues, M. & Iemma, A., 2012. *Experimental Design and Process Optimization*, Capinas, SP, Brazil: Ed. Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor.
- Rodríguez, A. & Mascheroni, R.H., 2012. Generalized Correlations for Characteristic Variables and Thermophysical Properties of Osmotically Dehydrated Fruits. *Drying Technology*, 30(11-12), pp.1323–1331.



- Sagar, V.R. & Kumar, P.S., 2009. Improvement of some process variables in mass transfer kinetics of osmotic dehydration of mango slices and storage stability. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 68, pp.1043–1048.
- Scher, C.F., Rios, A.O. & Noreña, C.P.Z., 2009. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(11), pp.2169–2175.
- Shafiq, A.M., Amarjit, S. & Sawhney, B., 2010. Response surface optimization of osmotic dehydration process for aonla slices. *Journal of Food Science and Technology*, 47(1), pp.47–54.
- Shamaei, S., Emam-djomeh, Z. & Moini, S., 2012. Modeling and optimization of ultrasound assisted osmotic dehydration of cranberry using response surface methodology. *Journal of Agricultural and Science Technology*, 14, pp.1523–1534.
- Shamaei, S., Emam-Djomeh, Z. & Moini, S., 2012. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties. *Journal of Texture Studies*, 43, pp.133–141.
- Singh, B. et al., 2010. Optimization of Osmotic Dehydration Process of Carrot Cubes in Mixtures of Sucrose and Sodium Chloride Solutions. *Food Chemistry*, 123, pp.590–600.
- Singh, B., Panesar, P. & Nanda, V., 2008. Optimization of osmotic dehydration process of carrot cubes in sucrose solution. *Journal of Food Process Engineering*, 31, pp.1–20.
- Soria, A.C. & Villamiel, M., 2010. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, (21), pp.323–331.
- Souraki, B., Ghavami, M. & Tondro, H., 2013. Correction of moisture and sucrose effective diffusivities for shrinkage during osmotic dehydration of apple in sucrose solution. *Food and Bioproducts Processing*.
- Sritongtae, B., Mahawanich, T. & Duangmal, K., 2011. Drying of osmosed cantaloupe: Effect of polyols on drying and water mobility. *Drying Technology*, 29, pp.527–535.
- STATISTICA, 2008. Data Analysis Software System. Available at: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Tonon, R., Baroni, A. & Hubinger, M., 2007. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. *Journal of Food Engineering*, 82, pp.509–517.
- Vicente, S., Nieto, A. & Hodara, K., 2012. Changes in structure, rheology, and water mobility of apple tissue induced by osmotic dehydration with

glucose or trehalose. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), pp.3075–3089.

### 3 CONCLUSÃO GERAL

Dentre os polióis avaliados como agentes osmóticos na desidratação osmótica (DO) de fatias de yacon, sorbitol e xilitol apresentaram-se mais adequados por exibir maior redução da atividade de água ( $a_w$ ), maior perda de água (PA) e ganho de sólidos (GS) intermediário.

A aplicação do ultrassom durante a DO apresentou efeito importante na degradação dos frutooligossacarídeos (FOS), não sendo recomendada a sua utilização em fatias de yacon por períodos de tempo prolongados.

Durante a otimização da desidratação osmótica assistida por ultrassom (DOAU), levando-se em conta as variáveis resposta PA, GS, retenção de frutanos (RFru) e  $a_w$ , as amostras tratadas com sorbitol apresentaram melhores respostas previstas na condição otimizada (0 min e 60°B) para as respostas de GS e  $a_w$ . Sendo considerada mais adequada que o xilitol para esse processo.

A investigação da otimização das fatias de yacon levando-se em conta os parâmetros de qualidade de produtos desidratados mostrou que o sorbitol apresentou respostas previstas mais próximas das desejadas na condição otimizada (0,67 min; 36,67°B). Sendo apontado como mais adequado que o xilitol nessas condições.