

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE YACON (*Smallanthus sonchifolius*)  
USANDO SOLUTOS ALTERNATIVOS À SACAROSE**

- Dissertação de Mestrado -

Bethania Brochier

Porto Alegre  
2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE YACON (*Smallanthus sonchifolius*)  
USANDO SOLUTOS ALTERNATIVOS À SACAROSE**

Bethania Brochier

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

**Orientador:**

**Prof. Dr. Caciano Pelayo Zapata Noreña**

**Co-orientadora:**

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ligia Damasceno Ferreira Marczak**

Porto Alegre

2013



Dedico este trabalho  
ao meu amor Vinícius  
e à nossa Luiza.

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Caciano e Ligia, orientadores deste trabalho, pelos seus conhecimentos, atenção, boa vontade e confiança durante a realização deste trabalho;

Ao meu marido por todo o amor e apoio durante esta etapa de mestrado;

À minha família e amigos que compreenderam minha ausência, sempre me incentivando;

Às colegas e amigas Cacau, Cibele e Luciana pela amizade e pelas palavras de incentivo;

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia e Processamento de Alimentos e ao grupo de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias pelo convívio e amizade nesses dois últimos anos;

Às pesquisadoras Giovana D. Mercali e Poliana Gurak pela colaboração e sugestões;

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Química pela ajuda e atenção prestada;

Ao Departamento de Engenharia Química pela estrutura física dos laboratórios disponibilizada;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e a CAPES pelo suporte e financiamento;

E a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Estudo da Desidratação Osmótica de Yacon (Smallanthus sonchifolius) usando solutos alternativos à sacarose*, elaborada por Bethania Brochier, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Renata Tonon

---

Prof. Dr. Adriano Brandelli

---

Dr<sup>ª</sup>. Giovana Domeneghini Mercali

## Resumo

O yacon (*Smallanthus sonchifolius*) é uma raiz tuberosa de origem andina, com elevado teor de fruto-oligossacarídeos, e, por isto, apresenta diversas propriedades promotoras à saúde, tais como: estímulo do crescimento e da atividade de probióticos, aumento da absorção de minerais, regularização da função intestinal e redução do colesterol sérico. No entanto, pela sua elevada quantidade de água, possui baixa vida útil em condições ambientais. A desidratação osmótica representa uma alternativa tecnológica para reduzir perdas pós-colheita e aumentar a durabilidade dos alimentos. O presente trabalho desenvolveu um estudo do uso dos solutos glicerol, maltodextrina, povidexose e sorbitol a fim de manter as propriedades do yacon osmodesidratado como prebiótico. Numa primeira etapa, os experimentos foram realizados com soluções de 33% de concentração de cada um dos quatro solutos na proporção de 1:12 (discos de yacon : solução osmótica) com agitação magnética de 900 rpm a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e pressão atmosférica. Foi verificada maior desidratação para as amostras tratadas com sorbitol e glicerol, com  $81 \pm 1\%$  e  $80 \pm 4\%$  de redução de umidade respectivamente, contra  $60 \pm 1\%$  da povidexose. A maltodextrina não promoveu desidratação osmótica. Na segunda etapa do trabalho, empregando soluções osmóticas de glicerol e de sorbitol, foram realizados 12 experimentos em duplicata, através de um planejamento experimental fatorial completo, com 2 fatores, um contendo 2 níveis (temperaturas de 30 e  $50^\circ\text{C}$ ) e, o outro, 3 níveis (concentrações de 30, 50 e 70%), na proporção de 1:20 (discos de yacon branqueado : solução osmótica), com agitação mecânica constante de 1.000 rpm. Na secagem foram encontrados dois períodos de taxa de desidratação para as condições trabalhadas, sendo que a difusividade mássica efetiva da água foi de  $5,21 \pm 1,12 \times 10^{-10}$  a  $2,60 \pm 1,02 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  no primeiro período e  $9,64 \pm 0,31 \times 10^{-11}$  a  $3,72 \pm 1,49 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  no segundo período para os tratamentos com glicerol e para o sorbitol de  $13,01 \pm 0,70 \times 10^{-10}$  a  $8,12 \pm 0,18 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  no primeiro período e  $2,28 \pm 0,05 \times 10^{-10}$  a  $2,14 \pm 0,05 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  no segundo. Os resultados indicaram que o modelo de Peleg (1988) mostrou-se adequado para predizer a umidade de equilíbrio. Também foram realizadas análises de perda de massa, umidade, sólidos solúveis, atividade de água, cromatografia em fase líquida (HPLC) para determinação do teor de açúcares e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram que a perda de água é favorecida pelo aumento da concentração da solução osmótica e pelo aumento da temperatura. A maior redução na atividade de água ( $a_w$  final =  $0,704 \pm 0,010$ ) foi atingida nos ensaios realizados com 70% de glicerol a  $50^\circ\text{C}$ . O tratamento com 70% de concentração a  $30^\circ\text{C}$ , em ambos solutos, também foi realizado com adição de 20 g/L de lactato de cálcio na solução osmótica, que resultou em maior teor de cálcio, fortalecendo a parede celular do yacon para ambos os ensaios, o que pode ser visualizado através de MEV.



## Abstract

The yacon (*Smallanthus sonchifolius*) is a tuberous root of Andean origin, with high levels of fructo-oligosaccharides; therefore, it has many health-promoting properties such as stimulating the growth and activity of probiotics, increase of minerals absorption, regulation of intestinal function and reduction of serum cholesterol. However, having a high amount of water, it has a poor shelf life under ambient conditions. Osmotic dehydration is a promising technology for reducing post-harvest losses and for increasing the food durability. The present work aims to develop a study of the use of solutes glycerol, maltodextrin, polydextrose and sorbitol, aiming at keeping the properties of osmodehydrated yacon as prebiotic. In a first step experiments were performed with solutions of 33% concentration of each of the four solute at a ratio of 1:12 (yacon : osmotic solution) with magnetic stirring of 900 rpm at  $23 \pm 2$  °C and atmospheric pressure. Greater dehydration was observed for samples treated with sorbitol and glycerol, with  $81 \pm 1\%$  and  $80 \pm 4\%$  of moisture reduction respectively, versus  $60 \pm 1\%$  of polydextrose. Maltodextrin didn't promote osmotic dehydration. In the second stage, employing osmotic solutions of glycerol and sorbitol, 12 experiments were conducted in duplicate, using a full factorial experimental design with two factors: temperature (30 and 50 °C) and concentration (30, 50 and 70%) in the ratio of 1:20 (blanched yacon : osmotic solution) with constant mechanical stirring of 1,000 rpm. For the above conditions of osmotic dehydration, there were two periods of dehydration rate and the effective diffusivity of water was found to be in the range of  $5.21 \pm 1.12 \times 10^{-10}$  to  $2.60 \pm 1.02 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s in first period and  $9.64 \pm 0.31 \times 10^{-11}$  to  $3.72 \pm 1.49 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s in second period for glycerol tests and for sorbitol was  $13.01 \pm 0.70 \times 10^{-10}$  to  $8.12 \pm 0.18 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the first period and  $2.28 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  to  $2.14 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the second. The results indicated that the model of Peleg (1988) proved to be adequate to predict the equilibrium moisture content. Also, samples were analyzed for mass loss, moisture, soluble solids, water activity, liquid chromatography (HPLC) method for determination of sugars and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that loss of water is favored by increasing the concentration and temperature of the osmotic solution. The greatest reduction in water activity ( $a_w = 0.704 \pm 0.010$ ) was reached in the tests conducted with 70% glycerol at 50 °C. Treatment with 70% concentration at 30 °C for both solutes were also performed by adding 20 g/L of calcium lactate in the osmotic solution, which resulted in a higher content of calcium, strengthening the cell wall of yacon, which can be viewed by SEM.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Amostras de raiz de yacon utilizado neste trabalho .....	5
Figura 2.2 – Estrutura molecular de cestose (GF <sub>2</sub> ), nistose (GF <sub>3</sub> ) e frutofuranosil nistose (GF <sub>4</sub> ) .....	8
Figura 2.3 – Representação esquemática da transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica. ....	11
Figura 2.4 – Representação esquemática do teor de água e de açúcar durante a desidratação osmótica.....	16
Figura 2.5 – Relação entre atividade de água e reações deteriorativas em alimentos .....	22
Figura 3.1 – Discos de yacon (geometria de placa plana).....	24
Figura 3.2 – Sistema experimental de desidratação osmótica.....	26
Figura 6.1 – Variação da perda de água adimensional com o tempo de imersão na desidratação osmótica de yacon tratado com solução de (a) glicerol e (b) sorbitol .....	76
Figura 6.2 – Número de Fourier em função do tempo de imersão em solução de (a) glicerol e (b) sorbitol .....	78
Figura 6.3 – Perfil cromatográfico de amostra fresca de yacon .....	89
Figura 6.4 – Porcentagem de retenção de 1-cestose e nistose após DO de yacon: (a) glicerol, (b) sorbitol .....	89
Figura 6.5 – Concentração de glicose e frutose após DO de yacon com solução de glicerol ..	91
Figura 6.6 – Concentração de glicerol após DO de yacon com solução de glicerol .....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição de raízes de yacon frescas indicada na literatura.....	6
Tabela 2.2 – Relação de alguns trabalhos sobre desidratação osmótica na literatura .....	17
Tabela 3.1 – Tempo de retenção dos compostos na coluna utilizada .....	29
Tabela 3.2 – Planejamento Experimental.....	31
Tabela 6.1 – Perda de Massa (%) das amostras de yacon com os diferentes solutos ao longo do tempo de imersão .....	68
Tabela 6.2 – Variação do teor de umidade (base seca) com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com diversos agentes osmóticos .....	69
Tabela 6.3 – Teor de sólidos solúveis (°Brix) das soluções osmóticas com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com diversos agentes osmóticos .....	70
Tabela 6.4 – Variação do teor de sólidos solúveis com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com diversos agentes osmóticos .....	70
Tabela 6.5 – Composição do yacon <i>in natura</i> e branqueado utilizado nos experimentos .....	72
Tabela 6.6 – Perda de Massa (%) das amostras de yacon com uso de soluções de glicerol e sorbitol ao longo do tempo de imersão .....	73
Tabela 6.7 – Variação do teor de umidade (base seca) com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol .....	74
Tabela 6.8 – ANOVA da umidade de equilíbrio das amostras de yacon tratadas com soluções de glicerol e sorbitol.....	77
Tabela 6.9 – ANOVA da difusividade mássica efetiva da água nas amostras de yacon tratadas com soluções de glicerol e sorbitol.....	82
Tabela 6.10 – Variação da atividade de água ( $a_{w(t)}/a_{w(0)}$ ) com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol .....	83
Tabela 6.11 – Teor de sólidos solúveis (°Brix) das soluções osmóticas com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol.....	84
Tabela 6.12 – Variação dos sólidos solúveis ( $SS_t/SS_0$ ) de yacon com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol.....	85
Tabela 6.13 – Teor de Cálcio nas amostras de yacon antes e após tratamento com lactato de cálcio .....	86

**LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS**

$C$	concentração mássica
$D_{AB}$	difusividade mássica molecular de A em B ( $m^2/s$ )
$D_e$	difusividade mássica efetiva ( $m^2/s$ )
$FO$	Número de Fourier
$GP$	Grau de polimerização
$k_1$ e $k_2$	parâmetros do modelo de Peleg
$L$	metade da espessura da placa plana (m)
$M$	massa da amostra úmida (g)
$M_s$	massa da amostra seca (g)
$m_0$	massa inicial da amostra
$m_t$	massa da amostra no tempo $t$
m/m	massa / massa
$ML$	perda de massa (%)
$M_t/M_\infty$	perda de água adimensional
$MM$	massa molar (kg/kmol)
$n$	número de observações
rpm	rotação por minuto
$t$	tempo (s) ou (h)
$T$	temperatura ( $^{\circ}C$ ) ou (K)
v/v	volume / volume
$X$	teor de umidade em base seca
$X^w$	teor de umidade (g de água por g de sólidos secos)
$x, y$ e $z$	coordenadas espaciais do sistema cartesiano

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	2
1.1.1 <i>Objetivos Específicos</i> .....	2
<b>Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Yacon</i> .....	5
2.1.1 <i>Aspectos gerais</i> .....	5
2.1.2 <i>Composição</i> .....	6
2.1.3 <i>Fruto-oligossacarídeos</i> .....	7
2.1.4 <i>Inativação Enzimática</i> .....	9
2.2 <i>Desidratação Osmótica</i> .....	10
2.2.1 <i>Aspectos gerais</i> .....	10
2.2.2 <i>Variáveis do processo</i> .....	12
2.2.3 <i>Cinética de desidratação osmótica</i> .....	18
2.2.4 <i>Modelo de Peleg</i> .....	19
2.2.5 <i>Determinação da Difusividade Mássica Efetiva</i> .....	20
2.2.6 <i>Atividade de Água</i> .....	21
<b>Capítulo 3 – MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Material</i> .....	23
3.1.1 <i>Yacon</i> .....	23
3.2 <i>Desidratação Osmótica</i> .....	24
3.2.1 <i>Ensaio Preliminares</i> .....	24
3.2.2 <i>Procedimento Experimental dos experimentos de osmo-desidratação</i> .....	25
3.3 <i>Análises Físico-Químicas</i> .....	27
3.3.1 <i>Cálculo da Perda de Massa</i> .....	27
3.3.2 <i>Determinação do Conteúdo de Umidade</i> .....	27
3.3.3 <i>Determinação do Teor de Sólidos Solúveis</i> .....	28
3.3.4 <i>Determinação da Atividade de Água</i> .....	28
3.3.5 <i>Determinação do Teor de Açúcares</i> .....	28
3.3.6 <i>Determinação do pH</i> .....	29
3.3.7 <i>Determinação do Teor de Cálcio</i> .....	30
3.3.8 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	30

3.3.9 Modelo Matemático.....	30
3.3.10 Planejamento Experimental.....	31
<b>Capítulo 4 – ARTIGO 1.....</b>	<b>33</b>
<b>Capítulo 5 – ARTIGO 2.....</b>	<b>47</b>
<b>Capítulo 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
6.1 <i>Ensaio Preliminares.....</i>	67
6.1.1 Perda de Massa .....	67
6.1.2 Variação do teor de umidade.....	68
6.1.3 Variação do teor de sólidos solúveis .....	69
6.2 <i>Experimentos de Osmo-Desidratação .....</i>	71
6.2.1 Composição do yacon utilizado.....	71
6.2.2 Perda de Massa .....	72
6.2.3 Variação do teor de umidade.....	73
6.2.4 Difusividade Mássica Efetiva.....	77
6.2.5 Atividade de Água .....	82
6.2.6 Variação do teor de sólidos solúveis .....	84
6.2.7 Teor de Cálcio.....	86
6.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura .....	87
6.2.9 Análise de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência ( <i>HPLC</i> ).....	88
<b>Capítulo 7 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
7.1 <i>Sugestões para trabalhos futuros .....</i>	94
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>

## Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

O yacon (*Smallanthus sonchifolius*) é uma raiz tuberosa originária da região andina que vem sendo cultivada no Brasil há mais de 20 anos e que se destaca pelo elevado teor de fruto-oligossacarídeos (FOS). Estes açúcares possuem funções prebióticas que ajudam na manutenção da flora intestinal, promovendo o crescimento de microrganismos benéficos, os probióticos, que reduzem o pH intestinal, ajudam a reduzir o colesterol no sangue, previnem o câncer de intestino, entre outras ações. Devido a estes efeitos favoráveis ao sistema digestivo, o yacon é considerado um alimento funcional prebiótico (GIBSON e ROBERFROID, 1995).

A raiz de yacon possui elevada quantidade de água (até a faixa de 90%) o que reduz sua vida de prateleira a cerca de uma semana em temperatura ambiente. Ainda, sua concentração de FOS diminui com o decorrer do tempo de armazenamento pós-colheita devido a sua despolimerização. Portanto, aproveitar a raiz com sua total funcionalidade dependeria de um consumo imediato após a sua colheita ou seu beneficiamento. Uma alternativa para manter o yacon próprio para consumo por maior período, conservando suas propriedades, é desidratá-lo osmoticamente com solutos que mantenham suas qualidades prebióticas.

A desidratação osmótica pode ser utilizada como um pré-tratamento para muitos processos (secagem, congelamento, liofilização, etc.), visando conservar as propriedades nutritivas e sensoriais dos alimentos, sem prejudicar sua integridade. Trata-se de um método de remoção parcial de água dos alimentos, que se baseia na imersão dos mesmos em soluções hipertônicas de um ou mais solutos (agentes osmóticos), originando dois fluxos simultâneos opostos: saída de água do produto para a solução e migração de solutos da solução para o produto (RAOULT-WACK, 1994).

O sistema de desidratação osmótica utiliza temperaturas moderadas de processo que não afetam as características semipermeáveis das membranas celulares e melhoram a retenção de cor, sabor e aromas voláteis. Uma das grandes vantagens é a retirada de água do produto sem que ocorra sua mudança de fase, o que economiza energia e, além disso, na secagem convectiva após pré-tratamentos de desidratação osmótica, são alcançados menores teores de umidade em menores tempos.

Assim, o desenvolvimento de yacon osmoticamente desidratado em solutos com propriedades prebióticas além de ser uma alternativa de conservação, é interessante para o desenvolvimento de um produto de baixa ingestão calórica como opção para diabéticos e consumidores preocupados com uma alimentação saudável.

## **1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem por objetivo geral o estudo da cinética da desidratação osmótica do yacon (*Smallanthus sonchifolius*) empregando solutos alternativos à sacarose para o desenvolvimento de produtos que possam ser consumidos por diabéticos.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- Realizar o estudo da cinética de osmo-secagem com o emprego de glicerol, maltodextrina, polidextrose e sorbitol.

- Avaliar o efeito dos solutos glicerol e sorbitol na desidratação osmótica de yacon e avaliar a influência de duas variáveis no processo: concentração do agente osmótico (30, 50 e 70%) e temperatura do processo (30 e 50°C).

- Avaliar o emprego de solução ternária através do uso de 2% de lactato de cálcio na solução osmótica de glicerol e sorbitol para o melhor tratamento (maior desidratação osmótica com menor perda de FOS) obtido para cada soluto.

- Verificar o emprego do Modelo de Peleg (1988), para a estimativa das condições de equilíbrio, nas diferentes condições de temperatura e concentração de soluto das soluções osmóticas empregadas.



- Estimar a difusividade mássica efetiva da água em diferentes temperaturas e concentrações de solução osmótica a partir da solução analítica da Segunda Lei de Fick.

O presente trabalho de dissertação está dividido em seis capítulos. No capítulo 2 será apresentada uma revisão da literatura sobre o yacon, sendo também abordados os fundamentos teóricos relativos ao processo de desidratação osmótica, as variáveis que influem neste processo e a cinética de transferência de massa, além da determinação das condições de equilíbrio via Modelo de Peleg e da difusividade mássica.

O capítulo 3 apresentará detalhadamente os materiais e métodos utilizados nos ensaios e nas determinações analíticas realizadas. Os capítulos 4 e 5 disporão dos artigos gerados pelo trabalho, que serão encaminhados a revistas científicas internacionais. O capítulo 6 discutirá, de uma forma integradora, os resultados obtidos, apresentados nos artigos. Por fim, o capítulo 7 apresentará as conclusões deste estudo e as sugestões para trabalhos futuros.



## Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Yacon

#### 2.1.1 Aspectos gerais

A raiz tuberosa do yacon (*Smallanthus sonchifolius*) pertence à família Asteraceae, oriunda dos vales andinos da Colômbia, Equador, Peru, Bolívia e noroeste da Argentina. Com aparência similar à batata doce (Figura 2.1), sabor adocicado e polpa crocante, a raiz é consumida principalmente descascada *in natura*, pura ou na presença de frutas.

**Figura 2.1** – Amostras de raiz de yacon utilizado neste trabalho



Esta espécie foi introduzida no Brasil, no início da década de 90, na região de Capão Bonito (SP), por imigrantes japoneses que utilizavam suas folhas e raízes nos tratamentos contra diabetes e altas taxas de colesterol no sangue (VILHENA, CÂMARA & KAKIHARA, 2000). Uma vez que o yacon possui de 3 a 10% de fruto-oligossacarídeos (FOS) de baixo

grau de polimerização do tipo inulina, apresenta propriedades funcionais bastante promissoras, por serem designados como prebióticos e fibras alimentares solúveis devido ao fato de não serem digeridos pelas enzimas do trato digestivo humano (por isto conferem valor energético relativamente baixo), além de sua influência sobre a função intestinal e sobre os parâmetros lipídicos (GIBSON e ROBERFROID, 1995; CAZETTA *et al.*, 2005).

O yacon é uma planta perene com caule que pode crescer mais de 2 metros de altura e raízes tuberosas que pesam, normalmente, de 200 a 500 g, mas podem chegar até 2 kg (GOTO *et al.*, 1995).

### 2.1.2 Composição

A Tabela 2.1 apresenta uma compilação de diferentes trabalhos publicados a respeito da composição centesimal do yacon fresco (Fonte: OJANSIVU, FERREIRA & SALMINEN, 2011).

**Tabela 2.1** – Composição de raízes de yacon frescas indicada na literatura

<b>Componente</b>	<b>Quantidade por 100 g</b>
Água	69,5 – 93 g
Carboidratos	9 – 13,8 g
Proteínas	0,1 – 4,9 g
Lipídeos	0,1 – 1,5 g
Cinzas	0,26 – 6,0 g
Fibras	0,28 – 4,1 g
Valor calórico	14 – 22 kcal
Potássio	180 – 334 mg
Cálcio	6 – 131 mg
Fósforo	21 – 309 mg
Ferro	0,2 – 0,3 mg
Retinol	10 mg
Caroteno	0,08 – 0,13 mg
Tiamina	0,01 – 0,07 mg
Riboflavina	0,1 – 0,31 mg
Niacina	0,33 mg
Ácido ascórbico	5 – 13 mg

Fonte: OJANSIVU, FERREIRA & SALMINEN (2011)

O yacon apresenta elevada quantidade de água, geralmente de 86 a 90% do peso fresco (GOTO *et al.*, 1995, HABIB *et al.*, 2011), e, como consequência, sua vida útil em condições ambientais é de, aproximadamente, uma semana.

A maior parte da matéria seca consiste de carboidratos; diferentemente da maioria das espécies tuberosas que estocam energia na forma de amido, o yacon tem como principal carboidrato de reserva os oligofrutanos ou fruto-oligossacarídeos (FOS), que são polímeros de cadeia curta de frutose com grau de polimerização (GP) de 3 a 10 frutanos, do tipo inulina (GOTO *et al.*, 1995; VILHENA, CÂMARA & KAKIHARA, 2000).

O yacon também possui frutose, glicose e sacarose como carboidratos de reserva (GRAEFE *et al.*, 2004; HERMANN, FREIRE & PAZOS, 1998). Porém, a presença destes açúcares (decorrentes da hidrólise de inulina/FOS) representa um fator negativo em vista dos benefícios trazidos pelos FOS.

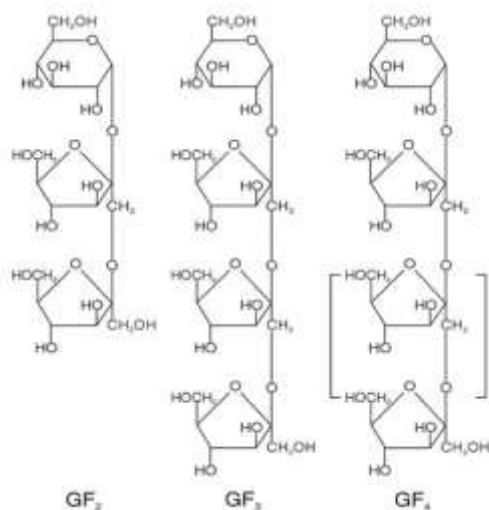
### 2.1.3 Fruto-oligossacarídeos

Os fruto-oligossacarídeos (FOS) são oligômeros de frutose que ocorrem, principalmente, em produtos de origem vegetal, como banana, cebola, raiz de chicória, alho, aspargo, cevada, trigo, batata-mexicana (jicama), tomate, alho-poró, entre outros. O yacon, a chicória e o tupinambo (ou alcachofra de Jerusalém) têm sido relatados como os alimentos com maiores concentrações de FOS. Os FOS são inulinas de cadeia curta, com grau de polimerização (GP) inferior a 9 unidades, enquanto que a inulina de cadeia longa pode atingir GP de até 60 unidades. Os FOS de maior ocorrência são 1-cestose (GF<sub>2</sub>, leia-se G de glicose e F de frutose, com o índice indicando o número de moléculas, neste caso, duas moléculas de frutose), nistose (GF<sub>3</sub>) e frutofuranosil nistose (GF<sub>4</sub>); a Figura 2.2 mostra a estrutura molecular destes FOS (GIBSON & ROBERFROID, 1995; IANNITTI & PALMIERI, 2010; PASSOS e PARK, 2003).

Os FOS, entre outras propriedades, exercem atividade bifidogênica (a maioria dos agentes patogênicos e bactérias putrefativas não são capazes de quebrar a ligação química dos FOS, composta de  $\beta$ -2-1-frutose-frutose, que é reconhecida pela enzima  $\beta$ -frutosidase). Ao escapar da digestão no intestino superior, os FOS alcançam o cólon, onde são totalmente fermentados, principalmente, em lactato, ácidos graxos de cadeia curta (acetato, propionato e

butirato), e gás. Como consequência desta fermentação, possuem reduzido valor energético, de cerca de 2 kcal/g. Devido a sua baixa digestibilidade pelas enzimas do trato gastrointestinal humano e pelo estímulo seletivo do crescimento e à atividade de bactérias intestinais promotoras da saúde, o yacon, por ser rico em FOS, é classificado como prebiótico. Os FOS também são de baixa cariogenicidade, aumentam a absorção de minerais como cálcio, magnésio e ferro, inibem os estágios iniciais do câncer de cólon, regularizam a função de defecação e reduzem o colesterol sérico (GIBSON & ROBERFROID, 1995; IANNITTI & PALMIERI, 2010; PASSOS & PARK, 2003).

**Figura 2.2** – Estrutura molecular de cestosose (GF<sub>2</sub>), nistose (GF<sub>3</sub>) e frutofuranosil nistose (GF<sub>4</sub>)



Fonte: Victory (2013)

Os FOS de cadeia curta apresentam a vantagem de não cristalizar, pois seu baixo GP não é suficiente para formar microcristais, possibilitando seu uso como adoçantes. A inulina de cadeia longa (GP acima de 10), por sua vez, é capaz de formar microcristais que interagem entre si, podendo se aglomerar em uma rede de gel, portanto, agindo como substituto de gordura em produtos de baixa gordura, tais como sorvetes, queijos e margarinas (GIBSON & ROBERFROID, 1995; MEYER *et al.*, 2011).

Durante o processo e estocagem os FOS podem se despolimerizar. Assim, durante a secagem de polpa e de suco de yacon a 70°C, Lago *et al.* (2012) observaram o aumento significativo de glicose e de frutose, contra a diminuição significativa de inulina após a

secagem de ambos os produtos. Os mesmos resultados foram obtidos por Scher, Rios e Noreña (2009) para raiz branqueada e não branqueada, após secagem de 50 a 70°C por 300 minutos. A fim de evitar a hidrólise dos FOS e da inulina, é indicado o rápido e adequado tratamento (por exemplo, branqueamento), pois à temperatura ambiente, os FOS são rapidamente convertidos em açúcares simples, chegando a 40% de conversão após uma semana da colheita (MANRIQUE, PÁRRAGA & HERMANN, 2005; LAGO *et al.*, 2012).

#### **2.1.4 Inativação Enzimática**

As raízes de yacon escurecem rapidamente durante seu processamento e/ou armazenamento, possivelmente pelo seu alto índice fenólico, especialmente seus teores de ácido clorogênico (éster de ácido caféico e ácido quínico) e caféico (além de ácido ferúlico, quercetina e outros dois flavonóides) e pela atividade de polifenoloxidase endógena. Em comparação a outras raízes e tubérculos, as raízes do yacon possuem elevada quantidade de compostos fenólicos, cerca de 200 mg / 100 g de matéria fresca comestível (LACHMAN *et al.* 2003, SANTANA & CARDOSO, 2008; VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ, 2003, YAN *et al.* 1999).

O yacon tem sido reportado como uma boa fonte da enzima fenoloxidase, a qual catalisa a oxigenação de compostos fenólicos a quinonas que, após polimerização, apresentam os típicos pigmentos marrons ou pretos, conhecidos da oxidação enzimática de frutas e vegetais (VALENTOVÁ & ULRICHOVÁ, 2003).

Durante o descascamento e o processamento do yacon, quando as membranas das células são rompidas, as enzimas citoplasmáticas, como a polifenoloxidase, entram em contato com os compostos fenólicos e o escurecimento enzimático resulta da oxidação de fenóis e da eventual polimerização não enzimática das quinonas formadas em taninos ou melaninas. Esta oxidação se dá em presença de oxigênio livre, escurecendo rapidamente a superfície recém-cortada dos tubérculos, prejudicando sua aparência e a de seus produtos (CABELLO, 2005; SANTANA & CARDOSO, 2008).

O controle do escurecimento enzimático é geralmente limitado à inibição das enzimas polifenoloxidase e peroxidase (CABELLO, 2005). Entre os métodos propostos para a prevenção da oxidação estão: a desidratação, o armazenamento a baixas temperaturas, o

tratamento térmico, a utilização de antioxidantes, a eliminação do oxigênio do meio, entre outros (LUPETTI *et al.*, 2005).

O branqueamento é um tratamento térmico aplicado para inativar enzimas catalisadoras de reações deteriorativas e que provocam o escurecimento dos vegetais durante seu armazenamento. Também, reduz o número de microrganismos contaminantes na superfície dos alimentos, colaborando nas operações subsequentes de conservação (ALVAREZ *et al.*, 1995; CRUZ *et al.*, 2006; FELLOWS, 2006; FANTE *et al.*, 2013).

O branqueamento é usado como um pré-tratamento à pasteurização, esterilização, refrigeração, congelamento, assim como à desidratação osmótica, pois pode aumentar a permeabilidade das membranas celulares e remover o ar dos espaços intracelulares, acelerando o transporte de massa nos frutos (AGUILERA & STANLEY, 1999), além de possibilitar a manutenção da cor durante seu armazenamento. Há trabalhos na literatura que utilizaram o branqueamento anteriormente à desidratação osmótica de mirtilos, morangos e maçãs (ALVAREZ *et al.*, 1995; FELLOWS, 2006, GIOVANELLI *et al.*, 2012; MORENO *et al.*, 2000; VALLE *et al.*, 1998). Esta operação melhora a difusividade mássica efetiva da água devido à: (a) eliminação da resistência das membranas celulares à difusão de água (a integridade da membrana é perdida pelo tratamento térmico); (b) diminuição na resistência das paredes celulares ao fluxo de água (ALVAREZ *et al.*, 1995). O branqueamento também pode ser usado para desativar enzimas que causam a despolimerização de polissacarídeos como a inulina. A hidrólise da inulina pode estar relacionada à presença da enzima inulinase no material não branqueado e a sua atividade residual nas raízes branqueadas (FANTE *et al.*, 2013).

## **2.2 Desidratação Osmótica**

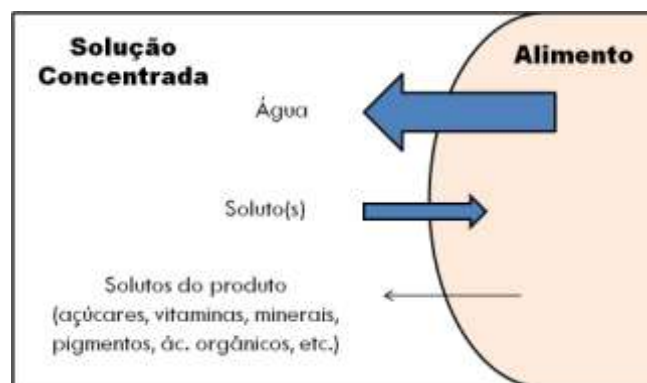
### **2.2.1 Aspectos gerais**

A desidratação osmótica (DO) envolve a remoção parcial de água em alimentos que são imersos em uma solução aquosa hipertônica. A força motriz para remoção de água se dá devido à diferença de pressão osmótica entre o alimento e a solução circundante. Durante este processo, dois caminhos de transferência de massa são estabelecidos e que estão



esquemáticamente representados na Figura 2.3: a saída de água e de substâncias naturais solúveis (açúcares, vitaminas, pigmentos, ácidos orgânicos, minerais, etc.) do alimento para a solução osmótica e, na direção oposta, solutos empregados na solução hipertônica e outros solúveis (que podem ser intencionalmente colocados na solução, entre eles, componentes com princípio ativo, agentes preservativos, ou qualquer outro soluto de interesse nutricional ou melhorador de qualidade sensorial do produto) que se transferem da solução para o alimento. A perda de solutos do produto é quantitativamente negligenciável, se comparado com as outras duas transferências, mas essencial com relação à composição do produto final (KHIN, ZHOU & YEO, 2007; RAOULT-WACK, 1994).

**Figura 2.3** – Representação esquemática da transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica.



Fonte: Raoult-Wack, 1994

Em geral, a saída de água e a entrada de soluto ocorrem principalmente nas primeiras 2 a 3 horas de imersão; depois disso, as taxas de transferência de massa diminuem gradualmente, até que, finalmente, o sistema atinja um estado de equilíbrio dinâmico de transferência molecular (SHI & LE MAGUER, 2002). O branqueamento afeta a fase inicial de desidratação osmótica, porém a perda de água final não é muito diferente do que a do produto não branqueado (BARBOSA-CÁNOVAS & VEGA-MERCADO, 1996).

A DO não resulta em produtos estáveis, sendo necessário, assim, um processamento complementar, como secagem convencional, congelamento, pasteurização, liofilização, adição de agentes de preservação ao alimento (RAOULT-WACK, 1994). O uso da DO como pré-tratamento desses processos convencionais visa melhorar a qualidade final, reduzir custos energéticos ou, mesmo, desenvolver novos produtos (MERCALI, 2009).

O processo de DO permite manter algumas propriedades dos alimentos *in natura* como textura, sabor, cor, valor nutricional e, ainda, quando realizado anteriormente a um processo de secagem, permite reduzir a injúria térmica dos alimentos, o tempo de secagem e o consumo de energia (KHIN, ZHOU & YEO, 2007).

Uma limitação do processo de DO tem sido o gerenciamento da solução osmótica usada. Rosa e Giroux (2001) apontam que a transferência de água do fruto ou vegetal para a solução osmótica provoca sua diluição, aumentando seu volume e diminuindo o potencial de desidratação. A solução osmótica, se não reutilizada, gera um grande volume de efluente que precisa ser descartado dentro das leis ambientais, sem prejudicar o meio ambiente. Uma possível alternativa para aproveitar essa solução é reutilizá-la para a produção de aguardentes e licores, através de processos de fermentação e destilação. O fermentado pode ser, por sua vez, fermentado aceticamente para a produção de vinagres finos com sabores e aroma das frutas. Outra possibilidade é o reaproveitamento da calda açucarada para a produção de frutas em calda, néctares, refrigerantes, geléias e outros doces (GOMES, CEREDA & VILPOUX, 2007; MERCALI, 2009; ROSA & GIROUX, 2001). A reconcentração, sanitização, filtração por membranas, entre outros, são algumas alternativas de reuso da solução osmótica (ROSA & GIROUX, 2001).

Moraga *et al.* (2011) reutilizaram a solução osmótica em até cinco ciclos sucessivos de DO sem qualquer tratamento de reconcentração, uma vez que a estabilidade da composição da fruta não foi afetada pela diluição da solução. Entretanto, um tratamento térmico brando foi necessário para garantir a qualidade microbiológica da fruta osmodesidratada. Os benefícios do reuso da solução osmótica em ciclos sucessivos de DO contribuíram, não apenas em termos econômicos, mas também na melhor preservação de ácido cítrico nas amostras de toranja; deste modo, a DO pode se tornar um processo mais econômico e ambientalmente amigável, obtendo produtos com valores nutricionais e funcionais máximos.

### **2.2.2 Variáveis do processo**

Vários fatores influenciam o processo de desidratação osmótica, tais como a natureza do material (espécie, variedade, grau de maturação, tamanho e formato) e variáveis do processo (concentração, composição e temperatura da solução osmótica, pressão, tempo de contato, nível de agitação da solução, geometria da amostra e razão volumétrica entre solução

osmótica e produto). Diversos trabalhos têm sido realizados no sentido de estudar a influência desses parâmetros sobre a taxa de transferência de massa (MERCALI *et al.*, 2011; MOREIRA *et al.*, 2007; RAOULT-WACK, 1994; RASTOGI, RAGHAVARAO & NIRANJAN, 2005; SHI & LE MAGUER, 2002).

No quesito proporção entre amostra e solução, Rastogi, Raghavarao e Niranjana (2005) afirmam que em razões baixas de solução osmótica e produto, ao longo do processo de desidratação, a solução se torna crescentemente diluída e a força motriz para a remoção de água diminui. Portanto, é necessário ter um *ratio* de amostra em solução de cerca de 1:20, a fim de garantir uma força motriz mais uniforme.

No presente trabalho, foi estudada a desidratação osmótica do yacon sob a influência de diversos agentes osmóticos em diferentes concentrações e temperaturas da solução, tópicos descritos a seguir.

#### ***a) Tipos de agente osmótico***

As principais exigências para que um soluto seja utilizado como agente osmótico são: apresentar alta solubilidade em água, ter baixo custo, ter efeito positivo sobre as propriedades sensoriais e garantir a estabilidade final do produto (DIONELLO *et al.*, 2007).

Os principais solutos utilizados na DO são a sacarose (utilizada principalmente em frutas) e o cloreto de sódio (utilizado majoritariamente em carnes e vegetais). Porém, há trabalhos disponíveis na literatura que utilizam agentes osmóticos alternativos a esses, como glicose, frutose, lactose, xarope de milho, etanol, glicerol, maltodextrina, entre outros (SHI & LE MAGUER, 2002). Pesquisadores utilizaram sorbitol e maltodextrina como agentes osmóticos na desidratação de damascos (TOĞRUL & İSPIR, 2008), e sorbitol em morangos (RIZZOLO *et al.*, 2007), pimenta verde (OZDEMIR *et al.*, 2008), entre outras frutas e vegetais. Trabalhos científicos com glicerol incluem a DO de castanhas (MOREIRA *et al.*, 2007), uvas (RÓZEK *et al.*, 2009), amoras e tamarilhos (OSORIO *et al.*, 2007). Até o momento, não foram encontrados trabalhos de DO com polidextrose. O glicerol, a polidextrose e o sorbitol são classificados como aditivos alimentares pelo *Codex Alimentarius* (2012).

O sorbitol é o poliol mais encontrado na natureza, sendo que sua principal

característica é o poder edulcorante (com até 70% do poder adoçante da sacarose), possui estabilidade química, térmica e bacteriológica e baixa caloria, 2,4 kcal/g. Segundo Patel e Goyal (2012), o sorbitol é prebiótico, com propriedades promotoras de saúde comprovadas, como, por exemplo, redução de colesterol sérico; é considerado agente redutor de atividade de água, plastificante, estabilizante e espessante, é altamente solúvel em água, inibidor de cristalização e não cariogênico. Estas características possibilitam seu uso nas indústrias alimentícia, química, farmacêutica, têxtil, e outras.

A polidextrose é um polímero de glicose com ligações do tipo 1-6 predominantemente, solúvel em água, que confere características funcionais similares às da sacarose, entre elas, agente de corpo e de revestimento, estabilizante e espessante (CODEX ALIMENTARIUS, 2012). Assim como o sorbitol, é solúvel em água, não cariogênico e redutor de atividade de água. Além disto, agrega ação prebiótica, garantindo uma microbiota intestinal saudável e equilibrada, pois é resistente ao metabolismo dos mamíferos (fornecendo baixo valor calórico = 1 kcal/g) e à degeneração microbiana (motivo de ser não cariogênico) (BURDOCK & FLAMM, 1999).

O glicerol é um aditivo alimentício empregado como espessante, plastificante (melhora a textura dos alimentos) e apresenta vantagens na proteção contra contaminação microbiológica (BARBOSA-CÁNOVAS & VEGA-MERCADO, 1996; CODEX ALIMENTARIUS, 2012; MOREIRA *et al.*, 2007); seu valor calórico é de 4,3 kcal/g. O glicerol é um subproduto da produção de biodiesel, representando 10% do volume gerado deste biocombustível (LEONETI, ARAGÃO-LEONETI & OLIVEIRA, 2012). Após tratamento para remoção do metanol residual, seu uso na desidratação osmótica em escala industrial seria uma alternativa para diminuir o excedente de glicerol gerado. A Lei nº 11.097 aprovada pelo Congresso Nacional em 13 de setembro de 2005, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira, estabelece que, a partir de 2013, seja adicionado 5% de biodiesel no diesel nacional. Segundo LEONETI, ARAGÃO-LEONETI E OLIVEIRA (2012), para suprir a demanda dos 5% de biodiesel no ano de 2010, seriam necessários 2,4 bilhões de litros de biodiesel, ou seja, seriam gerados 240 milhões de litros de glicerol. O glicerol é usado, principalmente, na indústria de cosméticos, de alimentos e na síntese de resinas e ésteres.

A maltodextrina é um carboidrato complexo de absorção gradativa, produzido pela hidrólise parcial do amido é utilizada como adoçante, repositor energético (repõe o glicogênio muscular) e confere de 3,5 a 4 kcal/g. Além disto, segundo Patel e Goyal (2012), a maltodextrina, assim como o sorbitol, também é prebiótica. Trabalhos utilizaram a

maltodextrina para desidratar frutas: Chun *et al.* (2012) desidrataram mirtilos através de desidratação denominada “molecular-press” usando maltodextrina. Esta desidratação alternativa é similar à osmótica, porém, utiliza moléculas maiores que, na solução quando em contato com a parede celular da planta, promove a desidratação pela pressão de difusão; como os polímeros não se difundem pela parede celular devido a sua grande massa molar, os tecidos da planta são pressionados pelo soluto que não consegue penetrar na matriz do alimento e acaba ocorrendo o colapso da parede celular. Khin, Zhou e Yeo (2007) estudaram o efeito do recobrimento com maltodextrina na transferência de massa durante a DO de cubos de maçã, com o objetivo de promover a remoção de água e minimizar o ganho de sólidos. Como o recobrimento serve como uma barreira extra à transferência de massa durante a DO, ambas entrada de soluto e remoção de água são reduzidos nos alimentos com recobrimento. Os mesmos resultados foram obtidos por Jokić *et al.* (2008) quando investigaram o uso do recobrimento comestível de maltodextrina para controlar o ganho de sólidos durante a DO de beterraba sacarina.

O uso de um sistema ternário (água/açúcar/sal) na DO de vegetais tem sido estudado por alguns pesquisadores e os resultados têm mostrado que são atingidas maiores taxas de perda de água com a adição de sal, até mesmo em soluções com menores concentrações de solutos (MERCALI *et al.*, 2011). No presente trabalho, buscando manter o apelo saudável do produto, em substituição ao cloreto de sódio, foi empregado lactato de cálcio como agente ternário.

O interesse no cálcio se intensificou nos últimos anos como um resultado das evidências que ligam sua deficiência à osteoporose, hipertensão e câncer e, hoje em dia, pode-se verificar o aumento de produtos fortificados com cálcio, principalmente os lácteos (MARTÍN-DIANA *et al.*, 2007).

Vários trabalhos já foram realizados, com dosagens de até 2% de lactato de cálcio (classificado como aditivo alimentar pelo CODEX ALIMENTARIUS, 2012), entre eles: maçã verde (CASTELLÓ *et al.*, 2009), manga (TORRES *et al.*, 2006) e tomate cereja (HEREDIA, BARRERA & ANDRÉS, 2007).

O cálcio também desempenha um papel tecnológico importante na manutenção da qualidade de alimentos vegetais e é usado como um agente de textura; ele mantém a firmeza da fruta pela ligação com a parede celular e suas pectinas, formando o pectato de cálcio, estabilizando as membranas celulares. O emprego de cálcio na forma de diversos sais - tais

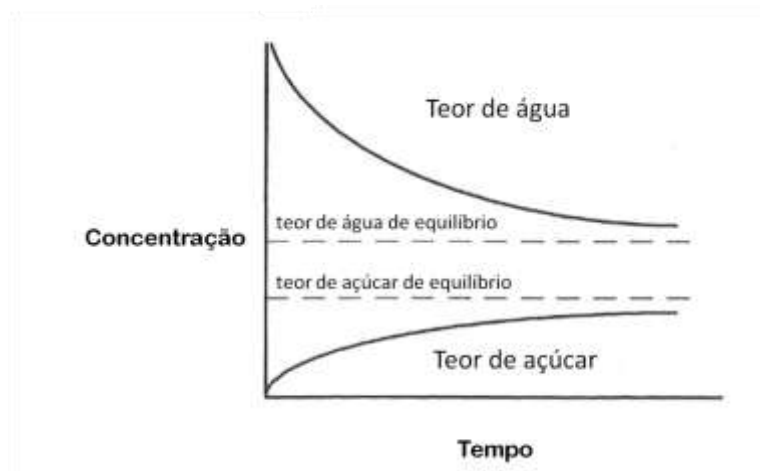
como o cloreto de cálcio - tem sido proposto, porém este pode deixar o alimento amargo ou com sabor prejudicado e, por esta razão, tem sido recomendado o uso do lactato de cálcio (CASTELLÓ *et al.*, 2009).

A fortificação de frutas ou vegetais com cálcio, associada a tratamentos osmóticos, pode melhorar propriedades mecânicas do tecido, devido ao fato de o íon  $\text{Ca}^{+2}$  impregnado da solução poder interagir com a matriz celular da planta, formando ligações entre pectinas e outros componentes da parede celular, modificando sua resposta estrutural (GRAS *et al.*, 2003).

### **b) Concentração da solução osmótica**

Uma representação esquemática do teor de água e da concentração do açúcar em função do tempo em processos de desidratação osmótica está mostrada na Figura 2.4.

**Figura 2.4** – Representação esquemática do teor de água e de açúcar durante a desidratação osmótica



Fonte: Barbosa-Cánovas e Vega-Mercado, 1996

A duração do processo osmótico deve ser mantida a menor possível para alcançar uma boa desidratação uma vez que a interrupção prematura do processo pode levar a uma remoção considerável de água sem grande difusão de açúcar (BARBOSA-CÁNOVAS & VEGA-MERCADO, 1996).

O efeito da concentração da solução osmótica tem sido consideravelmente estudado e foi demonstrado que a taxa de desidratação osmótica aumenta com o aumento da concentração (RASTOGI, RAGHAVARAO & NIRANJAN, 2005). A grande maioria dos trabalhos estudaram concentrações de até 70% de soluto, alguns destes são mostrados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** – Relação de alguns trabalhos sobre desidratação osmótica na literatura

<b>Pesquisadores</b>	<b>Alimento</b>	<b>Soluto</b>	<b>Concentração</b>	<b>T (°C)</b>
Bellary, Sowbhagya & Rastogi (2011)	Côco	Açúcar	0 a 50%	23
Castelló <i>et al.</i> (2009)	Maçã verde	Glicose e lactato de cálcio	50 °Brix / 0 – 2% respectivamente	30
Chenlo <i>et al.</i> (2006)	Castanha	Cloreto de Sódio	17 a 26,5%	25 a 45
Escobar <i>et al.</i> (2007)	Cenoura	Sacarose	50%	40
Khin, Zhou & Perera (2007)	Maçã Fuji	Dextrose e sacarose	45 a 65%	25 a 55
Mercali <i>et al.</i> (2011)	Banana	Sacarose e cloreto de sódio	30 – 60% / 0 -10% respectivamente	25 a 55
Moreira <i>et al.</i> (2007)	Castanha	Glicerol e cloreto de sódio	25 a 60% / 0 e 9,7% respectivamente	20
Osorio <i>et al.</i> (2007)	Amora e tamarilho	Sacarose, glicerol e etanol	32,5 a 70%	30
Ozdemir <i>et al.</i> (2008)	Pimenta verde	Cloreto de sódio e sorbitol	0 a 10%	20 a 40
Rizzolo <i>et al.</i> (2007)	Morango	Sacarose e sorbitol	60%	30
Singh <i>et al.</i> (2010)	Cenoura	Sacarose e cloreto de sódio	50° Brix / 5 – 15% respectivamente	35 a 55
Toğrul & İspir (2008)	Damasco	Diversos açúcares	40 a 70%	25 a 45

### ***c) Temperatura da solução osmótica***

A temperatura do processo afeta acentuadamente a taxa de osmose e os coeficientes de difusão. Um aumento na temperatura intensifica a remoção de água e a penetração do agente osmótico no tecido. No entanto, a proporção entre a água removida e o agente osmótico penetrante tem um valor constante. Também, o efeito da temperatura na cinética osmótica depende do tipo de agente osmótico utilizado (BARBOSA-CÁNOVAS & VEGAMERCADO, 1996; RASTOGI, RAGHAVARAO & NIRANJAN, 2005).

A grande maioria dos trabalhos utilizou temperaturas da solução osmótica de 20 a 55°C, o que pode ser visualizado na Tabela 2.2. Dificilmente são usadas temperaturas mais

elevadas, uma vez que podem danificar os tecidos do alimento, modificar a sua textura ou perder seu aroma. Torreggiani (1993) afirma que, em temperaturas acima de 60°C, ocorrem modificações nas características da estrutura, favorecendo o aparecimento de fenômenos indesejáveis como o ganho de sólidos.

### 2.2.3 Cinética de desidratação osmótica

Em fenômenos de difusão relacionados com a transformação de materiais homogêneos, o gradiente de concentração é dependente do tempo, e a difusão pode ser representada pela Segunda Lei de Fick para estado transiente, onde o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração dentro do sólido.

A Segunda Lei de Fick é utilizada para meios isotrópicos cuja estrutura e propriedades de difusão em qualquer ponto são as mesmas em todas as direções. Para uma transferência de massa multidirecional, em um sistema cartesiano, a Segunda Lei de Fick para estado transiente é escrita na forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

onde  $t$  é o tempo,  $C$  é a concentração molar de A,  $D_{AB}$  é a difusividade mássica de A em B e  $x$ ,  $y$  e  $z$  são coordenadas espaciais do sistema cartesiano.

Nos materiais biológicos, e em geral nos meios porosos, a difusão é menor do que em uma solução livre. Isso se deve à tortuosidade das trajetórias de fluxo e à retenção de íons e moléculas nas superfícies das partículas. De acordo com Chiralt e Talens (2005) o transporte de massa e o movimento no interior do material é determinado pelas características do tecido celular, tais como: tamanho das células, porosidade, tortuosidade, permeabilidade da membrana celular, entre outros.



### 2.2.4 Modelo de Peleg

O processo típico de desidratação osmótica requer várias horas de processamento para o alcance do equilíbrio e, em alguns casos, não é possível alcançá-lo devido à instabilidade biológica e/ou física do produto a ser desidratado. Um modelo empírico bastante utilizado para prever a cinética de desidratação osmótica de materiais biológicos é o Modelo de Peleg (1988). Este modelo tem sido utilizado para modelar curvas de sorção de diferentes alimentos e taxas de desidratação de frutas (MERCALI *et al.*, 2011; RÓZEK *et al.*, 2009), vegetais (AZOUBEL & MURR, 2004; MALDONADO *et al.*, 2008), peixes (CORZO & BRACHO, 2006; CORZO *et al.*, 2007) e carne de frango (SCHMIDT, CARCIOFI & LAURINDO, 2009) tratados com soluções osmóticas.

O modelo de Peleg (1988) relaciona a quantidade de matéria que flui ao longo do tempo, no processo osmótico, com a quantidade inicial de matéria por meio de dois parâmetros de processo que descreve curvas de adsorção. As curvas permitem a estimativa do teor de umidade após longos tempos de exposição a partir de dados experimentais para tempos relativamente curtos e é representada pela seguinte equação:

$$X_t - X_0 = -\frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (2)$$

onde  $X_t$  e  $X_0$  são o teores de umidade de uma amostra no tempo  $t$  de desidratação e no tempo igual a zero, respectivamente.  $k_1$  e  $k_2$  são parâmetros do modelo.

A constante  $k_1$  está relacionada com a taxa inicial de transferência de água através da Equação 3.

$$\frac{dX}{dt} = \left| \frac{1}{k_1} \right| \quad (3)$$

A constante  $k_2$  está relacionada com a concentração de água no alimento nas condições de equilíbrio ( $X_\infty$ ) através da Equação 4.

$$X_\infty = X_0 - \frac{1}{k_2} \quad (4)$$

### 2.2.5 Determinação da Difusividade Mássica Efetiva

Existem diversos métodos descritos na literatura para estimação de difusividades mássicas efetivas em sólidos baseados na solução da Segunda Lei de Fick, aplicada a condições de contorno e suposições apropriadas. Crank (1975) apresenta várias expressões para as soluções analíticas em diferentes geometrias.

No presente trabalho, o processo de desidratação osmótica foi feito em discos de yacon que podem ser aproximados pela geometria de placas planas infinitas com espessura  $2L$  e a equação governante deste processo de difusão de massa é dada pela Equação 1. Uma vez que será calculada a difusão da água, o “ $C$ ” (concentração molar) da Equação 1 passa a ser “ $X$ ” (teor de umidade). A distribuição inicial de água é uniforme e tem-se, em ambos os lados dos discos, condições de contorno de primeira ordem:

$$\begin{aligned} t = 0, -L < x < L, X = X_0 & \quad - \text{Distribuição inicial de umidade uniforme;} \\ t > 0, x = 0, dX/dx = 0 & \quad - \text{Simetria de concentração;} \\ t > 0, x = L, X = X_s & \quad - \text{Condição de concentração especificada na superfície.} \end{aligned}$$

onde  $X_s$  é o teor de umidade na superfície. A condição de contorno de primeira ordem, ou seja, de concentração especificada, é conseguida quando é possível assumir resistência convectiva negligenciável.

A solução analítica para a Segunda Lei de Fick sujeita às condições de contorno e à condição inicial discutidas anteriormente e integrada ao longo da espessura da placa (pois o valor experimental é um valor médio de concentração ao longo do tempo) é dada por Crank (1975):

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{X_t - X_0}{X_\infty - X_0} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\{-Fo(2n+1)^2 \pi^2 / 4\} \quad (5)$$

onde  $M_t$  é a quantidade total de água na placa após um tempo ( $t$ ) de processo,  $M_\infty$  é a quantidade correspondente de água quando o equilíbrio é atingido,  $X_t$  é a umidade no tempo  $t$ ,  $X_0$  é a umidade inicial,  $X_\infty$  é a umidade no equilíbrio.  $Fo$  é o número de Fourier, definido por:

$$Fo = \frac{D_e t}{L^2} \quad (6)$$

onde  $D_e$  é a difusividade mássica efetiva. Ao utilizar parâmetros adimensionais na Equação 5, é possível determinar  $D_e$  graficamente (CRANK, 1975).

### 2.2.6 Atividade de Água

A atividade de água ( $a_w$ ) está intrinsicamente relacionada à preservação dos alimentos, sendo, portanto, um dos parâmetros mais utilizados no controle de qualidade da indústria de alimentos.

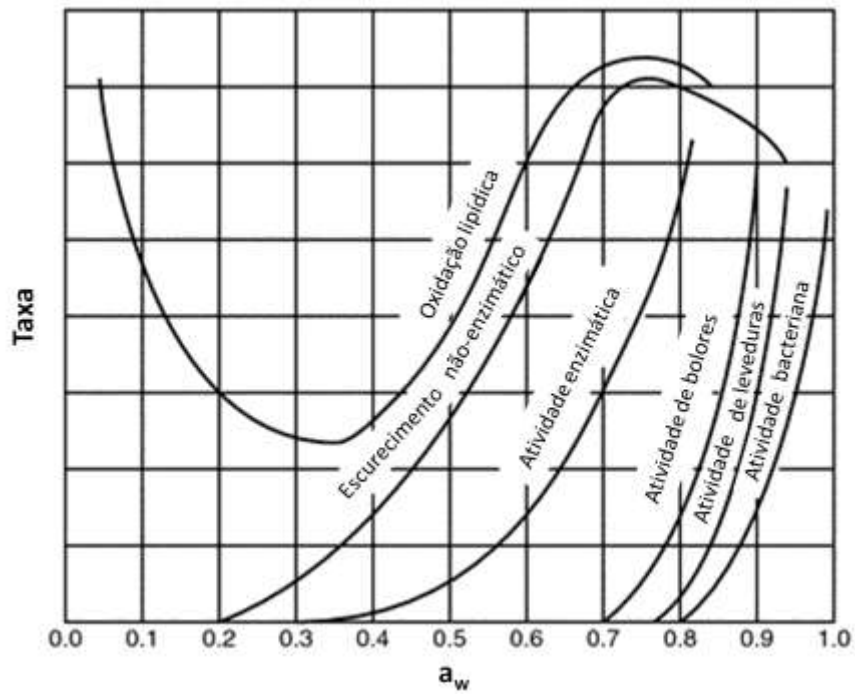
Alimentos desidratados são preservados uma vez que sua atividade de água esteja a um nível em que não pode ocorrer atividade microbológica e onde as taxas de reação de deterioração química e bioquímica são reduzidas o máximo possível. A  $a_w$  é definida como a razão entre a pressão de vapor da água presente em um alimento e a pressão de vapor da água pura, na mesma temperatura (TOLEDO, 2007).

Segundo Aguilera e Stanley (1999), os valores limites de  $a_w$  para o crescimento de microrganismos osmofílicos é de 0,6; para a maioria dos bolores é de 0,8; para leveduras é de cerca de 0,87 e para bactérias patogênicas é de 0,91. Os autores indicam ainda que, em alguns casos, a  $a_w$  mínima para o crescimento depende do tipo de soluto.

A relação entre a  $a_w$  e a taxa de reações deteriorativas nos alimentos é mostrada na Figura 2.5.; é possível perceber que o teor de água livre é um dos principais fatores na estabilidade de um alimento, pois as maiores taxas de reação ocorrem em alimentos com umidade alta e intermediária. A redução da  $a_w$  a valores abaixo de 0,7 deve prevenir a deterioração microbológica. Embora a deterioração microbiana não deva ocorrer em  $a_w = 0,7$ , Toledo (2007) recomenda  $a_w = 0,3$  a fim de prevenir outras reações de deterioração. A atividade de água máxima tolerada nos produtos desidratados, sem induzir a perda de propriedades desejáveis, oscila entre 0,35 e 0,5, dependendo do produto (FENNEMA, 2010).

Segundo Toledo (2007), um produto alimentício também pode ser desidratado através da redução de massa e posteriormente preservado usando-se outras técnicas.

**Figura 2.5** – Relação entre atividade de água e reações deteriorativas em alimentos



Fonte: Toledo, 2007

## **Capítulo 3 – MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho foi desenvolvido nos laboratórios LATEPA (Laboratório de Tecnologia e Processos em Alimentos) e LATOR (Laboratório de Tecnologia Orgânica), situados no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

### ***3.1 Material***

#### **3.1.1 Yacon**

As raízes de yacon, provenientes do estado de São Paulo, foram adquiridas na Central de Abastecimento do Rio Grande do Sul (CEASA), em Porto Alegre. As mesmas foram selecionadas considerando a ausência de injúrias visuais e armazenadas sob refrigeração ( $8 \pm 2^\circ\text{C}$ ) até o momento do uso, que foi inferior a 24 horas do momento da compra.

O yacon foi lavado e cortado em discos com geometria de placa plana circular de  $5 \pm 0,05$  cm de diâmetro e  $0,5 \pm 0,01$  cm de espessura, conforme ilustrado na Figura 3.1.

**Figura 3.1** – Discos de yacon (geometria de placa plana)



## **3.2 Desidratação Osmótica**

### **3.2.1 Ensaios Preliminares**

Em uma primeira etapa do trabalho, a fim de escolher os solutos osmóticos para o delineamento do planejamento experimental, foram realizados ensaios com soluções aquosas de glicerol (Sigma-Aldrich), maltodextrina Mor-Rex 1910 (Corn Products Brasil), polidextrose (Corn Products Brasil) e sorbitol (Sigma-Aldrich), todas na concentração de 33% (m/m). Os reagentes e a água destilada foram pesados com o auxílio de balança semi-analítica com precisão centesimal (marca Marte, modelo A 10K). A maltodextrina e a polidextrose foram gentilmente doadas pela Corn Products Brasil.

Os discos de yacon foram pesados e colocados em um béquer de 1 L, contendo um agitador magnético (modelo 752A Fisatom, São Paulo / SP), em uma proporção de 1:12, em massa, de solução de glicerol, maltodextrina, polidextrose ou sorbitol, preparadas previamente na concentração de 33% em água destilada. Em cada béquer foi utilizada uma grade plástica a fim de evitar a flutuação dos discos na solução e o choque dos discos com o agitador magnético. As condições de agitação foram de aproximadamente 900 rpm, a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e pressão atmosférica.

O processo de desidratação osmótica foi realizado num período de 0 – 6 h sob condições de processo constantes para todos os experimentos. Durante o tratamento osmótico, em intervalos de tempos determinados (0, 0,5, 1, 2, 4 e 6 h) foram retiradas amostras da

solução osmótica. Para cada intervalo de tempo, foi retirado um disco de yacon, totalizando 6 pontos experimentais para cada tratamento. Depois de removidos da solução, os discos de yacon foram drenados, enxaguados com água destilada para remoção da solução residual e cuidadosamente secados com papel toalha. Em seguida, as amostras foram pesadas para o cálculo de perda de massa e então analisadas físico-quimicamente quanto aos teores de umidade e de sólidos solúveis.

Nestes experimentos, foi possível verificar que com 6 h de desidratação, a condição de equilíbrio não foi atingida, mas foi possível observar que o glicerol e o sorbitol foram os solutos que apresentaram maior osmo-desidratação (em termos de remoção de água). Por esta razão estes reagentes foram os escolhidos para serem utilizados na continuidade dos trabalhos.

### **3.2.2 Procedimento Experimental dos experimentos de osmo-desidratação**

As soluções osmóticas de glicerol (Farmaquímica S.A.) e de sorbitol (Proton Química) utilizadas durante a desidratação osmótica foram feitas com água destilada, nas concentrações de 30, 50 e 70% (v/v).

As soluções osmóticas ternárias de glicerol ou sorbitol com lactato de cálcio pentahidratado (Synth) foram feitas utilizando-se 20 g de lactato de cálcio por litro de solução de glicerol ou de sorbitol a 70%. O lactato de cálcio foi pesado com o auxílio de balança semi-analítica com precisão centesimal (marca Marte, modelo A 10K).

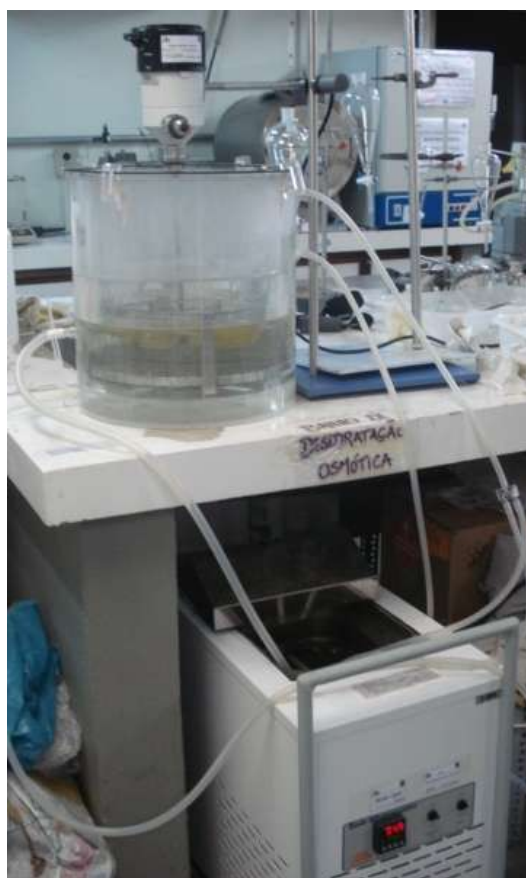
A razão entre a amostra e a solução osmótica foi de aproximadamente 1:20 (m/m), mesma proporção utilizada por Heredia *et al.* (2007) and Rastogi e Raghavarao (1997).

Os discos de yacon foram branqueados em vapor de água por 4 minutos em autoclave (marca Primatec, modelo vertical CS) seguidos de resfriamento por 3 minutos em água gelada, de acordo com a melhor condição encontrada por Fante *et al.* (2013), visando à preservação dos FOS e ao não escurecimento enzimático das amostras. Após o resfriamento, os discos foram secados em papel toalha e pesados. Foi estabelecida massa média de  $10,4 \pm 0,5$  g para não acarretar maiores erros na medida de perda de massa.

A desidratação osmótica foi realizada em um tanque de acrílico encamisado (dimensões 33 cm de altura por 28,5 cm de diâmetro interno, com 2,5 cm de camisa) contendo uma grade interna para contenção das amostras (12 cm de altura por 24,5 cm de diâmetro, a

grade era vazada no centro para a entrada do agitador e totalmente telada a fim de evitar o choque das amostras com o agitador mecânico), conectado a um banho termostático (marca ACB Labor, Americana, SP) para manutenção da temperatura constante, com sistema de agitação (agitador mecânico modelo 713 Fisatom, São Paulo / SP) a 1.000 rpm, conforme mostrado na Figura 3.2. As condições de temperatura e de concentração das soluções osmóticas estão especificadas na Tabela 3.2 (no subcapítulo “Planejamento Experimental”) para todos os tratamentos realizados.

**Figura 3.2** – Sistema experimental de desidratação osmótica



Durante o tratamento osmótico, em intervalos de tempos determinados (0, 0,5, 1, 2, 4 e 6 h) foram retiradas amostras da solução osmótica. Para cada intervalo de tempo, foram retirados de 6 a 9 discos de yacon, totalizando 6 pontos experimentais para cada tratamento. Assim como na primeira etapa, depois de removidos da solução, os discos de yacon foram drenados, enxaguados com água destilada para remoção da solução residual e cuidadosamente secados com papel toalha. Em seguida, as amostras foram pesadas e então analisadas físico-



quimicamente. Com o tempo de desidratação de 6 horas, não foi possível atingir a condição de equilíbrio, entretanto, se obteve uma desidratação significativa e suficiente para realização dos cálculos matemáticos.

### **3.3 Cálculo da Perda de Massa**

As massas dos discos de yacon iniciais e retiradas em cada tempo foram utilizadas para cálculo da Perda de Massa em percentual ( $ML$  %) de acordo com a Equação 7:

$$ML (\%) = \frac{(m_0 - m_t)}{m_0} \cdot 100 \quad (7)$$

onde,  $m_0$  e  $m_t$  são as massas das amostras no tempo inicial e no tempo “ $t$ ”, respectivamente.

As medidas de massa foram realizadas em balança analítica (marca Marte, modelo AY 220).

### **3.4 Análises Físico-Químicas**

#### **3.4.1 Determinação do Conteúdo de Umidade**

A determinação do conteúdo de umidade foi realizada através do método gravimétrico de acordo com AOAC 930.04 (AOAC, 1990). Este método consiste em pesar, em balança analítica (marca Marte, modelo AY 220), aproximadamente 5 g de amostra em cápsula contendo um bastão de vidro e, aproximadamente, 10 g de areia tratada (todas as massas eram conhecidas). A utilização da areia é necessária devido ao alto teor de açúcares presente no yacon e oriundo do processo de desidratação osmótica. Temperaturas elevadas promovem a caramelização dos açúcares e a formação de uma crosta superficial que impede a saída de água do alimento. A areia evita a formação dessa crosta e promove a formação de poros, facilitando a remoção de água da amostra.

Após a pesagem, com auxílio do bastão de vidro, misturou-se o yacon com a areia. A seguir, as cápsulas foram levadas à estufa (marca Biomatic) na temperatura de 105°C até a obtenção de peso constante (de 24 a 48 horas, dependendo das condições da amostra). Passado o tempo de estufa, as cápsulas foram retiradas, resfriadas em dessecador e pesadas novamente ( $M_s$ ). Através da diferença de massa antes e depois da secagem, foi medido o teor de umidade da amostra em base seca ( $X^w$ ), de acordo com a seguinte equação:

$$X^w = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (8)$$

onde  $M$  é a massa total de amostra úmida inicial e  $M_s$  é a massa da amostra seca.

Este procedimento foi feito em triplicata para todas as amostras dos experimentos.

### 3.4.2 Determinação do Teor de Sólidos Solúveis

O teor de sólidos solúveis foi medido com refratômetro portátil (modelo RTA-50 Instrutherm, São Paulo / SP) na primeira etapa do trabalho. Na segunda etapa, foi utilizado refratômetro de bancada Carl Zeiss Mod. 32-G. As análises foram conduzidas a 20°C, segundo o método 932.12 da AOAC (2002).

### 3.4.3 Determinação da Atividade de Água

A atividade de água foi medida através de leitura direta a 25°C em um higrômetro termoconstante elétrico, modelo LabMaster-aw (Novasina, Suíça) de acordo com o método 978.18 da AOAC (1990).

### 3.4.4 Determinação do Teor de Açúcares

A quantificação dos teores de frutose, glicose, 1-cestose, nistose, glicerol e sorbitol foi realizada por cromatografia em fase líquida, HPLC (High Performance Liquid

Chromatography) usando uma adaptação do método de Zuleta e Sambucetti (2001). Foi utilizado um cromatógrafo da PerkinElmer modelo Series 200 (Perkin Elmer Corp., Series 200, Norwalk, CT, EUA) equipado com um detector de índice de refração. Utilizou-se a coluna Hi-Plex Na  $300 \times 7,7$  mm  $10 \mu\text{m}$  e a pré-coluna Hi-Plex Na  $5 \times 3$  mm  $10 \mu\text{m}$  ambas da marca Agilent Technologies. A vazão de fase móvel foi de  $0,3 \text{ mL/min}$  e a temperatura da coluna de  $85^\circ\text{C}$ . Na fase móvel, utilizou-se água ultrapura, obtida por equipamento da marca Milli-Q. A Tabela 3.1 apresenta o tempo de retenção dos compostos analisados, estes foram obtidos a partir da injeção dos respectivos padrões para identificação dos picos.

**Tabela 3.1** – Tempo de retenção dos compostos na coluna utilizada

Composto	Grau de Polimerização	Tempo (min.)
Nistose	4	17,06
1-cestose	3	19,34
Glicose	1	27,87
Sorbitol	1	29,33
Frutose	1	30,06
Glicerol	1	31,91

As amostras foram preparadas por uma adaptação do método descrito por Toneli *et al.* (2007), usado para extração de inulina em raízes de chicória. A amostra (15 g) foi triturada com 150 mL de água deionizada a  $90^\circ\text{C}$  usando um liquidificador industrial e então aquecida em banho-maria a  $80^\circ\text{C}$  por uma hora com agitação constante. A suspensão foi então resfriada, filtrada através de papel filtro Whatman nº 1 e depois por membrana de  $0,22 \mu\text{m}$ . Os filtrados foram armazenados a  $-18^\circ\text{C}$ . Para as análises, antes da injeção no HPLC, as amostras congeladas foram pré-aquecidas a  $80^\circ\text{C}$  e sonicadas em banho de ultrassom Thorton por 10 minutos. As análises foram realizadas em duplicata.

### 3.4.5 Determinação do pH

As amostras de yacon *in natura* também foram caracterizadas quanto ao seu pH, determinado com o uso de um pHmetro digital (modelo DM-22 Digimed, Campo Grande / SP) de acordo com o método 981.12 da AOAC (2000).

### 3.4.6 Determinação do Teor de Cálcio

Amostras *in natura*, branqueadas e tratadas por 6 horas com 20 g/L de lactato de cálcio foram analisadas no Instituto de Química (Campus do Vale, UFRGS). As determinações foram efetuadas empregando espectrômetro de absorção atômica com chama (F AAS) com introdução da solução amostra utilizando nebulização pneumática, seguindo-se uma adaptação do método 975.03 da AOAC (2006). As análises foram realizadas em triplicata.

### 3.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Amostras de yacon *in natura*, branqueadas e osmodesidratadas por 6 horas foram visualizadas em MEV. Aproximadamente 10 mg de amostra foram dispostas em um adesivo dupla-face fixado em um *stub*.

O microscópio de varredura eletrônica (Hitachi TM3000) foi operado no modo *Analy*, no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da Escola de Engenharia - UFRGS. Foram obtidas imagens das amostras com magnificação de 200, 500 e 1000 vezes.

## 3.5 Modelo Matemático

O modelo desenvolvido neste estudo, com base na Segunda Lei de Difusão de Fick para estado transiente, prevê a quantidade de água que deixa o yacon em função do tempo. Para tanto, foi utilizada a Equação 5 (levando-se em consideração os quatro primeiros termos da série, conforme metodologia utilizada por Mercali (2009)), baseada nas seguintes considerações:

- os discos de yacon são placas planas (diâmetro 10 vezes maior do que a espessura);
- a concentração inicial de água é uniforme em toda a amostra;
- o processo é isotérmico;
- a parede celular é uma membrana semipermeável hipotética, que permite apenas a difusão de água para a solução osmótica e a incorporação de soluto na amostra;

- o encolhimento é desprezível;
- a resistência externa à transferência de massa é negligenciável.

A perda de água no equilíbrio foi determinada através do Modelo de Peleg (1988) (Equação 2).

O número de Fourier foi graficado em função do tempo, para obtenção da inclinação da reta e respectivo cálculo da difusividade mássica efetiva (ou aparente), de acordo com a Equação 6. Para cálculo do número de Fourier foi utilizado o método *Solver* do programa Excel. As análises de regressão e estimação dos parâmetros também foram realizados no mesmo programa. O mesmo método foi utilizado por MERCALI (2009).

### **3.6 Planejamento Experimental**

O processo de osmo-desidratação, empregando os solutos glicerol e sorbitol, foi conduzido de acordo com um planejamento experimental fatorial completo, com 2 fatores, um contendo 2 níveis (temperaturas de 30 e 50°C) e o outro, 3 níveis (concentrações de 30, 50 e 70%) nos tratamentos de 1 a 6 para avaliar diferentes condições de processo. O planejamento seguido encontra-se na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Planejamento Experimental**

<b>Trat.</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Concentração de glicerol ou sorbitol (%)</b>
1	30	30
2	50	30
3	30	50
4	50	50
5	30	70
6	50	70

Após realizados todos os tratamentos acima, foi feito um novo tratamento, que foi estabelecido segundo melhor resposta de desidratação dos tratamentos anteriores (maior remoção de água com menor redução dos FOS avaliados segundo análise estatística),

identificada como tratamento de número 5. Neste novo tratamento, foi adicionado lactato de cálcio na concentração de 20 g/L de solução osmótica para estudo da DO com solução ternária a 30°C na concentração de 70% de glicerol e sorbitol.

As respostas de perda de massa, teor de umidade, teor de sólidos solúveis, atividade de água, teor de açúcares e teor de cálcio foram avaliadas através de ANOVA e para a comparação entre as médias dos tratamentos foi empregado o teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, com o auxílio do programa SAS 9.3.

## **Capítulo 4 - ARTIGO 1**

Título:

**Study of the use of different kinds of solutes alternative to sucrose in osmotic dehydration of yacon**

Autores:

Bethania Brochier, Ligia Damasceno Ferreira Marczak e Caciano Pelayo Zapata Noreña.

Artigo submetido para revista internacional, formatado de acordo com as normas da mesma.

## Study of the use of different kinds of solutes alternative to sucrose in osmotic dehydration of yacon

### ABSTRACT

*Yacon is a tuberous root of Andean origin, with high levels of fructo-oligosaccharides; therefore, it has many health-promoting properties and can be consumed by diabetics. However, having a high amount of water, it has a poor shelf life under ambient conditions. Osmotic dehydration is a promising technology for reducing post-harvest losses and for increasing the food durability. The present work aims to develop a study of solutes glycerol, maltodextrin, polydextrose and sorbitol, allowing the consumption of yacon osmotically dehydrated for diabetics, keeping its properties as prebiotic. Osmotic dehydration was carried out using a yacon to 33% concentrated syrup weight ratio of 1:12, with magnetic stirring at 23°C and atmospheric pressure. The best results were achieved for glycerol and sorbitol, respectively, with  $80 \pm 4\%$  and  $81 \pm 1\%$  of water removed and increased of  $3.73 \pm 0.11$  and  $4.30 \pm 0.16$  times in total soluble solid. Maltodextrin did not promote dehydration.*

**Keywords:** *osmotic dehydration, osmotic agent, yacon, FOS, prebiotic.*

### PRACTICAL APPLICATIONS

The osmotic dehydration of yacon using solutes alternative to sucrose, such as glycerol, maltodextrin, polydextrose or sorbitol can allow its consumption by diabetics, besides aggregating commercial value and extend periods of shelf life for fruits and vegetables.

### 1 INTRODUCTION

The tuberous root of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) belongs to the family Asteraceae, originally from the Andean valleys. With similar appearance to sweet potatoes, sweet flavor and crunchy pulp, the root bark is mainly consumed fresh, pure or in the presence of fruits (Vilhena et al. 2000).

Unlike most tuberous species which store energy as starch, yacon has fructo-oligosaccharides (FOS) as the main storage carbohydrate. FOS are short-chain polymers of fructose with a degree of polymerization (DP) from 3 to 10 (Goto et al. 1995; Vilhena et al. 2000). Due to the presence of FOS, yacon has functional properties, as soluble dietary fibers and prebiotics as they are not digested by enzymes in the human digestive tract (conferring relatively low energy value), besides its influence on intestinal function and on lipid parameters (Campos et al. 2012; Gibson and Roberfroid 1995; Cazetta et al. 2005).



Due to its high amount of water, usually 86-90% of fresh weight of yacon (Goto et al. 1995; Habib 2011), its shelf life under ambient conditions is approximately one week. Further, FOS concentration decreases over time post-harvest storage due to depolymerization. So take advantage of the root with its full functionality depend on immediate consumption after harvesting or its processing. An alternative to keep the yacon adequate for consumption for a longer period, retaining its properties, is osmotically dehydrate it with solutes that maintain their prebiotic qualities.

Osmotic dehydration (OD) involves the partial removal of water in foods that are immersed in a hypertonic aqueous solution. The driving force for removal of water occurs due to the difference in osmotic pressure between the food and the surrounding solution. The complex cellular structure of the food acts as a semi permeable membrane. Because the membrane is not completely selective, it results in two countercurrent mass transfer flows: diffusion of water from food to solution and diffusion of solute from solution to food (Herman-Lara 2012; Khin et al. 2007; Raoult-Wack 1994, Rastogi and Raghavarao 1997).

The OD keeps some properties of fresh food such as texture, color, flavor, nutritional value and, when performed prior to a drying process, reduces the thermal injury of the food, drying time and energy consumption (Khin et al. 2007).

The main requirements for a solution to be used as the osmotic agent are its high water solubility, low cost, have a positive effect on the sensory properties and ensure the stability of the final product (Dionello et al. 2007). There are studies in the literature that use osmotic agents alternative to sucrose and sodium chloride (major solutes used for OD). Researchers have been used maltodextrin and sorbitol as osmotic agents in the dehydration of apricots (Toğrul and İspir 2008), and sorbitol for strawberries (Rizzolo et al. 2007), green pepper (Ozdemir et al. 2008), among other fruits and vegetables. Scientific works of OD with glycerol include chestnuts (Moreira et al. 2007), grapes (Rózek et al. 2009), Andes berries and tamarillos (Osorio et al. 2007). To the best of our knowledge, no studies were performed about osmodehydration with polydextrose.

Glycerol, polydextrose and sorbitol are classified as food additives by the Codex Alimentarius (2012). Polydextrose is a polymer of glucose, which confers water-soluble functional characteristics similar to sucrose among them, bulking and glazing agent, stabilizer and thickener (Codex Alimentarius 2012). Similarly to sorbitol is non-cariogenic and reduces water activity. It also adds prebiotic action, ensuring a healthy and balanced intestinal

microbiota, it is resistant to mammalian metabolism (providing low calorie = 1 kcal/g) and to microbial degeneration (Burdock and Flamm 1999).

Glycerol is used to improve the texture of foods (plasticizer), as a thickener and has the advantages of microbiological protectant (Moreira et al. 2007, Codex Alimentarius 2012). Its caloric value is 4.3 kcal/g. It is a byproduct of biodiesel production and after treatment for removal of residual methanol, its use in osmotic dehydration in industrial scale, would be an alternative to decrease the surplus generated.

Sorbitol is the polyol mostly found in nature, and its main features are the sweetening power (up to 70% of the sweetness of sucrose), and has chemical, thermal and bacteriological stability. It has low calorie, 2.4 kcal/g.

Maltodextrin is a complex carbohydrate of gradual absorption produced by the partial hydrolysis of starch. It is used as a sweetener, energetic repositon (replenishes muscle glycogen) and adds 3.5 to 4 kcal/g. According to Patel and Goyal (2012), maltodextrin and sorbitol are also prebiotics, with proven health-promoting properties, for example, reduction of serum cholesterol.

The aim of this work is to study the osmotic dehydration of yacon, through the use of solutes that can be consumed by people with diabetes, keeping their prebiotic characteristics with low energy.

## 2 MATERIAL AND METHODS

### 2.1 Material

Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) roots were cultivated in the State of São Paulo, Brazil, and obtained in the Supply Centers of the State of Rio Grande do Sul (CEASA) in the city of Porto Alegre, RS, Brazil. They have been selected considering the absence of visual damage and stored under refrigeration ( $8 \pm 2^\circ\text{C}$ ) until use, which was less than 24 hours from time of purchase.

Osmotic solutions of distilled water with glycerol (Sigma-Aldrich), Mor-Rex 1910 maltodextrin (Corn Products Brazil), polydextrose (Corn Products Brazil) and sorbitol (Sigma-Aldrich) were prepared. The aqueous solutions concentrations were 33 g/ 100 g and their soluble solids were as follows: glycerol – 30.2 °Brix, maltodextrin – 34.1 °Brix, polydextrose – 34 °Brix and sorbitol – 37.2 °Brix.

## 2.2 Osmotic Dehydration

The roots were washed, peeled and cut into discs of  $5 \pm 0.05$  cm in diameter and  $0.5 \pm 0.01$  cm thick and weighted.

The experiments were carried out in duplicate in glasses beaker using a magnetic stirring of 900 rpm (model 752A Fisatom, São Paulo / SP), in a yacon:solution ratio of 1:12, at a temperature of  $23 \pm 2$  °C and under atmospheric pressure.

At determined times (0.5, 1, 2, 4 and 6h), the samples were removed from the osmotic solutions, rinsed with distilled water to remove the sugar film formed on the surface of the product, carefully blotted (with an absorbent paper), and were weighted again.

## 2.3 Analytical Determinations

The mass loss (*ML*) was measured weighting the samples in an analytical balance (Marte, AY 220), the moisture content was determined according to 930.04 AOAC method (1990) and soluble solids were measured with portable refractometer (model RTA-50 Instrutherm, São Paulo / SP) by the AOAC 932.12 method (2002) in fresh and osmotically treated samples. The fresh samples were also characterized by pH, determined using a digital pH meter (model DM-22 Digimed, Campo Grande / SP) according to the AOAC 981.12 method (2000). The analyses were performed in triplicate. The mass loss was determined using the following equation:

$$ML (\%) = \frac{(m_0 - m_t)}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

where  $m_0$  and  $m_t$  are the masses of the samples at baseline and at time " $t$ ", respectively.

ANOVA was used for the statistical analyses and the treatments compared by way of Tukey's means multiple comparison test. The SAS 9.3 program was used for the statistical tests.

## 3 RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Yacon composition

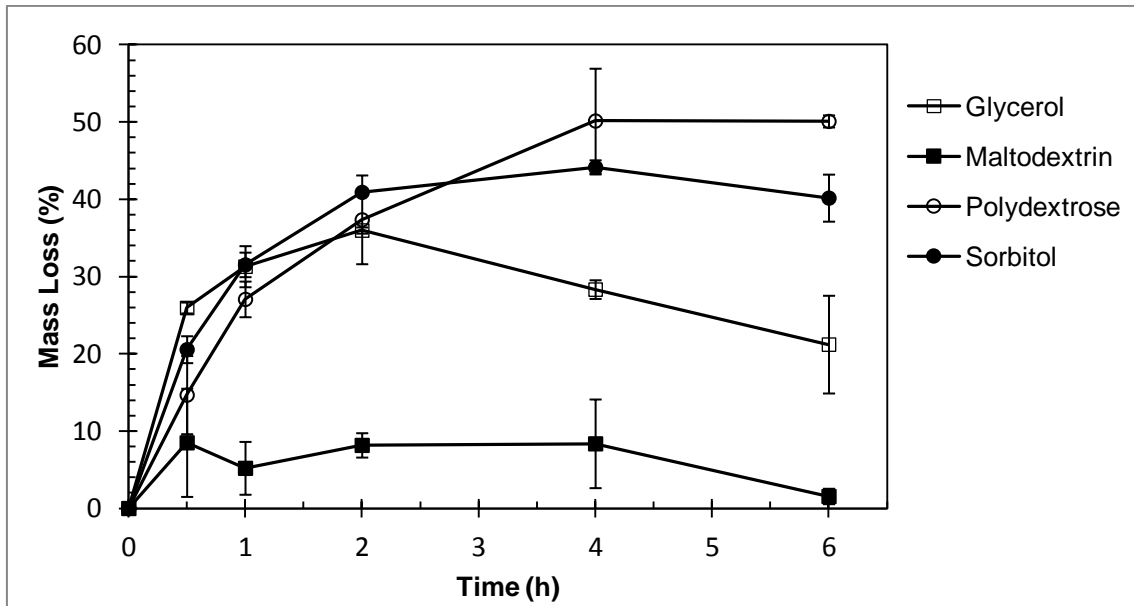
Samples of fresh yacon used in the experiments had a moisture content of  $91.09 \pm 0.86\%$ , soluble solids of  $8.85 \pm 0.87$  °Brix and pH  $6.06 \pm 0.03$ . These values are in accordance with Manrique et al. (2005) who reported that about 85 to 90% of the fresh weight of yacon

consists of water and with Scher et al. (2009) who found moisture of  $88.69 \pm 0.10\%$ , soluble solids of  $9.9 \pm 0.01^\circ\text{Brix}$  and  $\text{pH } 6.09 \pm 0.02$ .

### 3.2 Mass Loss

Figure 1 presents the mass loss of the samples over time for the four solutes used in this work. It can be seen that for soaking solutions of glycerol, sorbitol and polydextrose there were an increase of mass loss as time passes. Mass losses were higher in the first two hours, due to the greater difference in the concentration gradient between the osmotic solution and yacon in the beginning of the OD process. According to Raoult-Wack (1994), under typical conditions used for dehydrating fruits and vegetables at atmospheric pressure, the mass transfer occurs significantly only during the first two hours of process. Then, mass transfer rates become progressively slower until water loss stops, whereas solute gain continues to increase steadily.

The mass loss curves behavior for polydextrose and sorbitol were similar to those found by Moreira et al. (2007) using glycerol solutions in OD of chestnuts. After 2 hours of the osmodehydration process, the mass loss rate of yacon treated with glycerol solution decreased due to lower water removal in relation to the solute uptake. In this study, polydextrose and sorbitol solutions had similar behavior. This is because solutes with higher molar mass (MM) - (sorbitol MM = 182.17 kg/kmol and polydextrose MM over 162 kg/kmol) - have lower permeability in the food matrix than smaller solutes (in this case glycerol MM = 92.09 kg/kmol). According to El-Aouar et al. (2006), the water loss is usually attributed to the influence of natural tissue membranes as well as the diffusive properties of water and solutes, as a function of their respective molar masses.



**Fig 1** Mass Loss (%) of yacon over osmotic dehydration time

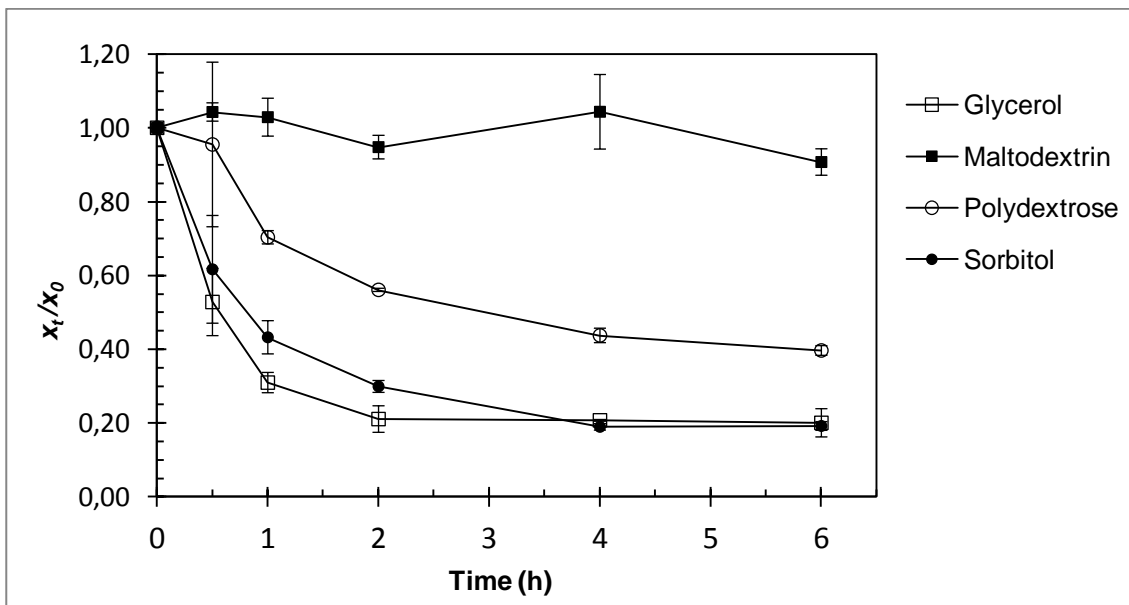
It can also be observed in Figure 1 that three periods of mass loss rate were identified for glycerol and sorbitol solutes. Initially, a quick mass loss (up to 2 hours of OD), caused by the major water removal rates of the food, based on the difference in osmotic pressure between the solution and yacon. After, a constant period (or even at a lower rate) occurs, where the water outlet rates may be equivalent to the input of solute rates; and finally, an inversion of the curve relative to the first time, because there is a mass gain associated with the higher rate of solid gain in relation to the countercurrent water from yacon. Polydextrose showed only the first two steps observed for the aforementioned solutes. According to Toğrul and İspir (2008), in the dynamic period, the mass transfer rates are increased or decreased until equilibrium is reached. Equilibrium is the end of osmotic process, i.e., the net rate of mass transport is zero. Moreover, with the use of maltodextrin, the level was set from the beginning of the process (with small variations in gain and weight loss, but with balance of mass loss compared to the initial sample).

### 3.3 Moisture Content

Figure 2 shows the values of the dry basis moisture content, normalized with the initial moisture content ( $x_t/x_0$ ), plotted over time. It was possible to see that the moisture of the samples decreased along the osmotic process for polydextrose ( $x_t/x_0 = 0.40 \pm 0.01$ ), glycerol ( $x_t/x_0 = 0.20 \pm 0.04$ ) and sorbitol ( $x_t/x_0 = 0.19 \pm 0.01$ ) representing water removal of  $60 \pm 1\%$ ,  $80 \pm 4\%$  and  $81 \pm 1\%$  respectively, compared to the initial values. Maltodextrin did not show

satisfactory results of dehydration because the values of normalized moisture were very similar at all times evaluated, keeping close from the beginning to the end of the osmotic process. The glycerol and sorbitol accounted for the largest loss of moisture in the OD process, with no significant difference ( $p < 0.05$ ) between them. This behavior (as occurred in Figure 1), indicates that these three solutes are around the equilibrium conditions because the moisture content was found to be fairly constant in the final times of OD; this is in accordance with Moreira et al. (2007) which stated that water loss rate is high at the first times and after decreases due to the system is closed to pseudoequilibrium. Apparently the equilibrium state was not achieved in the present work (excepted for glycerol) although Azuara et al. (2009) mentioned that the equilibrium condition is asymptotic, and this condition may be denominated as asymptotic moisture content (instead of equilibrium) because this was reached in dynamic conditions of drying. According to this explanation, it can be said that the equilibrium was achieved for glycerol and sorbitol.

The transfer of water from the food to the medium was due to the concentration gradient between the yacon intracellular fluid and osmotic solution. The same phenomenon was also observed in the work of Mercali et al. (2011), using sucrose and sodium chloride on bananas and Moreira et al. (2007), with glycerol on chestnuts.

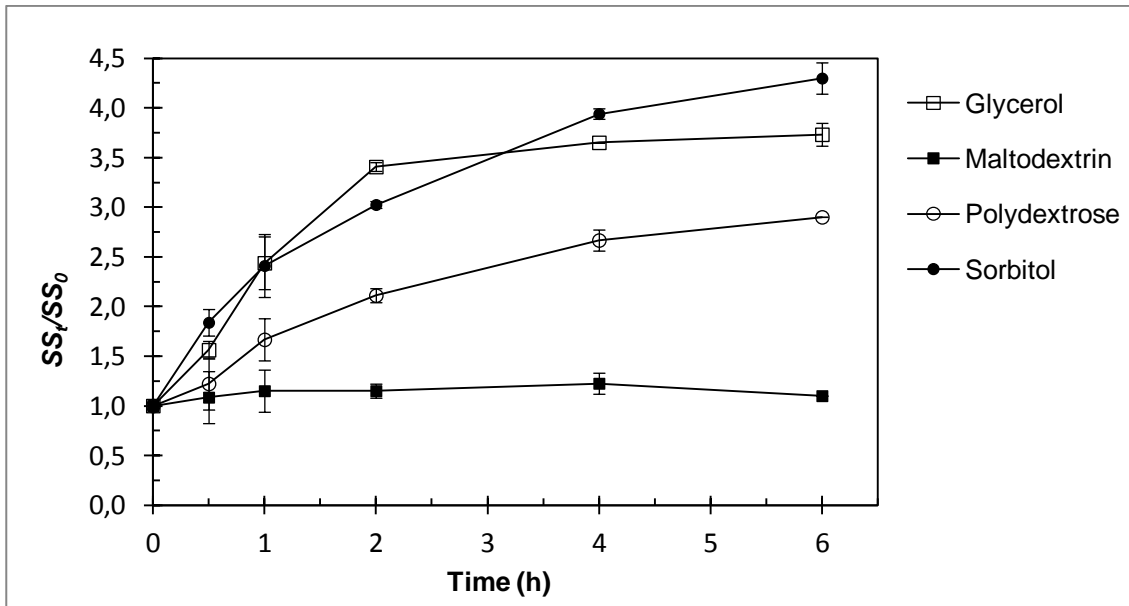


**Fig 2** Moisture content variation (dimensionless) of yacon over osmotic dehydration time

### 3.4 Soluble Solids

Figure 3 shows the values of soluble solids (normalized with the initial value) plotted against time of immersion. It was observed an increase in soluble solids content over time for all products except for maltodextrin solution. At the end of 6 hours of immersion, the samples treated with polydextrose solution presented final soluble solids of  $26.1 \pm 0.14$  °Brix, an increase of  $2.90 \pm 0.02$  relative to the initial sample. The yacon treated with sorbitol (final total soluble solids of  $36.1 \pm 0.11$  °Brix) and glycerol (final total soluble solids of  $29.9 \pm 0.92$  °Brix) had the highest increases in soluble solids ( $SS_t/SS_0 = 4.30 \pm 0.16$  and  $3.73 \pm 0.11$ , respectively), indicating greater diffusion in the samples. This is explained because once glycerol and sorbitol have low molar mass as compared to polydextrose and maltodextrin, more readily penetrate into the tissues of the root. These results are similar to those observed by Dionello et al. (2007) who, studying the osmotic dehydration of pineapple in invert sugar and sucrose solutions, observed an increase of 3-4 times compared to the initial content of total soluble solids.

According to Figures 2 and 3, it can be seen that the transport mechanism of water and solute occurred mainly during the first 2 hours of immersion, followed by a period in which the mass transfer rate decreased gradually. The same phenomenon was reported by Shi and Le Maguer (2002), in the first 2-3 hours of OD processing. Kotovicz et al. (2013) investigated the effects of temperature, fructose concentration and edible coating on the kinetics of osmotic dehydration of yacon slices and found that, at the beginning of the process, both the water removal rate and the difference between the water removal rate and the penetration rate of osmotic agent are high. Dionello et al. (2007) observed that, for different values of temperature in the OD processes with pineapple slices, the content of soluble solids increased significantly only in the first 30 minutes, remaining unchanged in the next 90 minutes of the process. This behavior demonstrated that solid gain due to the impregnation of the solute in the fruit surface layers was only significant in the first 30 minutes of the process.



**Fig 3** Variation of soluble solids (dimensionless) of yacon over osmotic dehydration time

Chun et al. (2012) have found good dehydration results of blueberries working with molecular-press dehydration using maltodextrin. This alternative dehydration is similar to osmotic dehydration, but uses larger molecules of dehydrating agents: plant cells can be dehydrated as they are contracted by the diffusion pressure of the maltodextrin molecules - molar mass over 324 kg/kmol- applied to the cell wall in solution; yet, polymers cannot pass through the cell wall because of their large size when plant tissues are exposed to the concentrated maltodextrin solution. However, maltodextrin showed no satisfactory results in yacon osmotic dehydration in the present work; there was no mass loss, either water loss or solids gain. An opposite behavior was found by Toğrul and İspir (2008): although maltodextrin has higher molecular weight than the other solutes used in their assays, it was absorbed as good as glucose in apricots. The high absorption characteristic of maltodextrin was the explanation suggested by the authors to explain the high solid gain of this solute. Furthermore, it is possible that the molar mass of maltodextrin used in the present work (MM from 1458 to 1944 kg/kmol) was greater than that used in experiments with apricots, as maltodextrin may comprise from 2 up to 20 glucose molecules (Marchal et al. 1999). In this case the lack of solid gain may be due to its high molar mass, which decreases its permeability through the yacon matrix; just the expected effect as wall material.

This phenomena is in accordance with the results reported by Khin et al. (2007) who studied the effect of maltodextrin coating on mass transfer during osmotic dehydration of apple cubes; since coating serves as an extra barrier to the mass transfers during osmotic



dehydration, both solute uptake and water loss are reduced in coated food materials. The results showed that coated apple cube samples presented a lower in solid gain and in water loss than the uncoated samples. The same results were obtained in a study performed by Jokić et al. (2008) to investigate possibilities for controlling solid gain during osmotic dehydration of sugar beet where maltodextrin was used as edible coating. Large solute uptake tends to cause a decreasing of the dehydration rate due to the reduced osmotic pressure gradient across the product-medium interface during the osmotic dehydration and further drying processes. In addition, large solute uptake gives negative impact on the nutritional profile of the product (Jokić et al. 2008, Khin et al. 2007, Lazarides and Mavroudis 1996, Phisut 2012).

#### **4 CONCLUSIONS**

The present work investigated the osmotic dehydration in yacon using four different solutes: glycerol, maltodextrin, polydextrose and sorbitol.

The results showed that water loss and soluble solids values increase with time when glycerol, sorbitol and polydextrose solutions were used. Different stages of mass loss were identified for these three solutes with higher rates of water removal in the first two hours of the process. Maltodextrin did not behave as osmotic agent in this study.

The glycerol and sorbitol allowed greater dehydration of yacon, either by moisture loss (respectively  $80 \pm 4\%$  and  $81 \pm 1\%$  of water removed) and by the incorporation of solids (increased of  $3.73 \pm 0.11$  and  $4.30 \pm 0.16$  times in total soluble solids), while polydextrose represent a greater mass loss.

Therefore, it is suggested the use of glycerol and sorbitol as solutes in the osmotic dehydration of yacon, producing a dehydrated food suitable for people who cannot consume sugars such as sucrose, glucose and fructose.

#### **ACKNOWLEDGMENT**

The authors acknowledge the financial support received from Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal para o Ensino Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) and the product donation from Corn Products do Brasil.

#### **REFERENCES**

AOAC. 1990, 2000, 2002. Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

AZUARA, E., FLORES, E. and BERISTAIN, C. I. 2009. Water diffusion and concentration profiles during osmodehydration and storage of apple tissue. *Food and Bioprocess Technology*, 2, 361–367.

CAMPOS, D., BETALLELUZ-PALLARDEL, I. CHIRINOS, R., AGUILAR-GALVEZ, A., NORATTO, G. and PEDRESCHI, R. 2012. Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. *Food Chem.* 135, 1592-1599.

CAZETTA, M. L., MARTINS, P. M. M., MONTI, R. and CONTIERO, J. 2005. Yacon (*Polymnia sanchifolia*) extract as a substrate to produce inulinase by *Kluyveromyces marxianus* var. *bulgaricus*. *J. Food Eng.* 66, 301-305.

CHUN, H.H., KIM, M.S., CHUNG, K.S., WON, M. and SONG, K.B. 2012. Dehydration of Blueberries Using Maltodextrin and the Physicochemical Properties of Dried Blueberries. *Hort. Environ. Biotechnol.* 53, 565-570.

CODEX Alimentarius. 2012. *FAO / WHO Food Standards*. GSFA Online. Available at: <<http://www.codexalimentarius.net/gsfaonline/index.html>> Access in: 25 aug. 2012.

DIONELLO, R.G., BERBERT, P.A., MOLINA, M.A.B., VIANA, A.P., CARLESSO, V.O. and QUEIROZ, V.A.V. 2007. Desidratação por imersão-impregnação de abacaxi em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27, 701-709.

EL-AOUAR, A.A., AZOUBEL, P.M., BARBOSA Jr, J.L. and MURR, F.E.X. 2006. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *J. Food Eng.* 75, 267–274.

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

GOTO, K., FUKAI, K., HIKIDA, J., NANJO, F. and HARA, Y. 1995. Isolation and Structural Analysis of Oligosaccharides from Yacon (*Polymnia sonchifolia*). *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 59, 2346-2347.

HABIB, N. C., HONORÉ, S.M., GENTA, S.B. and SÁNCHEZ, S.S. 2011. Hypolipidemic effect of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots on diabetic rats: Biochemical approach. *Chemico-Biological Interactions*, 194, 31-39.

HERMAN-LARA, E., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C.E., PACHECO-ANGULO, H., CARMONA-GARCÍA, R., RUIZ-ESPINOSA, H. and RUIZ-LÓPEZ, I.I. 2012. Mass transfer modeling of equilibrium and dynamic periods during osmotic dehydration of radish in NaCl solutions. *Food and Bioprocess Processing*. doi: 10.1016/j.fbp.2012.10.001.

JOKIĆ, A., ZAVARGO, Z., GYURA, J. and PRODANIC, B. 2008. Possibilities to control solid uptake during osmotic dehydration of sugar beet. In *Progress in Food Engineering Research*

and Development (Jerrod M. Cantor, ed.) pp. 243-261, Nova Science Publishers, Hauppauge, NY.

KHIN, M.M., ZHOU, W. and YEO, S.Y. 2007. Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes by using maltodextrin as the coating material and their textural properties. *J. Food Eng.* 81, 514–522.

KOTOVICZ, V., ELLENDERSEN, L.S.N, CLARINDO, M.M. and MASSON, M.L. 2013. Influence of Process Conditions on the Kinetics of the Osmotic Dehydration of Yacon (*Polymnia sonchifolia*) in Fructose Solution. *J. Food Process. Preserv.* doi:10.1111/jfpp.12064.

LAZARIDES, H. N. and MAVROUDIS, N. E. 1996. Kinetics of osmotic dehydration of a highly shrinking vegetable tissue in a salt-free medium. *J. Food Eng.* 30, 61–74.

MANRIQUE, I., PÁRRAGA, A. and HERMANN, M. 2005. *Jarabe de Yacon: Principios y Procesamiento*. Series: Conservación y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos andinos: Una década de investigación para el desarrollo (1993–2003). 8A. International Potato Center Universidad Nacional Alcides Carrión. Erbacher Foundation. Lima, Peru: Swiss Agency for Development and Cooperation, pp. 31.

MARCHAL, L. M., BEEFTINK, H. H. and TRAMPER, J. 1999. Towards a rational design of commercial maltodextrins. *Trends Food Sci. Tech.*, 10, 345-355.

MERCALI, G.D., MARCZAK, L.D.F., TESSARO, I.C. and NOREÑA, C.P.Z. 2011. Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, shum.). *Lebensm.-Wiss. Technol.* 44, 82-91.

MOREIRA, R., CHENLO, F., TORRES, M.D. and VÁZQUEZ, G. 2007. Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions. *Lebensm.-Wiss. Technol.* 40, 1507–1514.

OSORIO, C., FRANCO, M.S., CASTAÑO, M.P., GONZÁLEZ-MIRET, M.L., HEREDIA, F.J. and MORALES, A.L. 2007. Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8, 353–359.

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. *Lebensm.-Wiss. Technol.* 41, 2044-2050.

PHISUT, N. 2012. MiniReview: Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *Int. Food Res. J.*, 19, 7-18.

RAOULT-WACK, A. L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends Food Sci. Tech.*, 5, 255-260.

RASTOGI, N.K. and RAGHAVARAO, K.S.M.S. 1997. Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. *J. Food Eng.* 34, 429–440.

RIZZOLO, A., GERLI, F., PRINZIVALLI, C., BURATTI, S. and TORREGGIANI, D. 2007. Headspace volatile compounds during osmotic dehydration of strawberries (cv Camarosa): Influence of osmotic solution composition and processing time. *Lebensm.-Wiss. Technol.* 40, 529–535.

RÓZEK, A., ACHAERANDIO, I., GÜELL, C., LÓPEZ, F. and FERRANDO, M. 2009. Grape phenolic impregnation by osmotic treatment: Influence of osmotic agent on mass transfer and product characteristics. *J. Food Eng.* 94, 59-68.

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. *Int. J. Food Sci. Technol.* 44, 2169-2175.

SHI, J. and LE MAGUER, M. 2002. Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects. *Food Reviews International* 18, n. 4, 305–335.

TOGRUL, I. T. and ISPIR, A. 2008. Equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of apricot. *Food and Bioproducts Processing* 86, 254–267.

VILHENA, S.M.C., CÂMARA, F.L.A. and KAKIHARA, S.T. 2000. O cultivo de yacon no Brasil. *Hortic. Bras.* 18, 5-8.

## **Capítulo 5 - ARTIGO 2**

Título:

**Evaluation of water effective diffusivity during osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes**

Autores:

Bethania Brochier, Ligia Damasceno Ferreira Marczak e Caciano Pelayo Zapata Noreña.

Artigo submetido para revista internacional, formatado de acordo com as normas da mesma.

## Evaluation of water effective diffusivity during osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes

### ABSTRACT

Osmotic dehydration of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) was carried out varying temperature (30 and 50°C) and glycerol or sorbitol concentration (30, 50 and 70%). The solution of Fick's law for unsteady-state mass transfer in a plane sheet configuration was used to calculate the effective diffusivities of water. Peleg's model was used to predict the equilibrium condition, which was shown to be appropriate for water loss and solute uptake. It was found two rate periods of dehydration. For the above conditions of osmotic dehydration, the effective diffusivity of water was found to be in the range of  $5.21 \pm 1.12 \times 10^{-10}$  to  $2.60 \pm 1.02 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s in first period and  $9.64 \pm 0.31 \times 10^{-11}$  to  $3.72 \pm 1.49 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s in second period for glycerol tests and for sorbitol was  $13.01 \pm 0.70 \times 10^{-10}$  to  $8.12 \pm 0.18 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the first period and  $2.28 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  to  $2.14 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the second. The greatest reduction in water activity was achieved when 70% of glycerol was used at 50°C (final  $a_w$   $0.704 \pm 0.010$ ). The treatments with 70% of solution concentration at temperature of 30 °C were repeated adding 20 g/L of calcium lactate in the osmotic solution. The treatments with 70% of solution concentration at 30 °C were repeated adding 20 g/L of calcium lactate in the osmotic solution, it resulted in higher calcium content, strengthening the cell wall for both solutes.

**Keywords:** *osmotic dehydration, yacon, FOS, effective diffusivity, mass transfer*

### 1. Introduction

Yacon is a native root crop from the Andean region (South America) which interest has increased recently because it is a plant with the largest content of fructooligosaccharides (FOS). FOS are a type of sugar that has a lower caloric value than other sugar types (approximately 25 to 35% of the calories of normal carbohydrates). The consumption of FOS is also known to promote better health of the intestinal tract (Manrique et al., 2005). Due to its high amount of water, usually 86-90% of fresh weight of yacon (Goto et al., 1995; Habib, 2011), its shelf life under ambient conditions is approximately one week. In this context, it is important to apply some technique to increase its shelf life.

Osmotic dehydration (OD) is one alternative to reduce post-harvest losses and it is a common process for producing dried fruits, which can be directly consumed or used as an ingredient in cakes, pastries and many others (Mercali et al., 2011). OD is a dewatering process in which cellular materials (mostly fruits and vegetables) are immersed in a hypertonic solution, and water is removed from inside the cells by osmosis. The driving force for the diffusion of water from the plant tissue into the concentrated solution is provided by the high osmotic pressure of the solution. In addition to dewatering, solutes from the osmotic solution penetrate into the product, and plant solutes (organic acids and sugars) are removed, and considerable shrinkage occurs (Aguilera & Stanley, 1999; Rastogi & Raghavarao, 2004). The rate of diffusion of water from any material tissues depends upon factors such as: temperature and concentration of the osmotic solution, the size and geometry of the material, the solution to material mass ratio and the level of agitation of the solution. A number of recent publications have described the influence of these variables on mass transfer rates

during osmotic dehydration (Dionello et al., 2007; Mercali et al., 2011; Rastogi & Raghavarao, 2004; Shi & Le Maguer, 2002).

The osmotic agent must have high water solubility, low cost, positive effect on the sensory properties and must ensure the stability of the final product (Dionello et al., 2007). The most used solutes are sucrose (in fruits and vegetables) and sodium chloride (in meats, fishes and vegetables), but there are studies in the literature that use alternative osmotic agents. Researchers used sorbitol in the dehydration of apricots (Toğrul & İspir, 2008), strawberries (Rizzolo et al., 2007), and green pepper (Ozdemir et al. 2008), among other fruits and vegetables. Scientific works of OD with glycerol include chestnuts (Moreira et al. 2007), grapes (Rózek et al., 2009), Andes berries and tamarillos (Osorio et al., 2007).

Glycerol and sorbitol are classified as food additives by the Codex Alimentarius (2012). Glycerol is used to improve the texture of foods (plasticizer), as a thickener, and has the advantage of being a microbiological protectant (Moreira et al., 2007, Codex Alimentarius, 2012); its caloric value is 4.3 kcal/g and it is a byproduct of biodiesel production. So, its use in osmotic dehydration in industrial scale would be an alternative to decrease the surplus generated. Sorbitol is the polyol mostly found in nature and its main feature is the sweetening power (up to 70% of the sweetness of sucrose); it also has chemical, thermal and bacteriological stability. Sorbitol has low calorie, 2.4 kcal/g, is non-cariogenic and reduces water activity. According to Patel and Goyal (2012), sorbitol is also prebiotic, with proven health-promoting properties, for example, reduction of serum cholesterol.

The use of a ternary system (water / sugar / salt) in the osmotic dehydration of plants has been studied by some researchers and the results have shown higher rates of water loss by addition of salt, even in solutions with lower concentrations of solutes (Mercali et al., 2011). In the present work, aiming to maintain the healthy appeal of the product, calcium lactate was employed as a ternary agent instead of sodium chloride. Several studies have been conducted with dosages up to 2% calcium lactate (rated as a food additive by Codex Alimentarius, 2012), including: apples (Castelló et al., 2009), mangos (Torres et al., 2006) and cherry tomatoes (Heredia et al., 2007).

This work aims to study the osmotic dehydration of yacon, through the use of solutes that can be consumed by people with diabetes, keeping their prebiotic characteristics with low energy.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Osmotic dehydration

Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) roots were cultivated in the State of São Paulo, Brazil, and obtained in the Supply Centers of the State of Rio Grande do Sul (CEASA) in the city of Porto Alegre, RS, Brazil. They have been selected considering the absence of visual damage and were stored under refrigeration ( $8 \pm 2^\circ\text{C}$ ) until use, which was less than 24 hours from time of purchase.

The roots were washed and cut into discs of  $5 \pm 0.05$  cm in diameter and  $0.5 \pm 0.01$  cm thick (*diameter/thickness* >10, characterizing a plane sheet) and weighted. Steam blanching ( $100^\circ\text{C}$ ) was carried out for 4 min, followed by cooling in an ice bath for 3 min, according to the best condition found by Fante et al. (2013), aiming for FOS preservation. After cooling, the discs were dried on paper towels and weighed.

Osmotic solutions were prepared with distilled water, glycerol and sorbitol, according to the experimental design depicted in Table 1. Osmotic dehydration was carried out in an acrylic tank with a coil connected to a thermostatic bath to maintain a constant temperature. A sample-to-solution ratio of 1:20 (w/w, according to Heredia et al., 2007 and Rastogi & Raghavarao, 1997) was kept in order to guarantee that the concentration of the osmotic media

could always be considered constant. The osmotic medium was agitated continuously with a mechanical agitator (Fisatom, model 713, São Paulo / SP, Brazil) at 1000 rpm to ensure the specified concentration on the surface of the yacon discs.

The osmotic dehydration process was performed in a period of 6 h under constant conditions of temperature and agitation. Samples were withdrawn from the osmotic solution at determined intervals of time, drained and dried with filter paper to remove adhering solution. All the tests were carried out in duplicate and solutions were used twice (only for the same duplicate).

**Table 1**  
Experimental design for glycerol and sorbitol solutions for OD tests

Treat.	T (°C)	Solute Concentration (%)
1	30	30
2	50	30
3	30	50
4	50	50
5	30	70
6	50	70

The conditions of the 5<sup>th</sup> treatment were repeated including 20 g/L of calcium lactate to the osmotic solution. These last experiments were carried out in duplicate and fresh solutions were used.

## 2.2 Analytical determinations

The analytical determinations were made for fresh and osmotically treated samples. The moisture was measured according to 930.04 AOAC method (1990); soluble solids were measured with a bench type refractometer (model 32-G, Carl Zeiss) by the AOAC 932.12 method (2002) and water activity was directly measured at 25 °C in a thermoconstanter electric hygrometer, LabMaster-aw device (Novasina, Switzerland) by the AOAC 978.18 method (1990). Calcium was analyzed in fresh, blanched and treated with 20 g/L calcium lactate samples. The determinations were carried out using atomic absorption spectrometer with flame with the introduction of a sample solution using pneumatic nebulization, following an adaptation of the AOAC method 975.03 (2006). All analyses were performed in triplicate.

The mass loss (ML) was calculated according to Equation 1.

$$ML (\%) = \frac{(m_0 - m_t)}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

where  $m_0$  and  $m_t$  are the masses of the samples at baseline and at time "t", respectively.

Scanning Electronic Microscopy (SEM) was applied to the fresh, blanched and osmotic dehydrated yacon samples. Approximately 10 mg of the sample was placed on a double-faced adhesive tape fixed to a stub following an adaptation of the method used by Pan et al. (2008). The scanning electronic microscope (Hitachi TM3000) was operated at Analy mode (greater electron emission). The images of the samples were obtained at  $\times 200$ .

## 2.3 Kinetic model



The estimation of moisture content when the equilibrium conditions were achieved was made by using Peleg's (1988) model, shown in Equation (2):

$$X_t - X_0 = -\frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (2)$$

where  $X_t$  and  $X_0$  are the moisture content of a sample at dehydration time “ $t$ ” and at the beginning, respectively;  $k_1$  and  $k_2$  are the model parameters.

The constant  $k_2$  is related to water concentration at equilibrium conditions, according to Equation (3):

$$X_\infty = X_0 - \frac{1}{k_2} \quad (3)$$

where  $X_\infty$  is the moisture content at equilibrium; this value is necessary to calculate the effective mass diffusivity.

The used model, based on Fick's unsteady-state law of diffusion, determines the amount of water leaving the yacon discs as a function of time. The solution is valid for the following initial and boundary conditions:

$$\begin{aligned} t = 0, -L < x < L, X &= X_0; \\ t > 0, x = 0, dX/dx &= 0; \\ t > 0, x = L, X &= X_s. \end{aligned}$$

where  $x$  (m) is the characteristic dimension of the material (half plate thickness) and  $t$  (s) is the immersion time.  $X_0$  represents the initial moisture content and when  $t > 0$ , on the surface of the sheet ( $x = L$ ), there is a condition of specified concentration,  $X_s$ . This condition is achieved due to the high convective mass transfer coefficient ( $k_c \rightarrow \infty$ ) obtained through the maintenance of a constant and intense agitation; the problem is symmetrical considering the central plane of the sheet.

The following assumptions were used in the development of the model: samples of yacon are plane sheets (diameter 10 times greater than thickness); initial water concentration in the yacon is uniform; the process is isothermal; there is only the exit of water from yacon to solution (other mass transfers in this direction do not occur); shrinkage is neglected; external resistance to mass transfer is negligible.

According to Crank (1975), the dimensionless moisture content obtained by the solution of Fick's Second Law for diffusion in a plane sheet, assuming uniform initial distribution and a specified surface concentration as a function of time ( $t$ ) is given by Equation (4):

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{X_t - X_0}{X_\infty - X_0} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\{-Fo(2n+1)^2 \pi^2 / 4\} \quad (4)$$

where  $M_t/M_\infty$  denotes the dimensionless values of water loss;  $M_t$  denotes the total amount of diffusing water which has left the sheet at time  $t$ ;  $M_\infty$  the corresponding amount of water after infinite time; and  $Fo$  is the Fourier Number for diffusion, defined as:

$$Fo = \frac{D_e t}{L^2} \quad (5)$$

where  $D_e$  (m<sup>2</sup>/s) is the effective mass diffusivity. Equation 4 is the result of the integration of the solution over axial distance, from  $-L$  to  $+L$  (the thickness of the sheet is  $2L$ ).

Values of the Fourier number ( $Fo$ ) were obtained by non-linear regression analysis from Equation (4), taking into account the first four terms of the series according to Rastogi and Raghavarao (1997) and to Mercali et al. (2011). The Fourier numbers were plotted against the immersion time (by Excel *Solver* 2007 version program, according to Equation (5)) and the effective mass diffusivity values were taken from the slopes of these plots (Rastogi & Raghavarao, 1997). For regression analysis and estimation of effective diffusivity, 2007 version Excel was used.

#### 2.4 Statistical analysis

ANOVA was used for the statistical analyses and the treatments compared by way of Tukey's means multiple comparison test. The SAS 9.3 program was used for the statistical tests.

### 3. Results and discussion

#### 3.1 Characterization

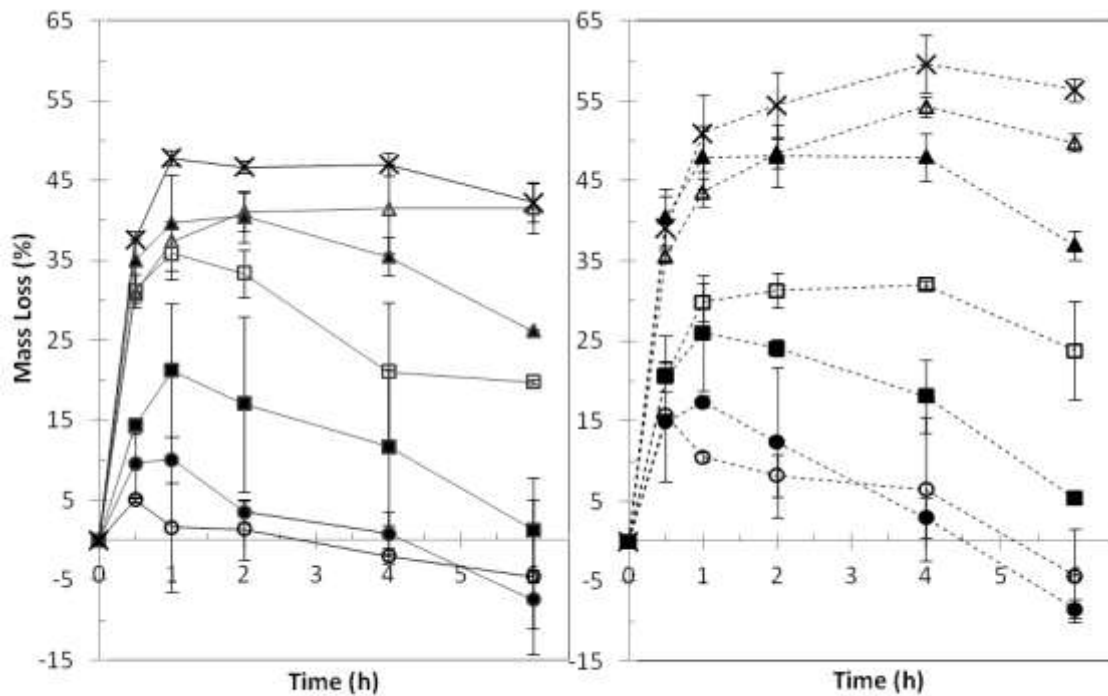
Samples of fresh yacon used in the experiments had a moisture content of  $88.16 \pm 1.60\%$ , values according to Manrique et al. (2005) who reported that about 85 to 90% of the fresh weight of yacon consists of water and to Scher et al. (2009) who found moisture of  $88.69 \pm 0.10\%$ . The water activity of the fresh yacon was high, showing values of  $0.977 \pm 0.003$ , typical of fresh products but lower than the values found by Scher et al. (2009) of  $0.994 \pm 0.001$ , and by Michels (2005) of 0.991.

The soluble solids of fresh yacon were  $11.6 \pm 1.1^\circ\text{Brix}$  which is in agreement with the values reported by Manrique et al. (2005) from 8 to  $12^\circ\text{Brix}$ . The fresh samples showed  $81.31 \pm 5.12$  mg calcium/100 g of dry matter (d.m.) of yacon, result in accordance with values reported by Ojansivu, Ferreira and Salminen (2011).

#### 3.2 Mass loss

Figure 1 shows the mass loss over the yacon OD time for both solutes. It was possible to verify the initial increase of mass loss (%) of the samples over time for soaking solutions of glycerol and sorbitol, in the process of osmotic dehydration of yacon. Mass losses were higher in the first hour, due to the greater concentration gradient between the osmotic solution and yacon in the beginning of the OD process. According to Raoult-Wack (1994), under typical conditions used for dehydrating fruits and vegetables at atmospheric pressure, the mass transfer occurs significantly only during the first two hours of process. Then, mass transfer rates become progressively slower until water loss stops, whereas solute gain continues to increase steadily.

The mass loss curves behavior was similar to that found by Moreira et al. (2007) using glycerol solutions in OD of chestnuts. After 1 hour of the osmodehydration process, the mass loss rate of yacon treated with glycerol solution decreased due to lower water removal in relation to the solute uptake. The mass loss rate of yacon treated with sorbitol solution decrease after 2 hours of process. According to El-Aouar et al. (2006), the water loss is usually attributed to the influence of natural tissue membranes as well as the diffusive properties of water and solutes, as a function of their respective molar masses (MM). In this case, sorbitol (MM = 182.17 kg/kmol) has lower permeability in the food matrix than glycerol (MM = 92.09 kg/kmol).



**Fig. 1.** Mass Loss (%) of yacon in glycerol (—) and sorbitol (---) solutions over osmotic dehydration time. ○ 30% 30°C, ● 30% 50°C, □ 50% 30°C, ■ 50% 50°C, △70% 30°C, ▲70% 50°C, × Ca 70% 30°C.

Basically three periods of mass loss rate were identified for both solutes. Initially, a quick mass loss, caused by the major water removal rates of the food, based on the difference in osmotic pressure between the solution and yacon; in the sequence, there is a constant period or at a lower rate (mostly seen in treatments with more severe conditions), where the water removal rates may be equivalent to the input of solute rates; and, finally, an inversion of the slope relative to the first time, because there is a mass gain associated with the higher rate of solid gain in relation to the countercurrent water from yacon. According to Toğrul and İspir (2008), in the dynamic period, the mass transfer rates are increased or decreased until equilibrium is reached. Equilibrium is the end of osmotic process, i.e., the net rate of mass transport is zero. However, equilibrium state was not achieved in this study as well as in the work of Mercali et al. (2010) in which the authors studied the mass transfer during five hours of osmotic dehydration of blueberry with sucrose solutions.

For both solutes, Figure 1 also shows higher rates as the osmotic solutions concentration increases; the treatment with calcium lactate (symbol ×) showed no difference among the test with the same conditions without the salt. Table 2 shows the ANOVA for osmodehydrated yacon mass loss. ANOVA showed that concentration and temperature and their interaction had significant effect ( $p < 0.05$ ) on the mass loss during osmotic dehydration.

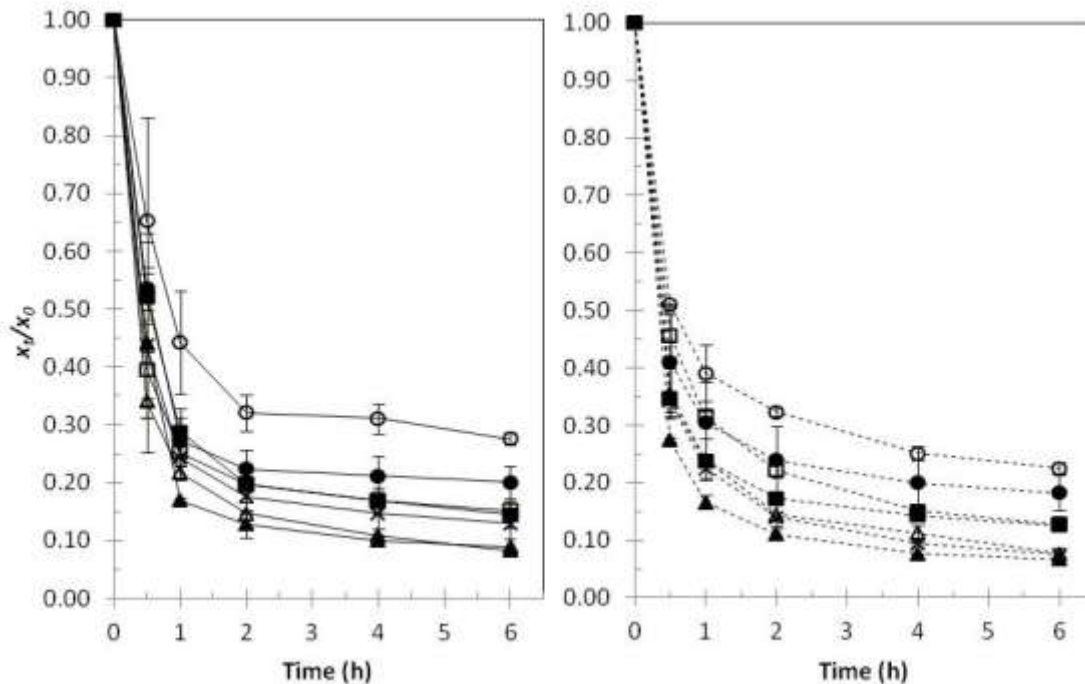
**Table 2**  
Mass loss (%) ANOVA caused by factors

Solute	Source	DF	SS	MS	F value	<i>p</i>
Glycerol	<i>T</i>	1	0.03876042	0.03876042	15.05	0.0005*
	<i>C</i>	2	1.23649320	0.61824660	239.98	<0.0001*
	<i>T*C</i>	2	0.08536693	0.04268347	16.57	<0.0001*
Sorbitol	<i>T</i>	1	0.01754460	0.01754460	10.78	0.0026*
	<i>C</i>	2	1.43736750	0.71868375	441.52	<0.0001*
	<i>T*C</i>	2	0.02258830	0.01129415	6.94	0.0033*

\*Significant at 95% of confidence level.

### 3.3 Moisture content

Figure 2 shows the values of the dry basis (db) moisture content normalized with the initial content  $X_0$  ( $X_t/X_0$ ) versus osmotic dehydration process time. It is possible to observe that the moisture of the samples decreased along the osmotic process for both solutes (final  $X_t/X_0$  values varied from  $0.276 \pm 0.010$  until  $0.082 \pm 0.013$  to glycerol and from  $0.225 \pm 0.010$  until  $0.067 \pm 0.003$  to sorbitol).



**Fig. 2.** Moisture content variation (dimensionless) in dry basis over immersion time using glycerol (—) and sorbitol (---) solutions in osmotic dehydration of yacon.  
○ 30% 30°C, ● 30% 50°C, □ 50% 30°C, ■ 50% 50°C, △ 70% 30°C, ▲ 70% 50°C, × Ca 70% 30°C.

Except for process carried out at 30% of glycerol solution at 30 °C, treatments showed no difference among them after 2 hours of the process. This indicates that it is not necessary to increase the temperature from 30 to 50°C when the concentrations of osmotic agent are

higher than 50% according to Tukey test ( $p > 0.05$ ). Temperature and concentration of sorbitol solution had significant effect on the moisture responses ( $p < 0.05$ ). For glycerol solution, only concentration and the interaction between concentration and temperature showed significant changes ( $p < 0.05$ ) on moisture contents. Table 3 shows the ANOVA for osmodehydrated yacon moisture content.

**Table 3**  
ANOVA of the moisture content variation caused by factors

Solute	Source	DF	SS	MS	F value	p
Glycerol	T	1	0.00922560	0.00922560	2.62	0.1162
	C	2	0.26735643	0.13367822	37.92	<0.0001*
	T*C	2	0.05799430	0.02899715	8.23	0.0014*
Sorbitol	T	1	0.04777082	0.04777082	49.67	<0.0001*
	C	2	0.19910290	0.09955145	103.50	<0.0001*
	T*C	2	0.00201803	0.00100902	1.05	0.3628

\*Significant at 95% of confidence level.

The increase in the concentration of osmotic solution enhanced the dehydration, by increasing the osmotic pressure of surrounding solution which, in turn, became higher than the osmotic pressure of cellular solution. The same behavior was achieved by Bellary et al. (2011) with coconut slices, Mercali et al. (2011) studying OD of bananas and El-Aouar et al. (2006) with papaya slices.

Concerning the use of calcium lactate, it is possible to see in Figure 2 that the results were not significantly different from the treatment without this salt (symbols  $\times$  and  $\Delta$ ) for the first two hours; after four hours it is observed that the addition of salt as a ternary agent decreased the dehydration. The results of the mass transfer kinetics indicated that the addition of calcium decreased water loss. The same was observed by Castelló et al. (2009) in osmotic dehydration of apple slices in a 50 °Brix glucose solution at 30 °C with 0, 1, and 2% (m / m) calcium lactate. The researchers observed that, with the addition of calcium, more time was needed to reach the same level of dehydration; calcium interactions in the tissue cause a reduction of the effective mass diffusivity of water. This is also reported by other authors (Barrera *et al.*, 2004 and Vieira, 2010). This reduction can be explained not only by the calcium cross-linking effects in the cellular matrix, which affects the water permeability of the cell structures (Azcón-Bieto & Talón, 2000), but also by the ion influence on the active water transport through the cell membrane (Johansson et al., 1996; Tyerman et al., 1999).

In general, after 4 hours of osmotic dehydration with both osmotic agents there was no significant change in the amount of water removed ( $p > 0.05$ ), so OD time could be reduced. This behavior indicates that these solutes are around the equilibrium conditions since the moisture content was found to be fairly constant in the final times of OD; this is in agreement with Moreira et al. (2007) who found that water loss rate is high at the beginning and start decreasing as time passes when the system is approaching the pseudoequilibrium condition. Moisture contents at equilibrium conditions were determined using Peleg's Equations (1988) and are given in Table 4. Peleg's equation proved to be suitable for modeling water removal, as the determination coefficients were above 0.99 for all treatments.

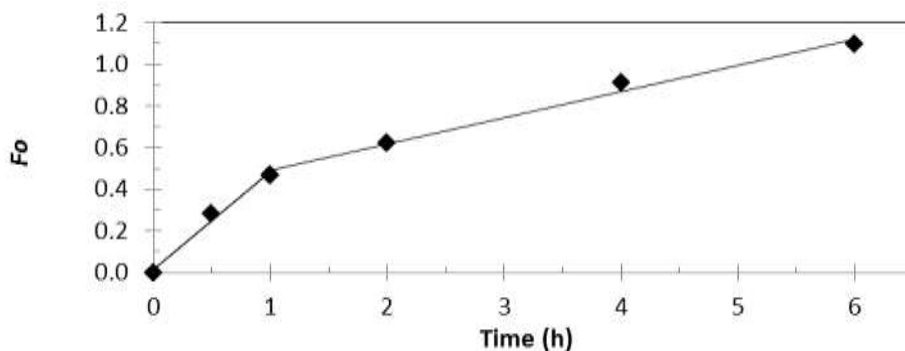
**Table 4** - Experimental data fitted to Peleg's Equation and effective diffusivities of water ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) during yacon OD.

Treat.	$X_w$ (% db)	$R^2$	$D_e(1) \times 10^{10}$	$R^2$	$D_e(2) \times 10^{11}$	$R^2$
<b>Glycerol</b>						
30% 30°C	$2.028 \pm 0.60^a$	0.997	$2.60 \pm 1.02^b$	0.990	$4.18 \pm 1.64^a$	0.876
30% 50°C	$1.674 \pm 0.18^{ab}$	0.998	$3.54 \pm 0.04^{ab}$	0.920	$3.72 \pm 1.49^a$	0.998
50% 30°C	$1.333 \pm 0.07^{abc}$	0.999	$4.78 \pm 0.30^{ab}$	0.994	$8.85 \pm 1.00^a$	0.969
50% 50°C	$0.886 \pm 0.07^{abc}$	0.999	$3.65 \pm 0.62^{ab}$	0.991	$7.39 \pm 0.84^a$	0.919
70% 30°C	$0.471 \pm 0.05^c$	0.999	$4.22 \pm 0.09^{ab}$	0.974	$9.64 \pm 0.31^a$	0.982
70% 50°C	$0.338 \pm 0.39^c$	0.999	$5.21 \pm 1.12^a$	0.974	$6.70 \pm 2.97^a$	0.986
Ca 70% 30°C	$0.817 \pm 0.18^{bc}$	0.999	$4.37 \pm 0.30^{ab}$	0.999	$8.07 \pm 1.50^a$	0.943
<b>Sorbitol</b>						
30% 30°C	$1.693 \pm 0.02^a$	0.999	$8.27 \pm 1.50^a$	0.984	$21.87 \pm 0.91^a$	0.989
30% 50°C	$1.628 \pm 0.12^a$	0.999	$10.95 \pm 2.60^a$	0.968	$22.21 \pm 0.46^a$	0.968
50% 30°C	$0.683 \pm 0.01^b$	0.999	$8.12 \pm 0.18^a$	0.986	$21.39 \pm 1.00^a$	0.967
50% 50°C	$0.827 \pm 0.03^b$	0.999	$12.16 \pm 0.32^a$	0.964	$22.58 \pm 0.26^a$	0.962
70% 30°C	$0.417 \pm 0.01^c$	0.999	$9.76 \pm 1.25^a$	0.963	$22.77 \pm 0.52^a$	0.959
70% 50°C	$0.389 \pm 0.02^c$	0.999	$13.01 \pm 0.70^a$	0.967	$22.31 \pm 0.58^a$	0.944
Ca 70% 30°C	$0.418 \pm 0.03^c$	0.999	$10.21 \pm 0.53^a$	0.966	$22.35 \pm 0.80^a$	0.957

Means followed by the same letter in the same solute column are not significantly different.

### 3.4 Effective mass diffusivities of water

The methodology used by Rastogi and Raghavarao (1997) and Mercali et al. (2011) to determine the effective mass diffusivity was used in the present work. The plot of Fourier numbers against immersion time for water loss, showed two different periods of dehydration; so, there are two linear curves and two effective mass diffusivities of water. As an example for this behavior Figure 3 shows  $Fo$  plotted against time for the treatment carried out with 30% of sorbitol concentration at 30°C.



**Fig. 3.** Plot of Fourier number against yacon immersion time for OD carried out with 30% sorbitol at 30°C

In conventional materials, it is generally assumed that diffusion occurs at a constant rate under the influence of a uniform moisture gradient. Nevertheless, this does not appear to be true in biological materials, especially after the initial stages of the process, as the physical structure of the material begins to change as the osmotic dehydration continues. A non-uniform moisture gradient is developed over the course of osmotic treatment and the effective mass diffusivity changes with position and time of dehydration. As can be seen in Figure 2, the slopes of the curves are greater in the beginning of the dehydration process showing faster

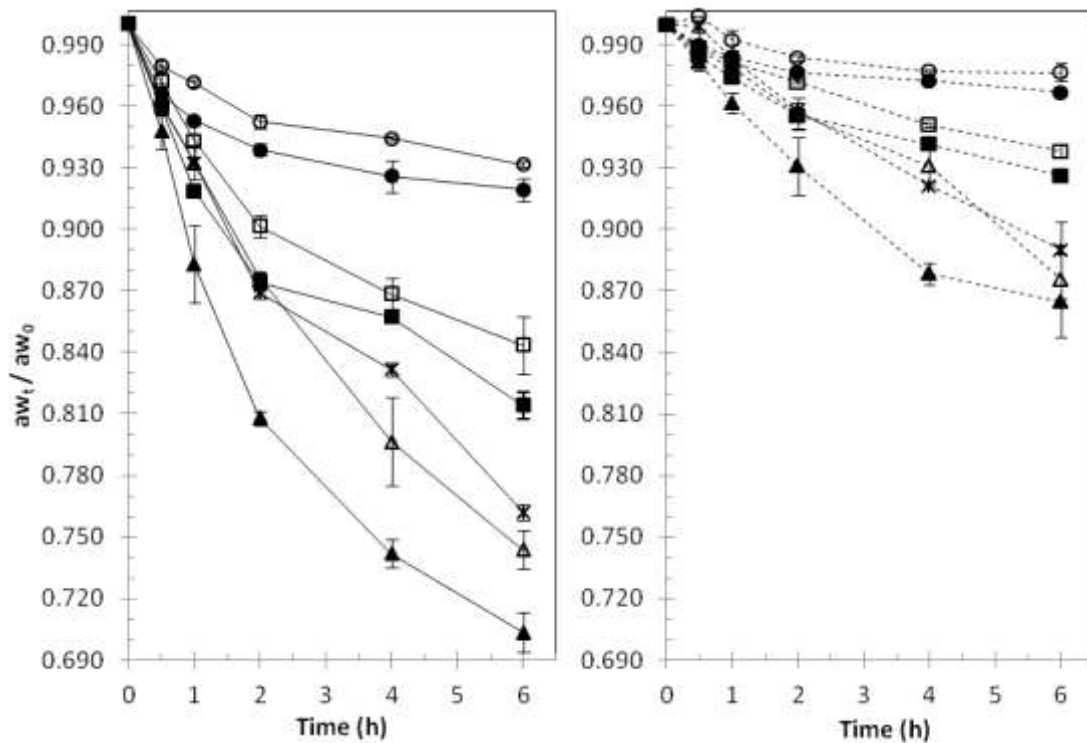
dehydration and thus higher effective mass diffusivity of water. In fruits, the mass diffusivity generally shows a decreasing trend over time because of the shrinkage phenomenon. Fruits with a preserved cell structure are more susceptible to shrinkage due to the occurrence of plasmolysis upon osmodehydration (Mercali et al., 2011; Rastogi, Angersbach & Knorr, 2000).

Table 4 also shows the results for effective mass diffusivity of water. It can be seen that the values are in the range of  $5.21 \pm 1.12 \times 10^{-10}$  to  $2.60 \pm 1.02 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s in the first period and  $9.64 \pm 0.31 \times 10^{-11}$  to  $3.72 \pm 1.49 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s in the second period using glycerol as solute. In both periods, the values were lower in the concentration of 30% and higher at a concentration of 70% because of the higher osmotic pressure performed by the increased concentration. When sorbitol was used, the mass diffusivity in the first period varied from  $13.01 \pm 0.70 \times 10^{-10}$  to  $8.12 \pm 0.18 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s and in the second period from  $2.28 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  to  $2.14 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. One possible explanation for these values is that glycerol has a high ability to bind with water, thus reducing the effective diffusivity of water when this solute was used, since less water is available to migrate. Moreover, since sorbitol has higher molar mass than glycerol it is expected a greater cell collapse of the yacon tissue. Note that the results were not significantly different for sorbitol treatments. The mass diffusivity values were higher than those found by Maldonado et al. (2008) of  $3.20 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s at first period and  $1.84 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s at the second period when yacon was osmotically dehydrated at 25°C and 40% of sucrose concentration. These differences can be explained by the use of different solutes (smaller molecules diffuse more easily than larger ones), temperatures (the mass transfer tends to be higher at higher temperatures) and yacon cultivar and maturation degree (changes regarding to the matrix of root).

These results are in agreement with fundamental theories which state that mass diffusivity strongly depends on the temperature, pressure, and on the components involved. High temperatures cause an increase in membrane permeability (which promotes swelling and plasticization of the cell membranes) and a reduction in the solution viscosity, reducing external resistance to mass transfer. These both phenomena make water and solute transport easier. However, temperatures above 60°C reduce the final product quality, changing the structure of cell membranes, resulting in loss of selectivity and leading to greater solute incorporation into the fruit. In addition, high temperatures may induce significant changes in texture and nutritional composition of the food as, among others, a consequence of the losses of nutrients to osmotic solution (Mercali et al., 2011; Torregiani, 1993).

### 3.5 Water activity

Water activity ( $a_w$ ) is intrinsically related to the preservation of food and, according to Moraga et al. (2011), in the range of high water activity, a small decrease of  $a_w$  implies an important decrease in the relative rate of all deteriorative reactions and microbial growth. Figure 4 shows the water activity plotted against osmotic dehydration process time. As can be seen, the  $a_{w(t)}/a_{w(0)}$  values decreased with time, and with higher temperature and osmotic solution concentration due to greater water removal and solute incorporation during the dehydration process. Best isolated results ( $0.704 \pm 0.010$ ) were achieved by glycerol treatment using 70% solute concentration at 50°C. The greatest reduction of water activity when glycerol was used supports the idea that water was connected to glycerol decreasing the yacon free water. According to Toledo (2007), reducing  $a_w$  below 0.7 would prevent microbiological spoilage. In the same conditions of the best glycerol result, sorbitol treated samples presented  $0.865 \pm 0.002$ , which in agreement with Aguilera and Stanley (1999) is in lower limit for growth of pathogenic bacteria (0.91) and yeasts ( $\approx 0.87$ ).



**Fig. 4.** Variation of water activity (dimensionless) with the immersion time using glycerol (—) and sorbitol (---) solutions in osmotic dehydration of yacon. ○ 30% 30°C, ● 30% 50°C, □ 50% 30°C, ■ 50% 50°C, △ 70% 30°C, ▲ 70% 50°C, × Ca 70% 30°C.

Table 5 shows the ANOVA for osmodehydrated yacon water activity reduction. As can be seen, the response was depended on the concentration and temperature of the osmotic solution, in addition to combined effect of these parameters for both solutes ( $p < 0.05$ ).

**Table 5** –ANOVA of water activity reduction caused by factors

Solute	Source	DF	SS	MS	F value	<i>p</i>
Glycerol	<i>T</i>	1	0.01107042	0.01107042	185.59	<0.0001*
	<i>C</i>	2	0.11851630	0.05925815	993.43	<0.0001*
	<i>T*C</i>	2	0.00246083	0.00123042	20.63	<0.0001*
Sorbitol	<i>T</i>	1	0.00284282	0.00284282	61.33	<0.0001*
	<i>C</i>	2	0.02277363	0.01138682	245.67	<0.0001*
	<i>T*C</i>	2	0.00056323	0.00028162	6.08	0.0061*

\*Significant at 95% of confidence level.

The use of calcium lactate did not improve  $a_w$  results. Similar behavior was observed by Vieira (2010) using 0.6 and 1.2% of calcium lactate in sucrose solutions in the osmotic dehydration of guava slices, once the salt inclusion reduced the water loss of the fruits. This shows that the salt did not improve the mass transfer during the OD process although it may have improved the tissue structure. This result can be explained in terms of the ability of calcium to increase the stiffness and fragility of the cellular network (Gras et al., 2003), thus



reducing the ability of the cells to deform and relax. This will also reduce the flux of water and soluble solids initiated by the deformation–relaxation phenomena (Barrera et al. 2009).

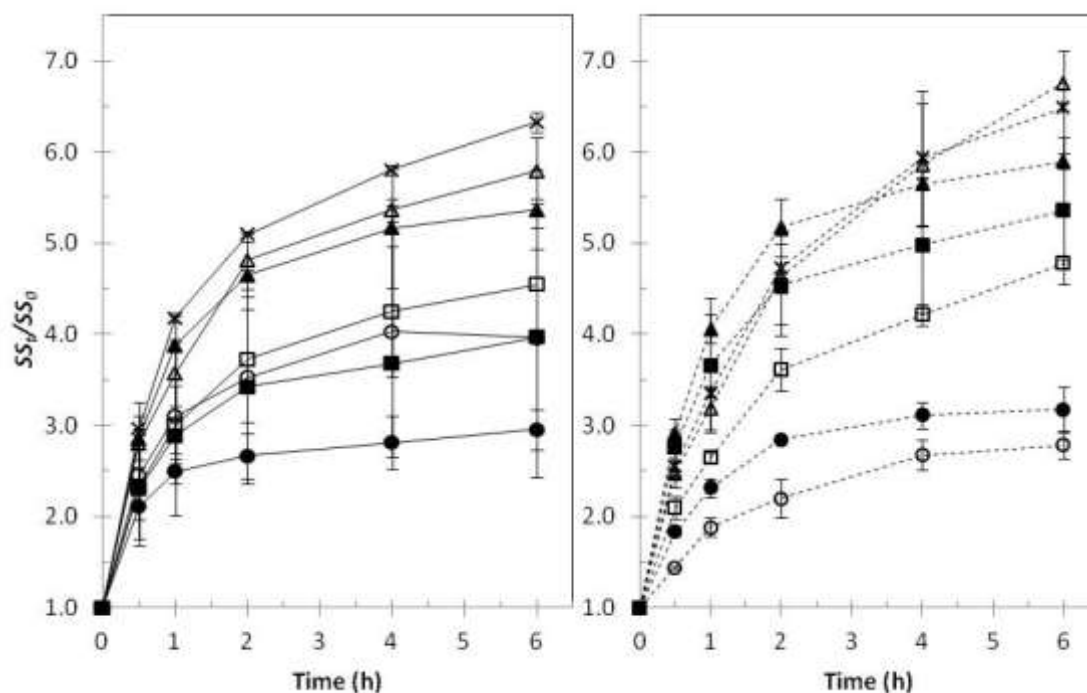
Kotovicz et al. (2013) studied OD of coated with an edible sodium alginate and uncoated yacon in fructose solution. They observed water activity reduction more significant in uncoated sample and at the higher osmotic solution concentration. According to Lenart (1996), water activity of osmotically dehydrated fruits and vegetables, in laboratory scale or in industrial conditions, is close to 0.90, which is the reason of such products require a subsequent process as freezing, freeze drying, vacuum drying or air drying. The water activity level presented by the material after dehydration, if combined with other preservation techniques such as the use of chemical preservatives, pH reduction and/or further drying, could promote greater product stability (Fennema, 2010).

### 3.6 Soluble solids

At the end of 6 hours of immersion, the samples treated with 70% polyol solution at 50°C presented final soluble solids (SS) of  $53.1 \pm 0.78$  °Brix for glycerol and  $60.9 \pm 0.07$  °Brix for sorbitol, higher values can be attributed to sorbitol solution due to this initial soluble solids of 65.8 °Brix against 56.3 °Brix of glycerol solution. Figure 5 shows yacon samples SS variation over time of OD process. As expected, the SS content increased with solution concentration and operation time for all experiments. The greater glycerol increase ( $SS/SS_0$ ) was for the 70% solution at 30°C treatment showing increase of  $5.79 \pm 0.36$  relative to the initial sample; when calcium lactate was used values grown to  $6.33 \pm 0.11$ . The yacon treated with 70% sorbitol at 30°C had the highest increases in soluble solids ( $SS/SS_0 = 6.76 \pm 0.38$  without calcium and decreased to  $6.49 \pm 0.63$  when calcium lactate was used). Dionello et al. (2007) observed an increase of 3-4 times compared to the initial content of total soluble solids in the osmotic dehydration of pineapple in 0.40 to 0.47 g/mL invert sugar and sucrose solutions at 40 and 50°C.

One possible source of error in these results was the fact that the osmotic solution was reused for the duplicate of each experiment. As known, besides water, soluble solids of yacon can migrate for the osmotic solution, interfering with the result.

Table 6 shows the ANOVA for osmodehydrated yacon soluble solids variation. Concentration and temperature of the osmotic solution showed significant effect ( $p < 0.05$ ) on the soluble solids increase. Only for the glycerol solution the interaction terms of the process parameters had negligible effects on soluble solids gain ( $p > 0.05$ ), compared to the linear terms of process variables.



**Fig. 5.** Variation of soluble solids (dimensionless) with the immersion time using glycerol (—) and sorbitol (---) solutions in osmotic dehydration of yacon. ○ 30% 30°C, ● 30% 50°C, □ 50% 30°C, ■ 50% 50°C, △70% 30°C, ▲ 70% 50°C, × Ca 70% 30°C.

**Table 6**  
ANOVA of soluble solids variation caused by factors

Solute	Source	DF	SS	MS	F value	<i>p</i>
Glycerol	<i>T</i>	1	2.85623802	2.85623802	7.67	0.0095*
	<i>C</i>	2	21.68850063	10.84425032	29.12	<0.0001*
	<i>T*C</i>	2	1.30654543	0.65327272	1.75	0.1903
Sorbitol	<i>T</i>	1	3.29707042	3.29707042	28.17	<0.0001*
	<i>C</i>	2	51.27153010	25.63576505	219.02	<0.0001*
	<i>T*C</i>	2	1.00889463	0.50444732	4.31	0.0226*

\*Significant at 95% of confidence level.

### 3.7 Calcium content

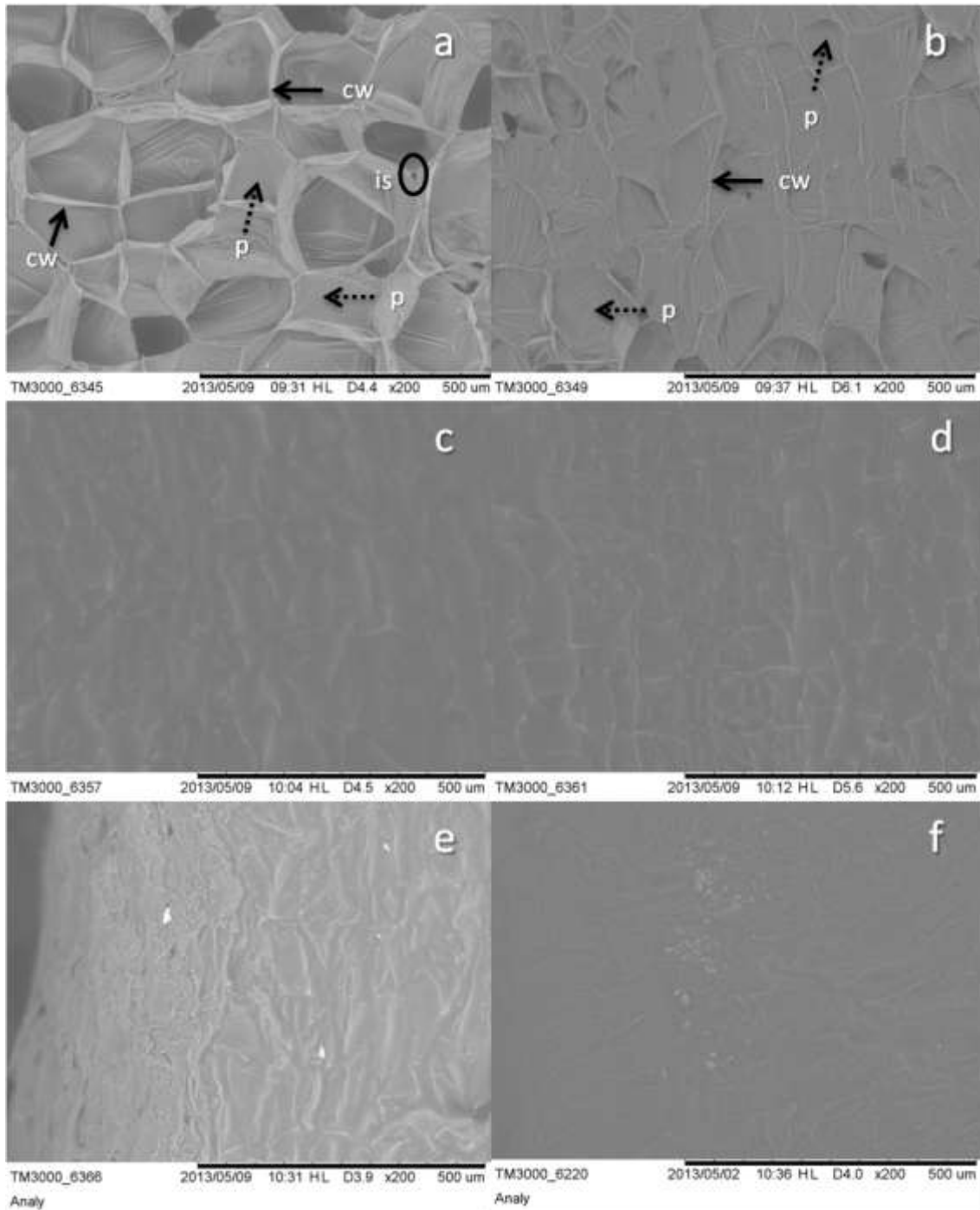
It has been found that the addition of calcium lactate to the osmotic solution caused the incorporation of  $\text{Ca}^{2+}$  in the treated samples, resulting in a statistically significant increase ( $p < 0.05$ ) in the calcium content in samples from all treatments in which the salt was used, reaching values about 6.5 times higher than that of the fresh root. Analyzing separately the osmodehydrated samples, it was found that the sample treated with glycerol showed higher increase of calcium ( $514.63 \pm 75.79$  mg calcium / 100 g d.m. of yacon) when compared with the treated with sorbitol ( $395.57 \pm 28.74$  mg calcium / 100 g d.m. of yacon) ( $p < 0.05$ ).

### 3.8 Scanning Electronic Microscopy

The scanning electron microscopy technique was used to observe the changes in the structure of the samples after the osmotic treatment. Figure 6a shows the image of yacon fresh tissue, where there is the presence of elongated and polyhedral turgid cells, as defined cell wall (very clear due to the cut made in the sample of yacon, indicated by continuous arrows), and the presence of intercellular spaces (circled). The plasmalemma (indicated by dashed arrows) appears associated to the cell wall. Plasmalemma could be differentiated in some cells where the cell wall was detached during the cut of the sample. After blanching (Fig 6b), is possible to see loss of turgor and partial loss of the polyhedral shape due to the reduction of cell size. According to Aguilera and Stanley (1999), turgor is lost when fruits or vegetables are deprived of water or when they cease to respire. The application of blanching obviously damaged the cell wall structure, leaving the cells more permeable. This effect was responsible for the subsequent reduction in water content. Rastogi and Niranjana (1998) observed the same behavior when they pre-treated pineapple at high pressure to osmotic dehydration.

Figures 6c and 6d are very similar, once they show the osmotic solutions filling the yacon matrix. It was found that the osmotic treatment, both with glycerol and with sorbitol, without addition of calcium resulted in heavy damage to the cell structure of yacon. The tissue showed strong plasmolysis caused by the loss of water from the cytoplasm beyond deformed and collapsed cells, the nonturgid aspect of the cells was clearly observed. A qualitative relationship could clearly be established between the concentration profiles and the degree of cellular disturbance in osmosed tissue. Micrographs of osmosed yacon tissue (Fig. 6c and 6d), showed clearly different degrees of cellular alteration and collapse (Salvatori et al., 1998). A similar result was observed by Vieira (2010) who found a severe structural damage caused by osmotic dehydration with sucrose solutions in guavas. The author observed an intense cell plasmolysis, and large cell collapse.

In figures 6e and 6f it is possible to observe calcium lactate adhered to the surface of tissue, being more evident the presence of salt in the sample treated with glycerol, which can be checked small and large particles of calcium lactate (white dots). The addition of calcium lactate to osmotic solutions improved the preservation of cell structure, strengthening the cell wall for both solutes compared to figures 6c and 6d that don't have additional protection on tissue. The beneficial effect of the addition of calcium salts against damage caused by osmotic dehydration of the cell structure was also observed with guavas in the work of Vieira (2010).



**Fig. 6.** Yacon SEM images (a) Fresh. (b) Blanched. (c) Osmodehydrated by 70% glycerol solution at 50C. (d) Osmodehydrated by 70% sorbitol solution at 50C. (e) Tissue with calcium lactate from treatment with glycerol. (f) Tissue with calcium lactate from treatment with sorbitol. cw: cell wall, is: intercellular space, p: plasmalemma.

#### 4. Conclusions

The present work studied the osmotic dehydration of yacon in solutions of glycerol and sorbitol at different concentrations and temperatures. Both concentration and temperature showed significant effect on the mass loss, on moisture and water activity reduction and on the soluble solids increase of the yacon samples.

Peleg's model was shown to be appropriate to predict the equilibrium condition. The water diffusion showed two periods among the immersion time. The effective diffusivity of water was found to be in the range of  $5.21 \pm 1.12 \times 10^{-10}$  to  $2.60 \pm 1.02 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s in first period and  $9.64 \pm 0.31 \times 10^{-11}$  to  $3.72 \pm 1.49 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s in second period for glycerol tests and for sorbitol varied from  $13.01 \pm 0.70 \times 10^{-10}$  to  $8.12 \pm 0.18 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the first period and from  $2.28 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  to  $2.14 \pm 0.05 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the second. On the other hand different stages of mass loss were identified for these solutes been observed higher rates of water removal in the beginning of the process.

Although the results of water loss and soluble solids for solutes glycerol and sorbitol were similar, glycerol allowed greater reduction of water activity, being more suitable for the conservation of yacon. The use of calcium lactate did not cause further dehydration of the root, but showed strength on tissue structural yacon according to the micrographs.

### Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support received from Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal para o Ensino Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) and the product donation from Corn Products do Brasil.

### References

- Aguilera, J. M., & Stanley, D. W. (1999). *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering* (2nd ed.). Gaithersburg, Maryland: Aspen.
- AOAC (1990, 2002, 2006). *Official methods of analysis*. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2000). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Spain: Mac Graw-Hill Interamerica y Universitat de Barcelona, (Chapter 14).
- Barrera, C., Betoret, N., & Fito, P. (2004). Ca<sup>2+</sup> and Fe<sup>2+</sup> influence on the osmotic dehydration kinetics of apple slices (Var Granny Smith). *Journal of Food Engineering*, 65, 9–14.
- Barrera, C, Betoret, N, Corell, P., & Fito, P. (2009). Effect of osmotic dehydration on the stabilization of calcium-fortified apple slices (var. Granny Smith): Influence of operating variables on process kinetics and compositional changes. *Journal of Food Engineering*, 92, 416–424.
- Bellary, A. N., Sowbhagya, H. B., & Rastogi, N. K. (2011). Osmotic dehydration assisted impregnation of curcuminoids in coconut slices. *Journal of Food Engineering*, 105, 453–459.
- Castelló, M.L., Igual, M., Fito, P.J., & Chiralt, A. (2009). Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (Var. Granny Smith). *Journal of Food Engineering*, 91, 1-9.
- Codex Alimentarius. (2012) *FAO / WHO Food Standards*. GSFA Online. Available at: <<http://www.codexalimentarius.net/gsfaonline/index.html>> Accessed in: 25 ago. 2012.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed). Oxford: Clarendon.
- Dionello, R. G., et al. (2007). Desidratação por imersão-impregnação de abacaxi em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27(4), 701-709.

- El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M., Barbosa Jr, J. L., & Murr, F. E. X. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, 75, 267–274.
- Fante, L., Scher, C. F., Noreña, C. P. Z., & Rios, A. O. (2013). Study of enzyme inactivation using steam in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) roots. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37, 16-24.
- Fennema, O. R. (2010). *Química de Alimentos* (4th ed.). Porto Alegre: Artmed.
- Goto, K., Fukai, K., Hikida, J., Nanjo, F., & Hara, Y. (1995). Isolation and Structural Analysis of Oligosaccharides from Yacon (*Polymnia sonchifolia*). *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 59, 2346-2347.
- Gras, M. L., Vidal, D., Betoret, N., Chiralt, A., & Fito, P. (2003). Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation. Interactions with cellular matrix. *Journal of Food Engineering*, 56, 279–284.
- Habib, N. C., Honoré, S. M., Genta, S. B., & Sánchez, S. S. (2011). Hypolipidemic effect of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots on diabetic rats: Biochemical approach. *Chemico-Biological Interactions*, 194, 31-39.
- Heredia, A., Barrera, C., & Andrés, A. (2007). Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. *Journal of Food Engineering*, 80, 111–118.
- Incropera, F. P. (2008). *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa* (6th ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Johansson, I., Larsson, C., Ek, B., & Kjellbom, P. (1996). The major integral proteins of spinach leaf plasma membranes are putative aquaporins and are phosphorylated in response to  $Ca^{2+}$  and apoplastic water potential. *The Plant Cell*, 8, 1181–1191.
- Kotovicz, V., Ellendersen, L. S. N., Clarindo, M. M., & Masson, M. L. (2013). Influence of process conditions on the kinetics of the osmotic dehydration of yacon (*Polymnia sonchifolia*) in fructose solution. *Journal of Food Processing and Preservation*. doi:10.1111/jfpp.12064.
- Lenart, A. (1996). Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. *Drying Technology*, 14, 391–413.
- Maldonado, S., Santapaola, J. E., Singh, J., Torrez, M., & Garay, A. (2008). Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28, 251-256.
- Manrique, I., Párraga, A., & Hermann, M. (2005). *Jarabe de Yacon: Principios y Procesamiento*. Series: Conservación y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos andinos: Una década de investigación para el desarrollo (1993–2003). 8A. International Potato Center Universidad Nacional Alcides Carrión. Erbacher Foundation. Lima, Peru: Swiss Agency for Development and Cooperation.
- Mercali, G. D., Kechinski, C. P., Coelho, J. A., Tessaro, I. C., & Marczak, L. D. F. (2010). Estudo da transferência de massa durante a desidratação osmótica de mirtilo. *Brazilian Journal of Food Technology*, 13, 91-97.

- Mercali, G. D., Marczak, L. D. F., Tessaro, I. C., & Noreña, C. P. Z. (2011). Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, shum.). *LWT - Food Science and Technology*, 44, 82-91.
- Michels, I. (2005). *Aspectos tecnológicos do processamento mínimo de tubérculos de yacon (Polymnia sonchifolia) armazenados em embalagens com atmosfera modificada*, Dissertação de Mestrado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- Moraga, M. J., Moraga, G., & Martínez-Navarrete, N. (2011). Effect of the re-use of the osmotic solution on the stability of osmodehydro-refrigerated grapefruit. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 35-41.
- Moreira, R., et al. (2007). Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions. *LWT - Food Science and Technology*, 40, 1507–1514.
- 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, 40-46.
- Osorio, C., et al. (2007). Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8, 353–359.
- Ozdemir, M., Ozen, B. F., Dock, L. L., & Floros, J. D. (2008). Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 2044-2050.
- Pan, Z., Shih, C., McHugh, T. H., & Hirschberg, E. (2008). Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 1944-1951.
- Patel, S., & Goyal, A. (2012). The current trends and future perspectives of prebiotics research: a review. *3 Biotech*, 2, 115-125.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53, 1216-1219.
- Raoult-Wack, A. L. (1994). Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 5, 255-260.
- Rastogi, N. K., Angersbach, A., & Knorr, D. (2000). Valuation of mass transfer mechanisms during osmotic treatment of plant materials. *Journal of Food Science*, 65, 1016-1021.
- Rastogi, N. K., & Niranjana, K. (1998). Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *Journal of Food Science*, 63, 508-511.
- Rastogi, N. K., & Raghavarao, K. S. M. S. (1997). Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 34, 429-440.
- Rastogi, N. K., & Raghavarao, K. S. M. S. (2004). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *LWT - Food Science and Technology*, 37, 43-47.
- Rizzolo, A., et al. (2007). Headspace volatile compounds during osmotic dehydration of strawberries (cv Camarosa): Influence of osmotic solution composition and processing time. *LWT - Food Science and Technology*, 40, 529–535.

- Rózek, A., et al. (2009). Grape phenolic impregnation by osmotic treatment: Influence of osmotic agent on mass transfer and product characteristics. *Journal of Food Engineering*, 94, 59-68.
- Salvatori, D., Andrés, A., Albors, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Structural and Compositional Profiles in Osmotically Dehydrated Apple. *Journal of Food Science*, 63, 606-610.
- 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 and Technology*, 44, 2169-2175.
- Shi, J., & Le Maguer, M. (2002). Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects. *Food Reviews International*, 18(4), 305–335.
- Toğrul, I. T., & İspir, A. (2008). Equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of apricot. *Food and Bioproducts Processing*, 86, 254–267.
- Toledo, R. T. (2007). *Fundamentals of Food Process Engineering* (3rd ed.). New York: Springer.
- Torreggiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, 26, 59-68.
- Torres, J. D., Talens, P., Escriche, I., & Chiralt, A. (2006). Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering*, 74, 240–246.
- Tyerman, S.D., Bohnert, H.J., Maurel, C., Steudle, E., & Smith, J.A.C. (1999). Plant aquaporins, their molecular biology, biophysics and significance for plant water relations. *Journal of Experimental Botany*, 50, 1055–1071.
- Vieira, G. S. (2010). *Otimização do processo de desidratação osmótica de goiaba e avaliação do uso de pulso de vácuo e sais de cálcio*. Dissertação de Mestrado. Campinas: UNICAMP. Pp. 126.



## Capítulo 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para execução e cumprimento dos objetivos gerais e específicos deste trabalho de dissertação, os resultados obtidos foram apresentados na forma de dois artigos científicos. O primeiro refere-se aos ensaios preliminares (subcapítulo 6.1) e o segundo aos ensaios definitivos de osmo-desidratação (subcapítulo 6.2).

### ***6.1 Ensaios Preliminares***

#### **6.1.1 Perda de Massa**

Inicialmente, foi possível verificar o aumento da perda de massa das amostras ao longo do tempo de imersão para as soluções de glicerol, polidextrose e sorbitol e posterior diminuição dos valores de perda de massa (Figura 1 do primeiro artigo), indicando incorporação do soluto na matriz da raiz. Neste processo, foram identificados três períodos de perda de massa para o yacon tratado com solução de glicerol e de sorbitol. Até duas horas de imersão, ocorreu uma rápida perda de massa, causada pela maior taxa de remoção de água, baseada na diferença de pressão osmótica entre a solução osmótica e o yacon; em seguida, há um período constante, em que a taxa de saída de água é equivalente à taxa de entrada de soluto; e, finalmente, uma inversão da inclinação da curva em relação ao primeiro período (de crescente a decrescente), associado à menor remoção de água em relação à entrada de soluto. A polidextrose apresentou somente os dois primeiros períodos. Por outro lado, com o uso da maltodextrina, o patamar foi estabelecido desde o início do processo (com pequenas variações de perda e ganho de massa, porém com saldo de perda de massa em relação à amostra inicial).

Os valores de perda de massa (em percentual) obtidos para todos os solutos trabalhados são apresentados na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1** – Perda de Massa (%) das amostras de yacon com os diferentes solutos ao longo do tempo de imersão

Tempo (horas)	Glicerol	Maltodextrina	Polidextrose	Sorbitol
0	0	0	0	0
0,5	25,95 ± 0,71	8,50 ± 7,00	14,68 ± 5,06	20,56 ± 1,74
1	31,30 ± 2,66	5,20 ± 3,42	27,06 ± 2,30	31,53 ± 1,59
2	35,98 ± 0,40	8,17 ± 1,58	37,36 ± 5,74	40,91 ± 0,03
4	28,33 ± 1,21	8,37 ± 5,74	50,15 ± 6,77	44,15 ± 0,91
6	21,21 ± 6,32	1,56 ± 1,00	50,10 ± 0,78	40,17 ± 3,04

Dos quatro solutos, a polidextrose foi a que teve a maior perda de massa, de até 50% de massa após 6 horas, seguida pelo sorbitol (40,17 ± 3,04%) e glicerol (21,21 ± 6,32%). Entre estes três agentes osmóticos, a polidextrose possui maior massa molar ( $MM > 162$  kg/kmol), seguida respectivamente pelo sorbitol ( $MM = 182,17$  kg/kmol) e glicerol ( $MM = 92,09$  kg/kmol); isto explica o fato de a polidextrose, por ser uma molécula maior, ter perdido menos água em relação ao glicerol e sorbitol (como poderá ser visto nos itens 6.1.2 e 6.1.3). Como a maltodextrina possui elevada massa molar (uma vez que a amostra utilizada possui dextrose equivalente de 9 a 12), esperava-se que tivesse comportamento similar à polidextrose, com perda de massa inferior aos outros solutos menores, porém, possivelmente por ela ter massa molar muito elevada, teve baixa permeabilidade no yacon. Tampouco, foi observada desidratação do tipo ‘*molecular-press*’: neste tipo de desidratação, utilizam-se solutos de alta massa molar que causam uma pressão contra a parede do alimento a ser desidratado, ocasionando o colapso das células que acabam liberando sua água para a solução osmótica (CHUN *et al.*, 2012).

### 6.1.2 Variação do teor de umidade

Os valores do teor de umidade (em base seca) foram normalizados ( $x_t/x_0$ ) para uma melhor comparação dos resultados experimentais (Tabela 6.2) e foram plotados em função do tempo de imersão na Figura 2 do primeiro artigo.

**Tabela 6.2** – Variação do teor de umidade (base seca) com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com diversos agentes osmóticos

Tempo (horas)	Glicerol	Maltodextrina	Polidextrose	Sorbitol
0	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00
0,5	0,53 ± 0,09	1,04 ± 0,02	0,95 ± 0,22	0,62 ± 0,15
1	0,31 ± 0,03	1,03 ± 0,05	0,70 ± 0,02	0,43 ± 0,05
2	0,21 ± 0,04	0,95 ± 0,03	0,56 ± 0,00	0,30 ± 0,02
4	0,21 ± 0,00	1,04 ± 0,10	0,44 ± 0,02	0,19 ± 0,01
6	0,20 ± 0,04	0,91 ± 0,04	0,40 ± 0,01	0,19 ± 0,01

A maior desidratação foi obtida para as amostras tratadas com glicerol e sorbitol, atingindo remoção de água equivalente a  $80 \pm 4\%$  e  $81 \pm 1\%$ , respectivamente, sem diferença significativa entre as respostas ( $p > 0,05$ ). As amostras tratadas com polidextrose tiveram  $60 \pm 1\%$  de remoção de água, menor do que as duas anteriores. A remoção de água com glicerol, após 2 horas de tratamento não variou significativamente ( $p < 0,05$ ) dos tempos de 4 e de 6 horas. A maltodextrina não apresentou resultados satisfatórios de desidratação, pois os valores de umidade normalizada foram muito similares em todos os tempos avaliados, mantendo-se próximos desde o início até o final do processo osmótico.

### 6.1.3 Variação do teor de sólidos solúveis

A Tabela 6.3 apresenta os teores de sólidos solúveis ao longo do processo de desidratação osmótica nas soluções preparadas na concentração de 33 g de soluto por 100 g de água.

Quanto aos teores de sólidos solúveis iniciais e finais das soluções osmóticas, observa-se uma pequena variação de concentração das mesmas ao longo de seis horas de tratamento osmótico, de 3,3% para o glicerol; 3,2% para a maltodextrina; 2,7% para a polidextrose e 1,1% para o sorbitol. Isto indica que a proporção de yacon e solução de 1:12 foi apropriada, não prejudicando os experimentos no sentido de excessiva diluição do meio e sem perda da condição de contorno de concentração constante do meio osmótico.

**Tabela 6.3** – Teor de sólidos solúveis (°Brix) das soluções osmóticas com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com diversos agentes osmóticos

Tempo (horas)	Glicerol	Maltodextrina	Polidextrose	Sorbitol
0	30,2 ± 0,0	34,1 ± 0,0	34,0 ± 0,0	37,2 ± 0,0
0,5	29,7 ± 0,1	33,5 ± 0,7	34,0 ± 0,0	37,2 ± 0,0
1	29,6 ± 0,0	33,0 ± 0,0	33,9 ± 0,1	37,0 ± 0,3
2	29,3 ± 0,1	33,2 ± 0,1	33,4 ± 0,0	36,9 ± 0,1
4	29,2 ± 0,1	33,0 ± 0,0	33,1 ± 0,1	36,8 ± 0,2
6	29,4 ± 0,3	33,2 ± 0,4	33,1 ± 0,1	36,9 ± 0,2

A Figura 3 do primeiro artigo apresenta a variação do teor de sólidos solúveis com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com diversos agentes osmóticos. Os valores normalizados com os  $SS$  da amostra inicial de cada experimento encontram-se na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4** – Variação do teor de sólidos solúveis com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com diversos agentes osmóticos

Tempo (horas)	Glicerol	Maltodextrina	Polidextrose	Sorbitol
0	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00
0,5	1,56 ± 0,09	1,09 ± 0,26	1,22 ± 0,03	1,84 ± 0,13
1	2,44 ± 0,27	1,15 ± 0,21	1,67 ± 0,00	2,41 ± 0,32
2	3,41 ± 0,04	1,15 ± 0,07	2,11 ± 0,16	3,02 ± 0,03
4	3,65 ± 0,00	1,23 ± 0,11	2,67 ± 0,00	3,94 ± 0,05
6	3,73 ± 0,11	1,10 ± 0,00	2,90 ± 0,02	4,30 ± 0,16

Os sólidos solúveis aumentaram ao longo do tempo para glicerol ( $SS_t/SS_0 = 3,73 \pm 0,11$ ), sorbitol ( $SS_t/SS_0 = 4,30 \pm 0,16$ ) e polidextrose ( $SS_t/SS_0 = 2,90 \pm 0,02$ ), indicando maior difusão de soluto nas amostras tratadas com glicerol e sorbitol, porém não foi observada transferência de massa significativa da solução de maltodextrina para o yacon ( $SS_t/SS_0 = 1,10 \pm 0,00$ ). Maior transferência de soluto de glicerol e sorbitol da solução osmótica para o yacon é explicada devido à menor massa molar desses dois solutos quando comparados à polidextrose e à maltodextrina que têm dificuldade em penetrar na matriz do yacon (EL-AOUAR *et al.*, 2006). Estes resultados são semelhantes aos observados por Dionello *et al.* (2007) ao estudar a desidratação osmótica de abacaxi com soluções de açúcar invertido e sacarose. Os autores observaram o aumento de 3 a 4 vezes no conteúdo de sólidos solúveis totais em relação à amostra inicial. A saída de água e a entrada de soluto ocorreram principalmente nas primeiras 2 horas de imersão; depois disso, as taxas de transferência de

massa diminuíram gradualmente. O mesmo fenômeno foi relatado por Shi & Le Maguer (2002), nas primeiras 2 a 3 horas de secagem. De acordo com Raoult-Wack (1994), em condições típicas usadas para desidratar frutas e vegetais sob pressão atmosférica, a transferência de massa ocorre de forma significativa apenas nas duas primeiras horas de processo, decrescendo em seguida progressivamente. Dionello *et al.* (2007) observaram que, para diferentes valores de temperatura trabalhados em fatias de abacaxi, o teor de sólidos solúveis totais aumentou de forma significativa apenas nos primeiros 30 minutos de desidratação osmótica, permanecendo inalterado nos próximos 90 minutos de duração do processo. Esse comportamento evidenciou que o ganho de sólidos, devido à impregnação do soluto nas camadas superficiais desse fruto, só foi significativo nos 30 minutos iniciais do processo, tornando-se em seguida constante no caso dos abacaxis.

Nos ensaios realizados com maltodextrina, não foi verificada a perda de água ou ganho de sólidos. Esses resultados evidenciam que o uso desse soluto não é indicado para desidratação osmótica de yacon. A inexistência do ganho de sólidos pode ter ocorrido devido a sua elevada massa molar, o que diminui sua permeabilidade através da matriz do yacon. Já Chun *et al.* (2012) obtiveram bons resultados na desidratação do tipo “*molecular-press*” de mirtilos usando a maltodextrina.

Devido aos melhores resultados de remoção de água obtidos pelas soluções de glicerol e de sorbitol, estes solutos foram escolhidos para a continuação do trabalho através do planejamento experimental.

## **6.2 Experimentos de Osmo-Desidratação**

### **6.2.1 Composição do yacon utilizado**

A Tabela 6.5 apresenta as características do yacon *in natura* e branqueado - em vapor de água por 4 minutos seguidos de resfriamento por 3 minutos em água gelada, seguindo o método realizado por Fante *et al.* (2013).

**Tabela 6.5** – Composição do yacon *in natura* e branqueado utilizado nos experimentos

<b>Análise</b>	<b>Yacon <i>in natura</i></b>	<b>Yacon branqueado</b>
Umidade (%)	88,16 ± 1,60	90,53 ± 0,77
Atividade de Água	0,977 ± 0,003	0,978 ± 0,002
Sólidos Solúveis (°Brix)	11,6 ± 1,1	9,4 ± 1,4
Teor de Cálcio (mg cálcio / 100 g ms de yacon)	81,31 ± 5,12	Não definido
Teor de Glicose (g glicose / 100 g ms de yacon)	9,66 ± 3,20	11,26 ± 3,76
Teor de Frutose (g frutose / 100 g ms de yacon)	4,79 ± 5,69	6,03 ± 6,52

ms = matéria seca

Através da análise da Tabela 6.5, é possível verificar que não houve mudança significativa no teor de umidade, de atividade de água e no teor de sólidos solúveis com o branqueamento. Pequenas modificações se devem ao fato de maior saída de solutos do alimento por lixiviação durante o processo de branqueamento.

Com o branqueamento, os valores de ambos os açúcares aumentaram, indicando a possibilidade de termólise (hidrólise a altas temperaturas) da inulina, FOS e/ou sacarose no processo de pré-tratamento a 100°C. Böhm *et al.* (2005) mencionaram que, embora a inulina seja praticamente resistente às enzimas do trato digestivo, suas ligações 1,2-β-glicosídicas são sensíveis ao calor e ao tratamento ácido. Os autores observaram uma diminuição gradual do grau de polimerização da inulina de alcachofra de Jerusalém (alcachofra da terra) quando submetida a altas temperaturas por 30 minutos; a 195°C, praticamente não foram detectados oligômeros de frutose. Kim *et al.* (2001) verificaram a hidrólise das cadeias de inulina em cadeias menores durante o aquecimento em temperaturas acima de 80°C e nos pH de 1,0 e 2,0. O pH da água destilada do Departamento de Engenharia Química manteve-se em 5,0 durante os experimentos.

### 6.2.2 Perda de Massa

A Tabela 6.6 mostra os resultados obtidos, utilizados nos gráficos de perda de massa de glicerol e sorbitol, da Figura 1 do segundo artigo.

**Tabela 6.6** – Perda de Massa (%) das amostras de yacon com uso de soluções de glicerol e sorbitol ao longo do tempo de imersão

Tempo (h)		0	0,5	1	2	4	6
Tratamento							
Glicerol	30% 30°C	0,00	5,03 ± 0,33	1,57 ± 8,08	1,35 ± 3,78	-2,03 ± 0,96	-4,59 ± 9,69
	30% 50°C	0,00	9,59 ± 4,40	10,07 ± 2,90	3,54 ± 1,40	0,83 ± 2,68	-7,43 ± 3,74
	50% 30°C	0,00	31,21 ± 2,10	35,89 ± 3,25	33,35 ± 2,95	21,06 ± 8,64	19,79 ± 0,26
	50% 50°C	0,00	14,35 ± 1,03	21,25 ± 8,36	17,05 ± 10,98	11,70 ± 9,75	1,25 ± 6,54
	70% 30°C	0,00	30,93 ± 1,12	37,40 ± 2,37	41,09 ± 2,38	41,47 ± 5,51	41,52 ± 3,09
	70% 50°C	0,00	34,95 ± 3,77	39,73 ± 5,99	40,51 ± 3,22	35,50 ± 2,43	26,19 ± 0,21
	Ca 70% 30°C	0,00	37,55 ± 0,04	47,83 ± 1,03	46,65 ± 0,79	47,04 ± 1,44	42,31 ± 2,53
Sorbitol	30% 30°C	0,00	15,75 ± 0,17	10,50 ± 0,64	8,23 ± 2,65	6,49 ± 8,89	-4,31 ± 5,82
	30% 50°C	0,00	14,91 ± 7,42	17,40 ± 0,71	12,36 ± 9,38	2,93 ± 2,43	-8,44 ± 1,23
	50% 30°C	0,00	20,70 ± 5,02	29,86 ± 2,41	31,32 ± 2,10	32,04 ± 0,41	23,78 ± 6,12
	50% 50°C	0,00	20,55 ± 1,88	26,01 ± 7,13	24,15 ± 1,09	18,11 ± 4,56	5,38 ± 0,78
	70% 30°C	0,00	35,60 ± 0,81	43,60 ± 1,77	48,46 ± 1,94	54,27 ± 1,24	49,78 ± 1,06
	70% 50°C	0,00	40,48 ± 3,60	47,96 ± 3,94	48,07 ± 3,94	48,01 ± 2,97	36,97 ± 1,84
	Ca 70% 30°C	0,00	41,85 ± 6,49	54,32 ± 5,34	57,40 ± 4,93	62,12 ± 4,37	57,38 ± 4,54

Houve maior perda de massa na primeira hora de desidratação osmótica, devido ao maior gradiente de concentração entre a solução osmótica e o yacon no início do processo. Principalmente, em concentrações e temperaturas mais elevadas, houve um ganho de massa após duas horas de processo, visualizado pela inversão da curva na Figura 1 do segundo artigo. Este ganho se deve à contínua incorporação de solutos na matriz do alimento, mesmo após a remoção de água estar praticamente cessada (RAOULT-WACK, 1994).

A Tabela 2 do segundo artigo mostra o resultado da ANOVA para a perda de massa de yacon tratadas com glicerol e sorbitol. A concentração e a temperatura, assim como sua interação tiveram efeito significativo sobre a perda de massa de todos os tratamentos. Houve o aumento da perda de massa com o aumento da concentração; porém, a altas concentrações, o aumento da temperatura diminuiu a perda de massa, portanto, a interação indica que a altas concentrações, a concentração está comandando a perda de massa. Também, é possível que o efeito da concentração seja maior do que o efeito da temperatura sobre a viscosidade.

O uso do lactato de cálcio não mostrou diferenças significativas em relação ao tratamento realizado nas mesmas condições sem a adição do sal.

### 6.2.3 Variação do teor de umidade

Os valores de umidade (base seca) normalizados ( $x_t/x_0$ ) estão mostrados na Tabela 6.7 e foram plotados em função do tempo de imersão na Figura 2 do segundo artigo.

**Tabela 6.7** – Variação do teor de umidade (base seca) com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol

Tempo (h)		0	0,5	1	2	4	6
Tratamento							
Glicerol	30% 30°C	1,00	0,65 ± 0,18	0,44 ± 0,09	0,32 ± 0,03	0,31 ± 0,03	0,28 ± 0,01
	30% 50°C	1,00	0,54 ± 0,04	0,27 ± 0,04	0,22 ± 0,03	0,21 ± 0,03	0,20 ± 0,03
	50% 30°C	1,00	0,40 ± 0,09	0,25 ± 0,02	0,20 ± 0,03	0,17 ± 0,01	0,15 ± 0,02
	50% 50°C	1,00	0,52 ± 0,10	0,29 ± 0,04	0,20 ± 0,03	0,17 ± 0,02	0,14 ± 0,02
	70% 30°C	1,00	0,34 ± 0,00	0,22 ± 0,01	0,15 ± 0,00	0,11 ± 0,01	0,08 ± 0,00
	70% 50°C	1,00	0,44 ± 0,19	0,17 ± 0,01	0,13 ± 0,02	0,10 ± 0,01	0,09 ± 0,01
	Ca 70% 30°C	1,00	0,44 ± 0,12	0,24 ± 0,04	0,18 ± 0,05	0,15 ± 0,03	0,13 ± 0,04
Sorbitol	30% 30°C	1,00	0,51 ± 0,00	0,39 ± 0,05	0,32 ± 0,01	0,25 ± 0,01	0,23 ± 0,01
	30% 50°C	1,00	0,41 ± 0,09	0,30 ± 0,07	0,24 ± 0,06	0,20 ± 0,04	0,18 ± 0,03
	50% 30°C	1,00	0,46 ± 0,04	0,32 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,13 ± 0,01
	50% 50°C	1,00	0,35 ± 0,01	0,24 ± 0,00	0,17 ± 0,01	0,14 ± 0,00	0,13 ± 0,00
	70% 30°C	1,00	0,36 ± 0,04	0,24 ± 0,04	0,14 ± 0,02	0,11 ± 0,01	0,08 ± 0,01
	70% 50°C	1,00	0,27 ± 0,00	0,17 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,08 ± 0,00	0,07 ± 0,00
	Ca 70% 30°C	1,00	0,34 ± 0,02	0,22 ± 0,02	0,14 ± 0,00	0,09 ± 0,00	0,08 ± 0,00

Observa-se uma redução da umidade ao longo do processo osmótico para todos os tratamentos, com uma alta taxa inicial de remoção de água, seguida de remoção mais lenta nos estágios finais do processo. A rápida perda de água no início da DO se deve à grande força motriz osmótica existente entre a matriz diluída do yacon branqueado e o meio hipertônico que diminui com o passar do tempo. Ao final de 6 horas de desidratação osmótica, tratamentos com concentrações maiores de soluto apresentaram maior remoção de água do que os realizados com concentrações mais baixas, indicando que o aumento do gradiente de concentração entre a solução e o yacon resultaram em maior transferência de massa de água. O mesmo comportamento foi obtido por Bellary *et al.* (2011) com fatias de coco, Mercali *et al.* (2011) na DO de bananas e El-Aouar *et al.* (2006) com fatias de mamão.

A Tabela 3 do segundo artigo mostra os resultados da ANOVA para o teor de umidade. Como pode ser observado, a temperatura e a concentração da solução de sorbitol tiveram efeito significativo sobre as respostas de umidade ( $p < 0,05$ ), ou seja, com a variação de qualquer um desses fatores, houve alteração na resposta obtida, o que pode ser verificado no gráfico da Figura 2 do segundo artigo. Para solução de glicerol somente a concentração e



sua interação com a temperatura apresentaram mudanças significativas ( $p < 0,05$ ) no teor de umidade.

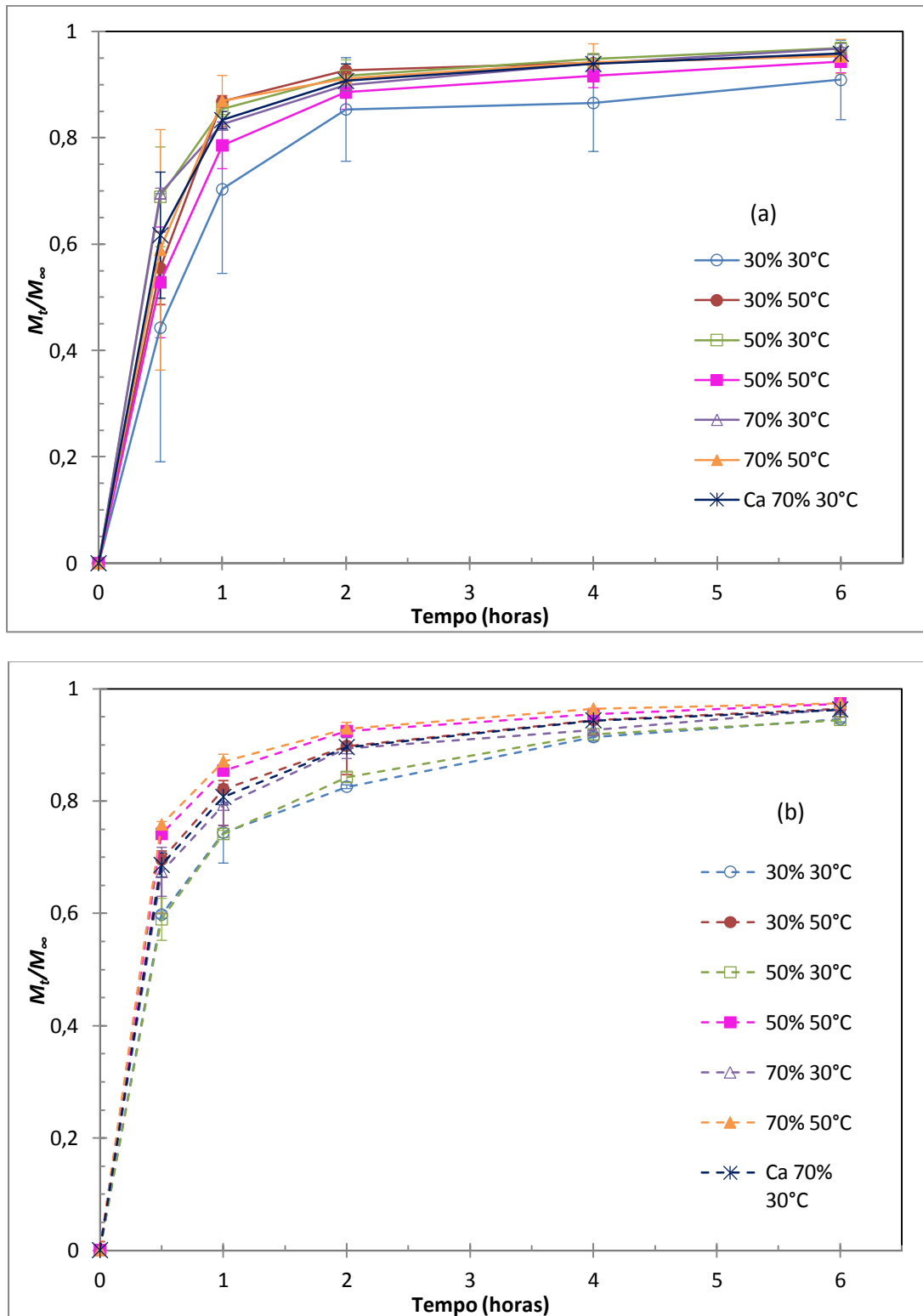
Segundo Khoiyi e Hesari (2007), o aumento da temperatura provoca a diminuição da viscosidade da solução osmótica e um aumento da difusividade mássica efetiva, também devido ao aumento da permeabilidade da membrana. Este comportamento foi verificado nas curvas a 30% de soluto dos gráficos da Figura 2 do segundo artigo ( $p < 0,05$ ); com temperaturas mais elevadas, embora ocorra o decréscimo da viscosidade da solução, as respostas para os experimentos realizados com glicerol não foram significativamente diferentes daquelas obtidas na menor temperatura ( $p > 0,05$ ). Nos tratamentos realizados com sorbitol, o tratamento realizado com 70% de concentração a 50°C foi melhor do que os demais ( $p < 0,05$ ) no período de 2 a 4 horas de imersão.

Em geral, após 4 horas de desidratação osmótica com ambos os agentes osmóticos não houve nenhuma alteração significativa na quantidade de água removida ( $p > 0,05$ ); portanto, através de avaliação desta resposta isoladamente, o tempo de processo pode ser reduzido. Azuara *et al.* (2009) mencionaram que a obtenção do equilíbrio é assintótica, e isto se deve ao fato da transferência de água por difusão ser um processo lento, com obtenção do equilíbrio após um longo tempo de processo de desidratação osmótica (RASTOGI & RAGHAVARAO, 1997). Devido ao fato de o equilíbrio não ter sido obtido em condições dinâmicas, já que não se observa claramente essa zona assintota para todas as curvas de umidade da Figura 2 do segundo artigo, a umidade de equilíbrio foi predita pela equação de Peleg (1988). Os valores encontram-se na Tabela 4 do segundo artigo e a equação de Peleg provou ser adequada para a estimativa da umidade de equilíbrio, pois os coeficientes de determinação ficaram acima de 0,99 para todos os tratamentos. Por outro lado, somente a concentração exerceu efeito significativo sobre a umidade de equilíbrio dos tratamentos (Tabela 6.8), sendo que isto pode ser verificado através dos valores de umidade de equilíbrio obtidos a uma mesma concentração, mas em temperaturas diferentes, avaliados segundo o teste de Tukey, cujo efeito foi ainda mais claro para os tratamentos com sorbitol (Tabela 4 do segundo artigo).

Na Figura 6.1 apresentam-se os gráficos da variação de perda de água adimensional ( $M_t/M_\infty$ ) em função do tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon, plotado a partir da Equação 5 do Capítulo 2 para o glicerol (a) e sorbitol (b). As curvas possuem uma linha de tendência em que a perda de água aumenta exponencialmente com o tempo até se tornar assintótica, onde inicialmente o processo de remoção ocorre a altas taxas de saída de

água, seguida de valores menores no decorrer do tempo. Os pontos experimentais foram unidos por retas apenas para fins de visualização.

**Figura 6.1** – Variação da perda de água adimensional com o tempo de imersão na desidratação osmótica de yacon tratado com solução de (a) glicerol e (b) sorbitol



Para ambos os solutos (mas principalmente para o glicerol), foi possível verificar que após duas horas de imersão praticamente não houve modificação na resposta dos tratamentos, indicando um comportamento que tende ao equilíbrio.

**Tabela 6.8** – ANOVA da umidade de equilíbrio das amostras de yacon tratadas com soluções de glicerol e sorbitol

Soluto	Fator	GL	SQ	QM	F calculado	Significância da Estatística (p)
Glicerol	<i>T</i>	1	0,26048533	0,26048533	2,77	0,1472
	<i>C</i>	2	4,04384600	2,02192300	21,49	0,0018*
	<i>T*C</i>	2	0,07152867	0,03576433	0,38	0,6992
Sorbitol	<i>T</i>	1	0,00080033	0,00080033	0,31	0,5988
	<i>C</i>	2	3,36685400	1,68342700	648,47	<0,0001*
	<i>T*C</i>	2	0,02478867	0,01239433	4,77	0,0575

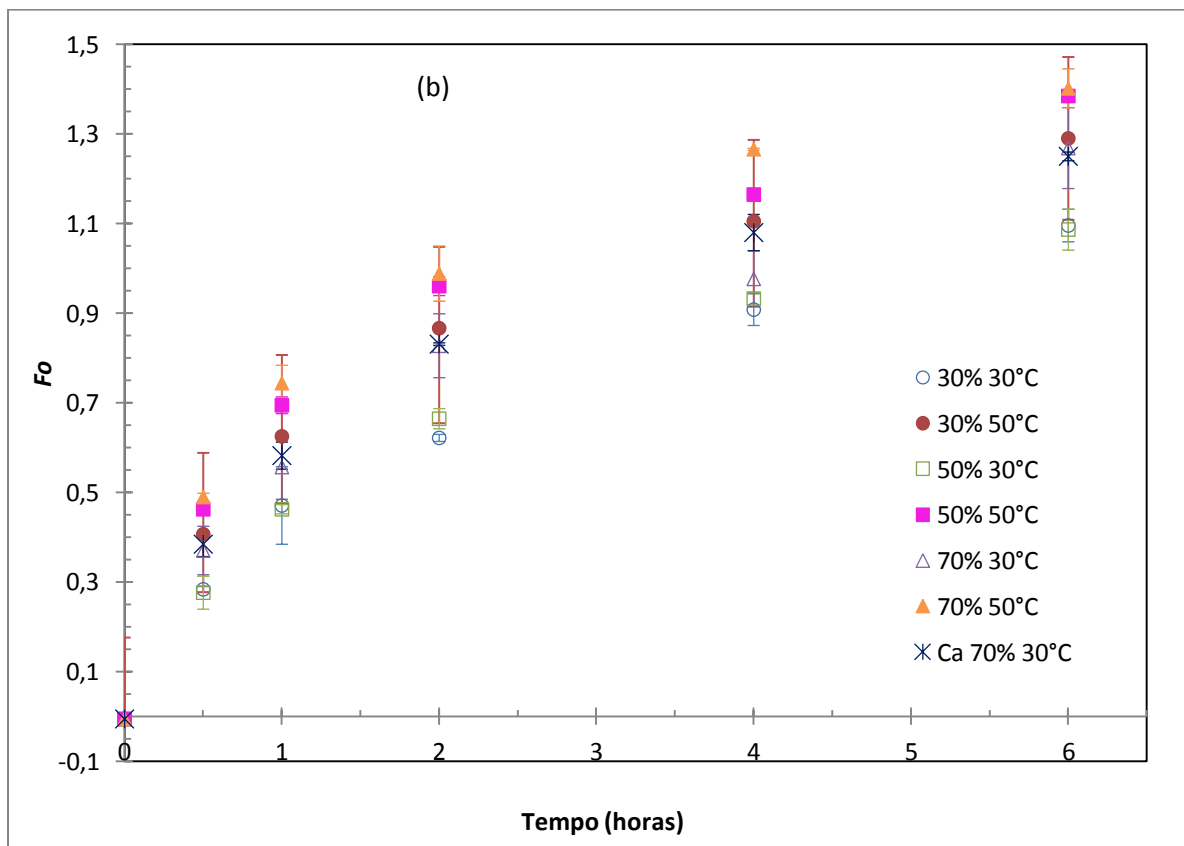
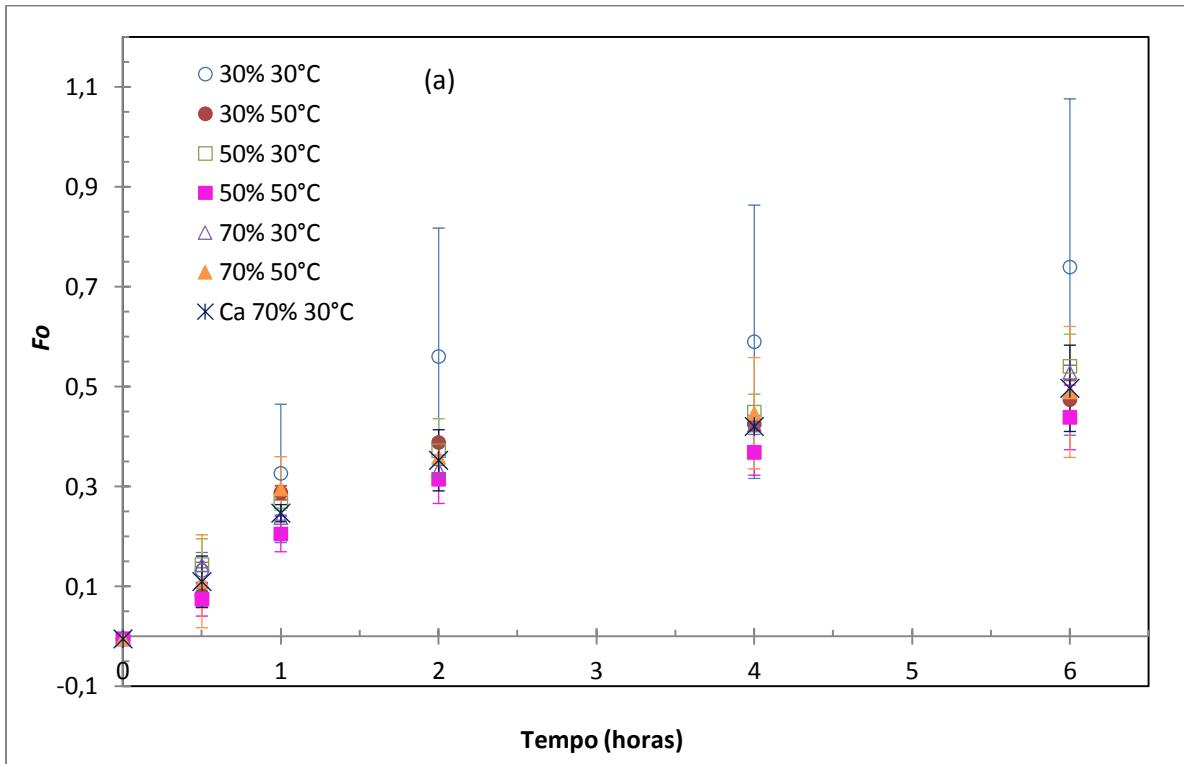
\*significativo ( $p < 0,05$ )

#### 6.2.4 Difusividade Mássica Efetiva

A partir dos valores de variação de perda de água adimensional foram obtidos os respectivos valores para o Número de Fourier segundo a Equação 5 do Capítulo 2. O gráfico do Número de Fourier em função do tempo de imersão apresentado na Figura 6.2 ((a) para o glicerol e (b) para o sorbitol).

Em materiais convencionais (homogêneos e não biológicos), geralmente é aceito que a difusão ocorre a uma taxa constante, sob a influência de um gradiente de umidade uniforme. No entanto, esse tipo de comportamento não ocorre em materiais biológicos, especialmente depois das fases iniciais de secagem, onde a estrutura física do material começa a mudar à medida que a desidratação osmótica avança (MERCALI *et al.*, 2011, RASTOGI, ANGERSBACH e KNORR, 2000).

**Figura 6.2** – Número de Fourier em função do tempo de imersão em solução de (a) glicerol e (b) sorbitol



Para ambos os solutos, o número de Fourier ao longo do tempo não originou uma reta, portanto, todas as curvas foram divididas em duas retas (representando dois estágios de desidratação e de difusão). A Figura 3 do segundo artigo apresenta o gráfico do número de Fourier em função do tempo, a título de ilustração, para um único tratamento, a fim de evitar o acúmulo de curvas, o que dificultaria a visualização do comportamento de dois estágios. Maldonado *et al.* (2008) também encontrou dois períodos de difusão da água na desidratação osmótica de yacon com solução de sacarose. Com exceção dos tratamentos com solução de glicerol a 30%, cujos melhores coeficientes de regressão foram cortando a curva no tempo de 2 horas, todos os outros tratamentos apresentaram melhores resultados dividindo as curvas até o tempo de 1 hora de imersão.

A difusividade mássica efetiva da água ( $D_e$ ) de cada estágio de desidratação foi calculada a partir do coeficiente angular das curvas do número de Fourier versus tempo de imersão, multiplicado pela meia espessura do disco ao quadrado (Equação 6 do Capítulo 2). Os valores de  $D_e$  para os diferentes tratamentos são mostrados na Tabela 4 do segundo artigo.

Como pode ser observado nessa tabela, os resultados obtidos para difusividade mássica efetiva da água encontram-se na faixa de  $5,21 \pm 1,12 \times 10^{-10}$  a  $2,60 \pm 1,02 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s no primeiro estágio e  $9,64 \pm 0,31 \times 10^{-11}$  a  $3,72 \pm 1,49 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s no segundo estágio nos tratamentos com glicerol. Ambos os valores foram inferiores na concentração de 30% e superiores na concentração de 70% de glicerol, o que pode ser explicado pela pressão osmótica mais elevada realizada pelo aumento da concentração da solução osmótica. Nos tratamentos com sorbitol, a  $D_e$  variou de  $13,01 \pm 0,70 \times 10^{-10}$  a  $8,12 \pm 0,18 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s no primeiro período e  $2,28 \pm 0,05 \times 10^{-10}$  a  $2,14 \pm 0,05 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s no segundo, novamente com maiores valores para maiores concentrações.

Os menores valores de difusividade mássica efetiva da água foram obtidos com o uso de glicerol ( $MM$  92,09 kg/kmol); isto pode ter ocorrido devido a sua elevada capacidade de ligação com a água (BEATRIZ, ARAÚJO & LIMA, 2011), reduzindo a quantidade de água livre a se difundir pelo yacon e pelo maior colapso das células do tecido do yacon, em função da maior massa molar do sorbitol ( $MM$  182,17 kg/kmol).

Os valores de  $D_e$  obtidos no presente trabalho foram superiores aos encontrados por Maldonado *et al.* (2008) que foram de  $3,20 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para o primeiro período e  $1,84 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s para o segundo na DO de yacon a 25 °C e 40% de concentração de solução de sacarose ( $MM$  342,30 kg/kmol). Ainda que as respostas estejam em ordem de grandeza similares, as

diferenças podem ser explicadas pela utilização de diferentes solutos (moléculas menores difundem mais facilmente do que as grandes), temperaturas (a transferência de massa tende a ser mais elevada a temperaturas mais elevadas) e, segundo Seminário *et al.* (2003) a composição dos açúcares varia de forma significativa em função de fatores como a cultivar, época de cultivo e colheita e o tempo e a temperatura da pós-colheita. Segundo Wakabayashi (2000), com o processo de maturação ocorre um aumento da pectina solúvel, ácidos pécnicos e pectato de cálcio, o qual é normalmente acompanhado da diminuição da protopectina, indicando que as pectinas solubilizadas são originadas de polímeros mais firmemente integrados à parede celular e, possivelmente, também à hemicelulose. O aumento na solubilização e despolimerização da pectina é geralmente correlacionado com a diminuição da firmeza do tecido e conseqüentemente considerado parte importante do processo de maturação.

Por outro lado, sobre o uso de sal na DO junto com açúcares, Mercali *et al.* (2011), menciona que a presença do sal na solução osmótica afeta o mecanismo envolvido nos fluxos simultâneos de remoção de água e penetração de soluto e, por conseguinte, afeta os valores difusividades. No trabalho de Mercali *et al.* (2011), o cloreto de sódio afetou positivamente a desidratação osmótica de bananas. Entretanto, no presente trabalho, a difusividade mássica da água não aumentou significativamente ( $p > 0,05$ ) nos ensaios em que o lactato de cálcio foi utilizado. Uma possível explicação é a dificuldade de penetração do lactato de cálcio no interior do yacon, uma vez que sua massa molar ( $MM = 308,32 \text{ kg/kmol}$ ) é mais de cinco vezes maior do que a do cloreto de sódio ( $MM = 58,44 \text{ kg/kmol}$ ).

Os resultados da cinética de transferência de massa indicaram que a adição de lactato diminuiu a perda de água nos tratamentos em que foi adicionado. O mesmo foi observado por Castelló *et al.* (2009) na desidratação osmótica de fatias de maçã em solução de glicose 50°Brix a 30°C contendo 0, 1 e 2% (m/m) de lactato de cálcio. Eles verificaram que, com a adição desse sal, o tempo de secagem era maior que com as amostras sem o sal. Isso pode ser devido à interação do cálcio com o tecido, que resulta na redução na difusividade efetiva da água, como já foi relatada por outros autores (BARRERA *et al.*, 2004). Esta redução pode ser explicada, não só pelos efeitos de ligação cruzada do cálcio na matriz celular, que afeta a permeabilidade da água das estruturas celulares (AZCÓN-BIETO e TALÓN, 2000), mas também pela influência dos íons no transporte da água através da membrana celular (JOHANSSON *et al.*, 1996; TYERMAN *et al.*, 1999). Quantidades adequadas de cálcio

ajudam a reforçar as zonas de ligação celular através da inibição da ruptura de tecidos durante a senescência (SAFTNER *et al.*, 2003).

De acordo com Gras *et al.* (2003) e Barrera *et al.* (2009), a interação dos íons cálcio com a pectina presente na parede celular das matrizes vegetais origina a formação de pontes de cálcio, o que por sua vez, resulta numa parede mais reforçada, limitando assim os fluxos de água e de sólidos nos tecidos. Adicionalmente, Moraga *et al.* (2009), avaliando o efeito da aplicação de vácuo e do uso de lactato de cálcio na desidratação osmótica de toranja, sugeriram que o aumento da resistência ao transporte de água pelas membranas celulares em função do aumento do teor de cálcio também é decorrente do efeito do  $\text{Ca}^{2+}$  na regulação das proteínas, do grupo aquaporinas, responsáveis pelo transporte ativo de água que ocorre durante o consumo de energia (ATP), diminuindo, dessa forma, o fluxo de saída de água das células. Vieira (2010) destacou que a ação do cálcio na estrutura celular, contribuiu no reforço da parede diminuindo dessa forma a transferência de massa, com a consequente redução da perda de peso, perda de água e ganho de sólidos das fatias de goiaba tratadas com lactato de cálcio. Torres *et al.* (2008) também relataram a redução da perda de peso de fatias de manga osmoticamente desidratadas com soluções de sacarose adicionadas de 2% de lactato de cálcio com aplicação de pulso de vácuo no início do processo. Essa redução da perda de peso nas amostras esteve associada à limitação da perda de água das frutas, devido à menor permeabilidade da parede celular do tecido vegetal em virtude da interação do íon cálcio com a pectina presente na parede, originando a formação de pontes de cálcio, que dessa forma, favoreceu o fortalecimento da estrutura polimérica (VIEIRA, 2010).

Através da análise ANOVA, apresentada na Tabela 6.9, verificou-se que somente a concentração da solução osmótica possui efeito significativo sobre a difusividade mássica nas duas etapas de desidratação osmótica do yacon com glicerol; já no caso do sorbitol, somente a temperatura provocou mudanças na  $D_e$  da água no primeiro período.

**Tabela 6.9** – ANOVA da difusividade mássica efetiva da água nas amostras de yacon tratadas com soluções de glicerol e sorbitol

Soluto	Período de secagem	Fator	GL	SQ	QM	F calculado	Significância da Estatística (p)
Glicerol	1°	<i>T</i>	1	2,13333E-21	2,13333E-21	0,46	0,5219
		<i>C</i>	2	5,61527E-20	2,80763E-20	6,09	0,0360*
		<i>T*C</i>	2	2,92727E-20	1,46363E-20	3,17	0,1148
	2°	<i>T</i>	1	7,84083E-22	7,84083E-22	3,03	0,1323
		<i>C</i>	2	4,69331E-21	2,34665E-21	9,07	0,0153*
		<i>T*C</i>	2	3,11687E-22	1,55843E-22	0,60	0,5774
Sorbitol	1°	<i>T</i>	1	3,30672E-19	3,30672E-19	17,75	0,0056*
		<i>C</i>	2	6,64207E-20	3,32103E-20	1,78	0,2469
		<i>T*C</i>	2	9,186E-21	4,593E-21	0,25	0,7891
	2°	<i>T</i>	1	4,03333E-23	4,03333E-23	0,91	0,3762
		<i>C</i>	2	7,01667E-23	3,50833E-23	0,79	0,4943
		<i>T*C</i>	2	1,36167E-22	6,80833E-23	1,54	0,2882

\*significativo ( $p < 0,05$ )

### 6.2.5 Atividade de Água

De acordo com Lenart (1996), a atividade da água das frutas e vegetais desidratados osmoticamente, em escala laboratorial ou em condições industriais, é próximo de 0,90, razão de tais produtos necessitarem de um processo subsequente de congelamento, criossecagem, secagem a vácuo ou por convecção com ar. O nível de atividade de água apresentado pelo material após a desidratação, quando combinada com outras técnicas de conservação, tais como a utilização de conservantes químicos, a redução do pH e/ou secagem adicionais, pode promover uma maior estabilidade do produto (FENNEMA, 2010).

A Figura 4 do segundo artigo mostra que os valores normalizados de atividade de água diminuíram com o tempo de imersão e com o aumento da temperatura e da concentração da solução osmótica devido à maior remoção de água e à incorporação de soluto durante o processo de desidratação. Estes resultados estão apresentados na Tabela 6.10. Os menores valores de atividade de água obtidos ( $0,704 \pm 0,010$ ) foram com o tratamento utilizando



glicerol a 70% de concentração de soluto na temperatura de 50 °C ( $p < 0,05$ ). Esse resultado indica que o glicerol, além de agir como agente osmótico, liga-se à água, contribuindo, desta forma, na diminuição do teor de água livre do yacon. Segundo Fennema (2010), poucas substâncias, principalmente glicerol, sacarose, glicose, propileno glicol e cloreto de sódio são efetivas o suficiente para diminuir a atividade de água, enquanto são organolepticamente toleráveis.

**Tabela 6.10** – Variação da atividade de água ( $a_{w(t)}/a_{w(0)}$ ) com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol

Tempo (h)		0	0,5	1	2	4	6
Tratamento							
Glicerol	30% 30°C	1,00	0,980 ± 0,003	0,971 ± 0,002	0,952 ± 0,003	0,944 ± 0,001	0,931 ± 0,001
	30% 50°C	1,00	0,966 ± 0,005	0,953 ± 0,001	0,939 ± 0,003	0,926 ± 0,008	0,919 ± 0,006
	50% 30°C	1,00	0,972 ± 0,008	0,943 ± 0,007	0,902 ± 0,005	0,868 ± 0,008	0,844 ± 0,014
	50% 50°C	1,00	0,960 ± 0,001	0,919 ± 0,002	0,874 ± 0,004	0,857 ± 0,002	0,814 ± 0,006
	70% 30°C	1,00	0,961 ± 0,006	0,932 ± 0,003	0,876 ± 0,002	0,796 ± 0,022	0,744 ± 0,009
	70% 50°C	1,00	0,948 ± 0,009	0,883 ± 0,018	0,808 ± 0,004	0,742 ± 0,007	0,704 ± 0,010
	Ca 70% 30°C	1,00	0,961 ± 0,002	0,932 ± 0,011	0,869 ± 0,000	0,832 ± 0,001	0,762 ± 0,001
Sorbitol	30% 30°C	1,00	1,004 ± 0,006	0,992 ± 0,005	0,984 ± 0,001	0,977 ± 0,001	0,976 ± 0,004
	30% 50°C	1,00	0,990 ± 0,000	0,984 ± 0,001	0,976 ± 0,001	0,972 ± 0,001	0,967 ± 0,001
	50% 30°C	1,00	0,989 ± 0,007	0,982 ± 0,004	0,972 ± 0,001	0,951 ± 0,001	0,938 ± 0,003
	50% 50°C	1,00	0,985 ± 0,003	0,974 ± 0,001	0,956 ± 0,006	0,942 ± 0,003	0,926 ± 0,000
	70% 30°C	1,00	0,987 ± 0,001	0,979 ± 0,001	0,956 ± 0,008	0,931 ± 0,008	0,876 ± 0,028
	70% 50°C	1,00	0,982 ± 0,004	0,962 ± 0,005	0,931 ± 0,014	0,879 ± 0,005	0,865 ± 0,002
	Ca 70% 30°C	1,00	0,999 ± 0,001	0,983 ± 0,007	0,958 ± 0,000	0,921 ± 0,000	0,890 ± 0,002

A Tabela 5 do segundo artigo apresenta a análise ANOVA para a atividade de água das amostras de yacon ao longo do processo osmótico. A redução da atividade da água teve influência da concentração e da temperatura da solução osmótica, além do efeito de interação destes parâmetros para ambos os solutos ( $p < 0,05$ ); ou seja, qualquer aumento na temperatura e/ou na concentração da solução osmótica representou em maior redução da atividade de água do yacon tratado.

O uso de lactato de cálcio não melhorou os resultados de  $a_w$ , mantendo-os similares aos obtidos sem a adição do sal. O mesmo comportamento foi observado por Vieira (2010), utilizando 0,6 e 1,2% de lactato de cálcio em soluções de 40 e 60 °Brix de sacarose na desidratação osmótica de fatias de goiaba uma vez que a adição do sal implicou na diminuição da perda de água das frutas, nos tratamentos desenvolvidos a pressão atmosférica e sob pulso de vácuo.

### 6.2.6 Variação do teor de sólidos solúveis

A Tabela 6.11 apresenta os teores de sólidos solúveis das soluções osmóticas ao longo do processo de desidratação osmótica para os diferentes tratamentos realizados.

**Tabela 6.11** – Teor de sólidos solúveis (°Brix) das soluções osmóticas com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol

Tempo (h) Tratamento		0	0,5	1	2	4	6
		Glicerol	30% 30°C	27,5 ± 0,1	27,5 ± 0,2	27,5 ± 0,2	27,5 ± 0,3
30% 50°C	29,0 ± 0,7		29,0 ± 0,8	29,1 ± 1,0	29,2 ± 1,2	29,6 ± 1,1	29,7 ± 1,5
50% 30°C	42,7 ± 0,3		42,6 ± 0,4	42,7 ± 0,4	42,5 ± 0,1	42,4 ± 0,2	42,4 ± 0,0
50% 50°C	43,5 ± 0,7		43,4 ± 0,6	43,3 ± 0,6	43,8 ± 1,1	44,6 ± 1,2	45,4 ± 1,4
70% 30°C	55,2 ± 1,2		54,5 ± 0,9	54,8 ± 0,8	54,3 ± 1,0	54,4 ± 0,8	54,8 ± 1,3
70% 50°C	56,3 ± 0,2		55,5 ± 0,1	55,2 ± 0,4	55,0 ± 0,7	55,3 ± 1,0	55,4 ± 1,0
Ca 70% 30°C	53,6 ± 0,1		53,6 ± 0,1	53,4 ± 0,1	53,4 ± 0,2	53,1 ± 0,1	53,0 ± 0,1
Sorbitol	30% 30°C	33,1 ± 0,1	33,3 ± 0,2	33,2 ± 0,1	33,5 ± 0,1	32,9 ± 0,4	32,7 ± 0,1
	30% 50°C	34,1 ± 1,5	33,9 ± 1,1	33,8 ± 0,6	33,9 ± 0,4	33,5 ± 0,2	34,2 ± 0,8
	50% 30°C	52,2 ± 0,1	51,8 ± 0,3	51,9 ± 0,2	51,9 ± 0,4	51,6 ± 0,5	51,5 ± 0,6
	50% 50°C	50,8 ± 0,0	50,6 ± 0,2	50,5 ± 0,4	49,7 ± 0,6	50,1 ± 0,8	50,6 ± 0,8
	70% 30°C	67,0 ± 0,0	66,5 ± 0,9	66,1 ± 0,7	66,3 ± 0,3	66,4 ± 0,4	66,4 ± 0,3
	70% 50°C	65,8 ± 1,2	65,4 ± 1,1	65,2 ± 0,8	64,9 ± 0,7	65,4 ± 0,0	65,3 ± 0,4
	Ca 70% 30°C	65,9 ± 0,5	64,8 ± 1,0	64,6 ± 0,5	64,3 ± 0,5	64,2 ± 0,8	64,1 ± 0,5

Assim como nos experimentos iniciais (realizados com agitação magnética com soluções de 33% de glicerol, maltodextrina, polidextrose e sorbitol), os teores de sólidos solúveis iniciais e finais das soluções osmóticas indicaram pequena variação da concentração das mesmas ao longo de seis horas de tratamento osmótico, com pequenas variações das médias. Isto indica que a proporção de yacon e solução osmótica de 1:20 foi apropriada, não prejudicando a condição de contorno de concentração constante do meio osmótico.

A Tabela 6.12 e a Figura 5 do segundo artigo mostram a variação de sólidos solúveis ao longo do tempo de processo osmótico para as amostras de yacon. Observa-se que as amostras osmodesidratadas nas maiores concentrações e temperatura de solução osmótica apresentaram maior conteúdo final de sólidos solúveis (SS), com  $53,1 \pm 0,78$  °Brix para o glicerol e  $60,9 \pm 0,07$  °Brix para o sorbitol (valores totais utilizados na normalização da Tabela 6.12). Estes valores foram próximos aos sólidos solúveis das soluções osmóticas iniciais de glicerol ( $SS_0 = 56,3$  °Brix) e de sorbitol ( $SS_0 = 65,8$  °Brix).

**Tabela 6.12** – Variação dos sólidos solúveis ( $SS_t/SS_0$ ) de yacon com o tempo de imersão durante a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol

Tratamento		Tempo (h)					
		0	0,5	1	2	4	6
Glicerol	30% 30°C	1,00	2,45 ± 0,49	3,10 ± 1,09	3,53 ± 1,17	4,03 ± 1,38	3,96 ± 1,53
	30% 50°C	1,00	2,11 ± 0,42	2,50 ± 0,13	2,67 ± 0,25	2,81 ± 0,29	2,95 ± 0,22
	50% 30°C	1,00	2,33 ± 0,57	3,01 ± 0,43	3,73 ± 0,69	4,25 ± 0,72	4,54 ± 0,62
	50% 50°C	1,00	2,30 ± 0,07	2,89 ± 0,20	3,43 ± 0,08	3,68 ± 0,05	3,97 ± 0,04
	70% 30°C	1,00	2,80 ± 0,45	3,57 ± 0,35	4,81 ± 0,32	5,36 ± 0,13	5,79 ± 0,36
	70% 50°C	1,00	2,86 ± 0,24	3,88 ± 0,07	4,65 ± 0,37	5,16 ± 0,66	5,37 ± 0,43
	Ca 70% 30°C	1,00	2,96 ± 0,00	4,18 ± 0,05	5,10 ± 0,00	5,81 ± 0,05	6,33 ± 0,11
Sorbitol	30% 30°C	1,00	1,44 ± 0,01	1,88 ± 0,10	2,20 ± 0,21	2,68 ± 0,16	2,79 ± 0,16
	30% 50°C	1,00	1,83 ± 0,05	2,31 ± 0,11	2,84 ± 0,00	3,11 ± 0,15	3,18 ± 0,25
	50% 30°C	1,00	2,09 ± 0,12	2,64 ± 0,06	3,61 ± 0,23	4,22 ± 0,11	4,78 ± 0,05
	50% 50°C	1,00	2,76 ± 0,31	3,66 ± 0,74	4,54 ± 0,56	4,98 ± 0,74	5,36 ± 0,81
	70% 30°C	1,00	2,47 ± 0,04	3,19 ± 0,24	4,63 ± 0,52	5,86 ± 0,67	6,76 ± 0,38
	70% 50°C	1,00	2,91 ± 0,03	4,06 ± 0,15	5,17 ± 0,31	5,65 ± 0,07	5,90 ± 0,09
	Ca 70% 30°C	1,00	2,56 ± 0,24	3,36 ± 0,04	4,72 ± 0,27	5,94 ± 0,73	6,49 ± 0,63

Como esperado, o conteúdo de  $SS$  aumentou com a concentração e com o tempo de operação para todos os tratamentos. O maior aumento ( $SS_t/SS_0$ ) para o glicerol foi na concentração de 70% a 30°C com incremento de  $5,79 \pm 0,36$  em relação à amostra inicial (branqueada). Dionello *et al.* (2007) observaram um aumento de 3 a 4 vezes no teor de sólidos solúveis de abacaxi, osmodesidratado com 0,4 a 0,47 g/mL de soluções de açúcar invertido e sacarose a 40 e 50°C.

Devido aos grandes desvios obtidos, possivelmente pelo reuso das soluções, somente os tratamentos com 50% de sorbitol apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre si, sendo verificado o aumento de sólidos solúveis com o aumento da temperatura. A Tabela 6 do segundo artigo apresenta a ANOVA da variação dos sólidos solúveis do processo osmótico de yacon para ambos os solutos. Nela se observa que tanto a concentração como a temperatura da solução osmótica mostraram efeito significativo ( $p < 0,05$ ) sobre o aumento de sólidos solúveis. Apenas para a solução de glicerol a interação dos fatores não tiveram um efeito significativo sobre o ganho de sólidos solúveis.

Não houve diferença significativa no teor de sólidos solúveis quando o lactato de cálcio foi utilizado, em comparação com os tratamentos nas mesmas condições porém sem a adição do sal.

### 6.2.7 Teor de Cálcio

A Tabela 6.13 apresenta os resultados da análise de cálcio determinado por absorção atômica nas amostras de yacon *in natura* e após desidratação osmótica com 2% de lactato de cálcio. Verifica-se que a adição do sal de cálcio à solução osmótica ocasionou a incorporação do  $\text{Ca}^{2+}$  nas amostras tratadas, isto resultou no aumento estatisticamente significativo ( $p < 0,05$ ) do teor de cálcio nas amostras de todos os tratamentos em que o sal foi utilizado, alcançando valores de quase 6,5 vezes maiores do que na raiz fresca. Analisando-se isoladamente as amostras osmodesidratadas com adição do lactato de cálcio, foi possível verificar que a amostra tratada com glicerol apresentou aumento de  $6,33 \pm 0,93$  vezes de cálcio, enquanto que a tratada com sorbitol aumentou  $4,86 \pm 0,35$  vezes ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 6.13** – Teor de Cálcio nas amostras de yacon antes e após tratamento com lactato de cálcio

Amostra	Teor de Cálcio (mg Ca / 100 g ms yacon)
Yacon <i>in natura</i>	$81,31 \pm 5,12^a$
Tratada com glicerol 70% 30°C e 2% lactado de cálcio	$514,63 \pm 75,79^b$
Tratada com sorbitol 70% 30°C e 2% lactado de cálcio	$395,57 \pm 28,74^b$

ms = matéria seca. Médias seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes.

Quando avaliado o efeito do lactato de cálcio na DO nos tratamentos realizados com 70% de soluto a 30 °C observa-se que estes apresentaram a maior perda de massa entre todos os testes (Figura 1 do segundo artigo e Tabela 6.6 deste capítulo), entretanto, o uso de cálcio não melhorou a transferência de massa de água durante o processo de desidratação osmótica, sendo que para a umidade normalizada (Figura 2 do segundo artigo e Tabela 6.7 deste capítulo), o uso de lactato de cálcio não foi significativamente diferente ( $p > 0,05$ ) do tratamento com a mesma concentração de até duas horas e, depois de quatro horas mostrou desidratação ainda mais baixa do que os tratamentos com 70% de glicerol a 30 °C, sem adição do agente ternário. Para ambos os tratamentos com lactato de cálcio, a perda de água adimensional ficou abaixo dos tratamentos com as mesmas condições, porém sem a inclusão do sal (Figura 6.1).

Entretanto, o uso do sal de cálcio pode ter fortalecido a estrutura do tecido. Este resultado pode ser explicado em termos da capacidade do cálcio para aumentar a rigidez e a

fragilidade da rede celular (GRAS *et al.*, 2003), reduzindo assim a capacidade das células para se deformarem e relaxarem. Isso também reduz o fluxo de água e de sólidos solúveis iniciadas por fenômenos de deformação-relaxamento (BARRERA *et al.*, 2009).

### 6.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para observar as mudanças na estrutura das amostras a fim de observar o efeito dos tratamentos osmóticos sobre a microestrutura. A Figura 6a do segundo artigo mostra a imagem do tecido yacon fresco, onde há a presença de células alongadas, túrgidas e com formato poliédrico, com parede celular definida (claras devido ao corte efetuado na amostra de yacon, indicado por setas contínuas), e presença de espaços intercelulares (circulado). O plasmalema (indicado por setas hachuradas) aparece associado à parede celular. O plasmalema pode ser diferenciado em algumas células, onde a parede da célula foi separada durante o corte da amostra. Depois de branqueamento (Fig. 6b do segundo artigo), é possível observar a perda da turgescência e da perda parcial da forma poliédrica, devido à redução do tamanho da célula. De acordo com Aguilera e Stanley (1999), o turgor é perdido quando frutas ou vegetais deixam de receber água ou de respirar. A aplicação de branqueamento danificou a estrutura da parede celular, deixando as células mais permeáveis. Este efeito foi o responsável pela consequente redução no conteúdo de água. Rastogi e Niranjana (1998) observaram o mesmo comportamento quando pré-trataram abacaxi a alta pressão para a desidratação osmótica.

As Figuras 6c e 6d do segundo artigo são muito semelhantes, uma vez que mostram a matriz yacon preenchida com as soluções osmóticas. Verificou-se que o tratamento osmótico, tanto com glicerol quanto com sorbitol, sem adição de cálcio resultou em danos graves para a estrutura da célula de yacon. O tecido mostrou forte plasmólise causada pela perda de água a partir do citoplasma, além de células deformadas e colapsadas, o aspecto não-túrgido das células foi claramente observado. Pode ser estabelecida uma relação qualitativa entre os perfis de concentração e do grau de perturbação celular no tecido osmodesidratado. Micrografias de tecido yacon osmodesidratado (Fig. 6c e 6d do segundo artigo), mostraram claramente diferentes graus de alteração celular e colapso (SALVATORI *et al.*, 1998). Resultado semelhante foi observado por Vieira (2010), que encontrou um grave dano estrutural causado

pela desidratação osmótica de goiabas com soluções de sacarose. A autora observou uma plasmólise celular intensa e grande colapso celular.

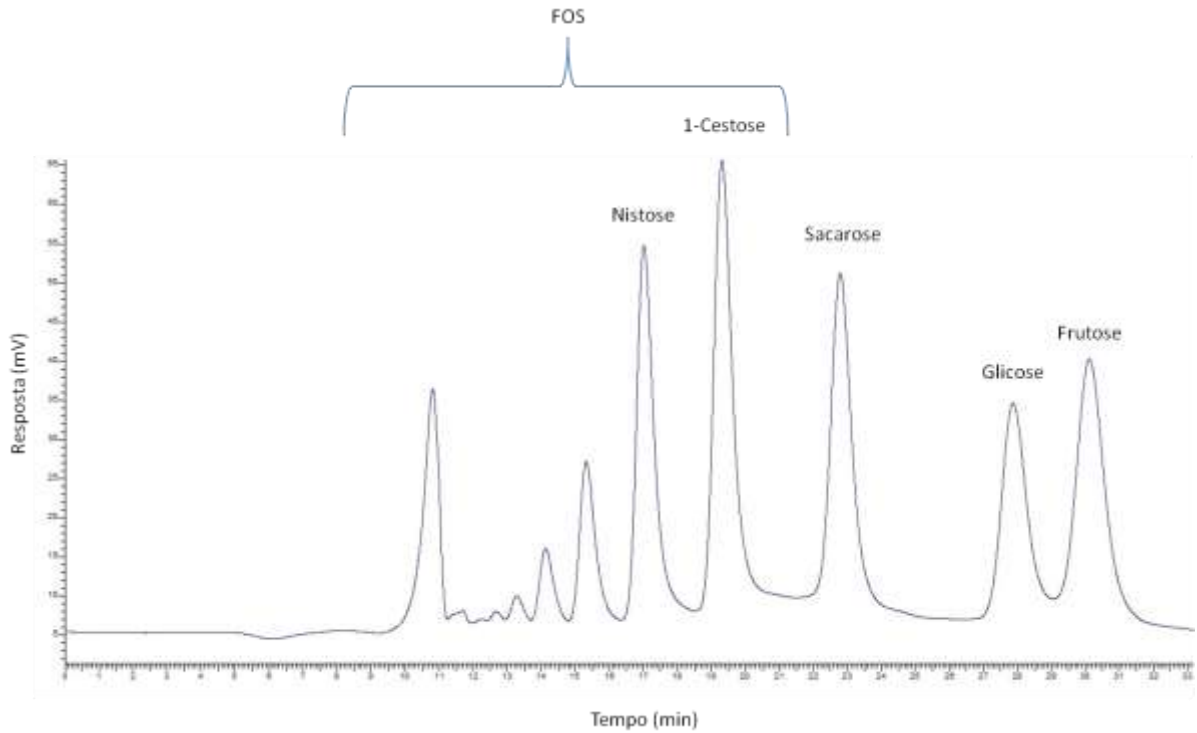
Nas Figuras 6e e 6f do segundo artigo é possível observar o lactato de cálcio aderido à superfície do tecido, sendo mais evidente a presença de sal na amostra tratada com o glicerol, o qual pode ser verificado pelas pontos brancos pequenos e grandes na micrografia. A adição de lactato de cálcio às soluções osmóticas melhorou a preservação da estrutura da célula, reforçando a parede da célula para os dois solutos quando comparados com as figuras 6c e 6d do segundo artigo que mostram o tecido desprotegido. O efeito benéfico da adição de sais de cálcio contra os danos causados pela desidratação osmótica da estrutura da célula também foi observado no trabalho de Vieira (2010) com goiabas.

#### **6.2.9 Análise de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)**

Foi realizada análise cromatográfica (HPLC) nas amostras de yacon *in natura*, branqueadas e ao final de 6 horas de imersão na solução osmótica para todas as duplicatas dos 14 tratamentos realizados. O perfil cromatográfico do yacon *in natura* encontra-se na Figura 6.3. No cromatograma, foram identificados os fruto-oligossacarídeos (FOS) nistose e 1-cestose, o dissacarídeo sacarose e os monossacarídeos glicose e frutose; ainda, é possível identificar maior concentração de FOS em relação aos outros açúcares na amostra *in natura*.

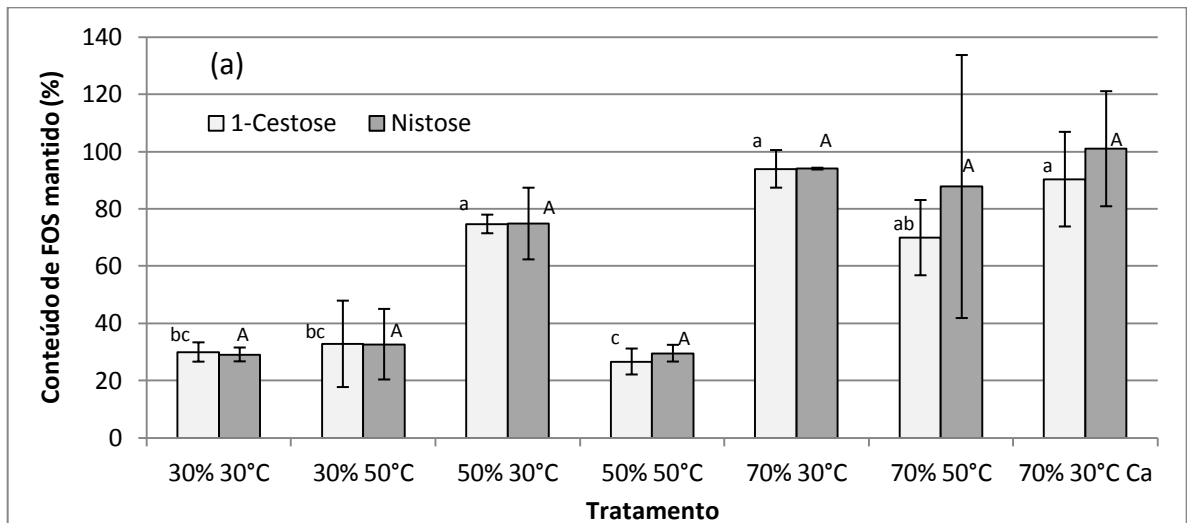
A Figura 6.4 apresenta o percentual de área dos picos de 1-cestose (*GP* 3) e nistose (*GP* 4) após desidratação osmótica de yacon quando comparado à amostra no início do processo (amostra branqueada) para os solutos (a) glicerol e (b) sorbitol.

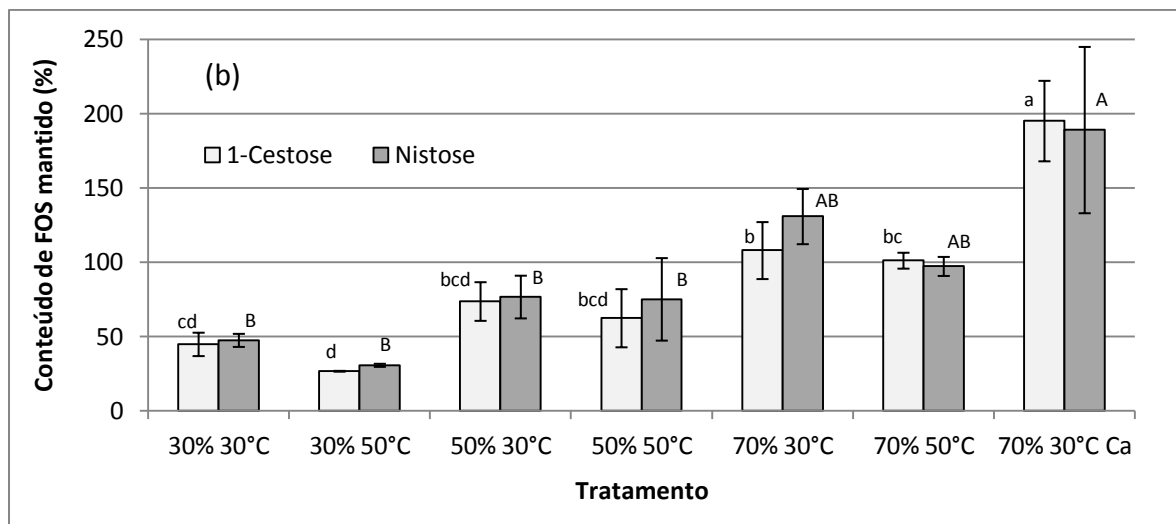
**Figura 6.3** – Perfil cromatográfico de amostra fresca de yacon



**Figura 6.4** – Porcentagem de retenção de 1-cestose e nistose após DO de yacon: (a) glicerol, (b) sorbitol

Barras de um mesmo componente seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes.





Para ambos os solutos, os valores de 1-cestose e nistose mostraram-se muito próximos entre si para um mesmo tratamento. Os tratamentos realizados com sorbitol mostraram respostas de maior grandeza. As barras de erro se mostraram grandes devido à variabilidade das amostras iniciais e, possivelmente, ao reuso da solução osmótica.

Os tratamentos realizados a 50 e 70% de glicerol (Figura 6.4a) mantiveram maior concentração de 1-cestose na temperatura de 30°C. Também, foi possível verificar que houve aumento da retenção deste fruto-oligossacarídeo com o aumento da concentração da solução osmótica; isto pode ser devido à maior transferência de massa provocada pelo maior gradiente de concentração gerado por concentrações maiores, que pode ter acarretado em maior hidrólise dos FOS de cadeia mais longa que acabaram originando FOS de GP 3 e 4, portanto aumentando o conteúdo destes últimos FOS. Para o sorbitol (Figura 6.4b), a ideia de que a concentração de 1-cestose e de nistose é mantida devido à quebra de outros FOS de cadeia maior do que GP 3 e 4 é reforçada pelos valores percentuais maiores do que 100%. Com o aumento da temperatura, para uma mesma concentração, foi possível verificar que para a maioria dos tratamentos a concentração dos dois FOS diminuiu. Isto pode ser devido à maior difusão dos FOS do yacon para a solução osmótica. Outra explicação pode ser a ocorrência de hidrólise da inulina com o aumento da temperatura. Caso a inativação enzimática da inulinase não tenha sido eficiente, isto pode ter provocado posterior hidrólise enzimática da inulina, o que é maximizado com o aumento da temperatura, fato verificado por Cazetta *et al.* (2005) com atividade enzimática ótima da inulinase a 60 °C. O mesmo foi observado por Pessoa e Vitolo (1999 apud CAZETTA *et al.*, 2005) com atividade máxima da enzima a 50 e 60°C. Ainda quanto à temperatura, Scher *et al.* (2009) avaliaram o efeito da temperatura de secagem



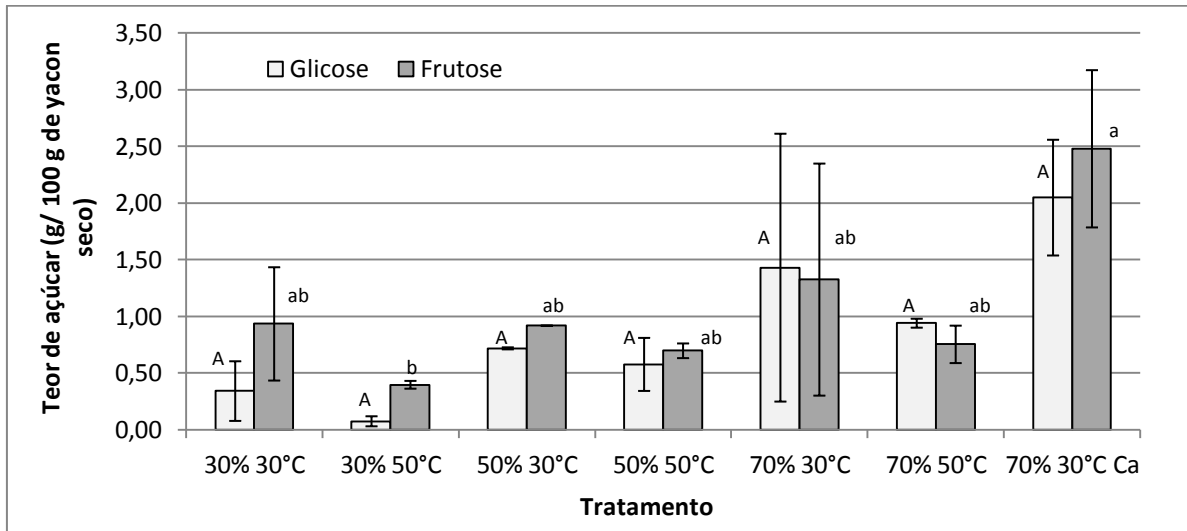
na concentração dos açúcares não-redutores do yacon e observaram que a 70 °C a concentração desses açúcares diminuiu significativamente ( $p < 0,05$ ) em relação às secagens realizadas a 50 e 60 °C. Segundo os autores, estes resultados podem ter indicado a ocorrência de hidrólise dos FOS a 70 °C, devido ao aumento significativo dos açúcares redutores nessa temperatura.

Para ambos os solutos, foi possível verificar que o uso do lactato de cálcio exerceu efeito importante no sentido de maiores concentrações de 1-cestose e de nistose, principalmente para o sorbitol. Isto pode ter ocorrido devido à fortificação da estrutura do tecido e ao consequente bloqueio da parede celular do yacon com o cálcio, evitando a transferência de massa dos FOS para a solução osmótica.

A Figura 6.5 apresenta a concentração final de glicose e de frutose após desidratação osmótica de yacon com solução de glicerol. As barras de erro se mostraram grandes devido à variabilidade das amostras iniciais e, possivelmente, ao reuso da solução osmótica.

**Figura 6.5** – Concentração de glicose e frutose após DO de yacon com solução de glicerol

Barras de um mesmo componente seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes.



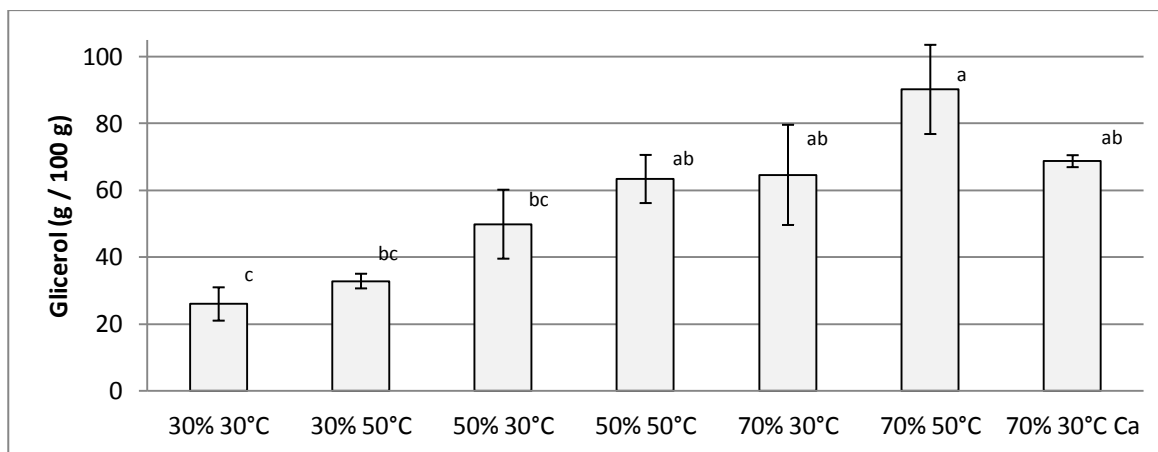
Observa-se uma tendência de aumento das concentrações de glicose e frutose com o aumento da concentração da solução osmótica de glicerol. Isto pode ter ocorrido devido ao aumento do gradiente de concentração da solução osmótica, provocando maior transferência de massa de água do yacon para a solução o que pode ter resultado em hidrólise dos FOS,

liberando os monossacarídeos, o mesmo que foi observado por Scher *et al.* (2009) na secagem de yacon a 70 °C. Com o aumento da temperatura houve a diminuição da concentração dos monossacarídeos nas amostras de yacon, indicando a migração dos mesmos para a solução osmótica.

Todos os tratamentos não diferiram significativamente quanto à concentração de glicose segundo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Já para a frutose, a grande maioria dos tratamentos teve resposta similar ( $p > 0,05$ ).

Finalmente, a Figura 6.6 apresenta a concentração final de glicerol após desidratação osmótica de yacon com solução de glicerol. No gráfico se observa o aumento da concentração de glicerol no yacon com o aumento da concentração e da temperatura da solução osmótica de glicerol, indicando maior transferência de massa do glicerol (da solução para os discos de yacon) em ambas as situações. A maior incorporação de glicerol foi obtida no tratamento a 70% de concentração de solução osmótica a 50°C e a menor para o tratamento com concentração de 30% a 30°C.

**Figura 6.6** – Concentração de glicerol após DO de yacon com solução de glicerol  
Barras de um mesmo componente seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes.



## Capítulo 7 – CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi estudada a desidratação osmótica de yacon usando-se solutos alternativos à sacarose: glicerol, sorbitol, polidextrose e maltodextrina. Dos quatro solutos testados, o glicerol e o sorbitol apresentaram melhores resultados de desidratação do yacon, sendo utilizados no planejamento experimental do trabalho. Nessa etapa, foram trabalhadas com as concentrações de 30 a 70% de solução osmótica aquecida a 30 e a 50°C; e a condição de 70% de concentração a 30°C também repetida adicionando-se 20 g/L de lactato de cálcio como agente ternário à solução osmótica.

De todo o estudo realizado, foi verificado que:

- o glicerol e o sorbitol são preferíveis para a desidratação osmótica do yacon em relação à polidextrose e à maltodextrina (esta última não apresentou características de agente osmótico para o yacon);
- o glicerol conferiu maior redução de atividade de água do que o sorbitol;
- o modelo de Peleg (1988) e a Segunda Lei de Fick mostraram-se adequados para os cálculos da umidade de equilíbrio e da estimação da difusividade mássica efetiva da água respectivamente;
- o lactato de cálcio não exerceu efeito sobre a desidratação osmótica no sentido de perda de umidade e de atividade de água, porém fortaleceu a estrutura do tecido (uma vez que houve ganho sensorial quanto à textura) e enriqueceu nutricionalmente os discos de yacon em que foi adicionado;
- verificou-se a perda de fruto-oligossacarídeos de cadeia longa em decorrência do aumento de 1-cestose, nistose, glicose e frutose nas amostras osmodesidratadas em alguns tratamentos.

### ***7.1 Sugestões para trabalhos futuros***

Seria interessante, em um próximo trabalho:

- avaliar a atividade de água da solução osmótica a fim de calcular a pressão osmótica da mesma;

- analisar a composição da solução osmótica, a fim de verificar se o reuso da solução osmótica está desfavorecendo os resultados das duplicatas e, também, para avaliar a transferência de massa dos açúcares do yacon, reconhecendo possível valor agregado da solução osmótica para uso em caldas, geléias e afins;

- avaliar a incorporação de solutos, calculando sua difusividade mássica efetiva;

- testar a desidratação com outros sais na solução ternária;

- refazer análise cromatográfica;

- realizar tratamento posterior à desidratação osmótica, a fim de deixar o yacon próprio para consumo e testá-lo sensorialmente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILERA, José Miguel; STANLEY, David W. **Microstructural Principles of Food Processing and Engineering**. 2 ed. Gaithersburg, Maryland: Aspen, 1999. 432 p.
- ALVAREZ, C. A. et al. Air dehydration of strawberries: effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. **Journal of Food Engineering**, v. 25, p. 167-178, 1995.
- ANDERSON, J.W. Dietary fiber and human healthy. **Horticultural Science**, v. 25, p. 1488-1495, 1990.
- AOAC. 1990, 2000, 2002. **Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists**, Washington, DC.
- AZCÓN-BIETO, J.; TALÓN, M. **Fundamentos de Fisiología Vegetal**. Capítulo 14, MacGraw-Hill Interamerica y Universitat de Barcelona. pp. 217–233, 2000.
- AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 291–295, 2004.
- AZUARA, E., FLORES, E. and BERISTAIN, C. I. Water diffusion and concentration profiles during osmodehydration and storage of apple tissue. **Food and Bioprocess Technology**, v. 2, p. 361–367, 2009.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of foods**. New York: Chapman & Hall, 1996. 330 p.
- BARRERA, C.; BETORET, N.; FITO, P.  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  influence on the osmotic dehydration kinetics of apple slices (Var Granny Smith). **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 9–14, 2004.
- BARRERA, C; Betoret, N; Corell, P.; FITO, P. Effect of osmotic dehydration on the stabilization of calcium-fortified apple slices (var. Granny Smith): Influence of operating variables on process kinetics and compositional changes. **Journal of Food Engineering**, v. 92, p. 416–424, 2009.
- BEATRIZ, A.; ARAÚJO, Y. J. K; LIMA, D. P. Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas. **Química Nova**, v. 34, p. 306-319, 2011.
- BELLARY, A. N.; SOWBHAGYA, H. B. and RASTOGI, N. K. Osmotic dehydration assisted impregnation of curcuminoids in coconut slices. **Journal of Food Engineering**, v. 105, p. 453–459, 2011.
- BÖHM, A.; KAISER, I.; TREBSTEIN, A.; HENLE, T. Heat-induced degradation of inulin. **Eur. Food Res. Technol.**, v. 220, p. 466–471, 2005.
- BORNET, F.R.J. Undigestible sugars in food products. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 59, p. 763S-769S, 1994.
- BURDOCK, G. A.; FLAMM, W. G. A Review of the Studies of the Safety of Polydextrose in Food. **Food and Chemical Toxicology**, v. 37, p. 233-264, 1999.

CABELLO, Cláudio. Extração e pré-tratamento químico de frutanos de yacon, *Polymnia sonchifolia*. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 2, p. 202-207, 2005.

CASTELLÓ, M.L.; IGUAL, M.; FITO, P.J.; CHIRALT, A. Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (Var. Granny Smith). **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 1-9, 2009.

CAZETTA, M. L.; MARTINS, P. M. M.; MONTI, R.; CONTIERO, J. Yacon (*Polymnia sanchifolia*) extract as a substrate to produce inulinase by *Kluyveromyces marxianus* var. *bulgaricus*. **J. Food Eng.**, v. 66, p. 301-305, 2005.

CHENLO, F.; MOREIRA, R.; FERNÁNDEZ-HERRERO, C.; VÁZQUEZ G. Mass transfer during osmotic dehydration of chestnut using sodium chloride solutions. **Journal of Food Engineering**, v. 73, p. 164–173, 2006.

CHUN, H.H.; KIM, M.S.; CHUNG, K.S.; WON, M.; SONG, K.B. Dehydration of Blueberries Using Maltodextrin and the Physicochemical Properties of Dried Blueberries. **Hort. Environ. Biotechnol**, v. 53, p. 565-570, 2012.

CODEX Alimentarius. **FAO / WHO Food Standards**. GSFA Online. Disponível em: <<http://www.codexalimentarius.net/gsfaonline/index.html>> Acesso em: 25 ago. 2012.

CORZO, O.; BRACHO, N. Application of Peleg's model to study mass transfer during osmotic dehydration of sardine sheets. **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 535–541, 2006.

CORZO, O., BRACHO, N., RODRÍGUEZ, J., GONZÁLEZ, M. Predicting the moisture and salt contents of sardine sheets during vacuum pulse osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 781–790, 2007.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2 Ed. Oxford: Clarendon, 1975. 414 p.

CRUZ, Rui M. S.; VIEIRA, Margarida C.; SILVA, Cristina L. M. Effect of heat and thermosonication treatments on peroxidase inactivation kinetics in watercress (*Nasturtium officinale*). **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 8–15, 2006.

DIONELLO, R. G. *et al.* Desidratação por imersão-impregnação de abacaxi em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 4, p. 701-709, 2007.

EL-AOUAR, A. A.; AZOUBEL, P. M.; BARBOSA JR, J. L.; MURR, F. E. X. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 267–274, 2006.

ESCOBAR, Mayra Paredes; GALINDO, Federico Gómez; WADSÖ, Lars; NÁJERA, Jenny Ruales; SJÖHOLM, Ingegerd. Effect of long-term storage and blanching pre-treatments on the osmotic dehydration kinetics of carrots (*Daucus carota* L. cv. Nerac). **Journal of Food Engineering**, v. 81, p. 313–317, 2007.

FANTE, L.; SCHER, C.F.; NOREÑA, C.P.Z; RIOS, A.O. Study of enzyme inactivation using steam in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) roots. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 37, p. 16-24, 2013.

FELLOWS, Peter J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.

FENNEMA, O.R. **Química de Alimentos**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

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

GIOVANELLI, G. et al. Effects of blanching pre-treatment and sugar composition of the osmotic solution on physico-chemical, morphological and antioxidant characteristics of osmodehydrated blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). **Food Research International**, v. 49, p. 263–271, 2012.

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

GOTO, K.; FUKAI, K.; HIKIDA, J.; NANJO, F.; HARA, Y. Isolation and Structural Analysis of Oligosaccharides from Yacon (*Polymnia sonchifolia*). **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 59, p. 2346-2347, 1995.

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

GRAS, M. L. *et al.* Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation interactions with cellular matrix. **Journal of Food Engineering**, v. 56, p. 279–284, 2003.

HABIB, N. C.; HONORÉ, S.M.; GENTA, S.B.; SÁNCHEZ, S.S. Hypolipidemic effect of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots on diabetic rats: Biochemical approach. **Chemico-Biological Interactions**, v. 194, p. 31-39, 2011.

HEREDIA, A.; BARRERA, C.; ANDRÉS, A. Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 111–118, 2007.

HERMANN, M.; FREIRE, I.; PAZOS, C. **Compositional diversity of the yacon storage root**. In: CIP PROGRAM REPORT, p. 425-432, 1997 e 1998, Lima, Peru, Anais.

IANNITTI, T.; PALMIERI, B. Review: Therapeutical use of probiotic formulations in clinical practice. **Clinical Nutrition**, v. 29, p. 701-725, 2010.

JOHANSSON, I.; LARSSON, C.; EK, B.; KJELLBOM, P. The major integral proteins of spinach leaf plasma membranes are putative aquaporins and are phosphorylated in response to  $\text{Ca}^{2+}$  and apoplastic water potential. **The Plant Cell**, v. 8, p. 1181–1191, 1996.

JOKIĆ, A.; ZAVARGO, Z.; GYURA, J.; PRODANIC, B. Possibilities to control solid uptake during osmotic dehydration of sugar beet. In **Progress in Food Engineering Research and Development** (Jerrod M. Cantor, ed.) pp. 243-261, Nova Science Publishers: Hauppauge, NY, 2008.

KHIN, Mya Mya; ZHOU, Weibiao; PERERA, Conrad O. Impact of process conditions and coatings on the dehydration efficiency and cellular structure of apple tissue during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 817–827, 2007.

KHIN, Mya Mya; ZHOU, Weibiao; YEO, Shi Yun. Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes by using maltodextrin as the coating material and their textural properties. **Journal of Food Engineering**, v. 81, p. 514–522, 2007.

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

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

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

LAGO, C. C.; BERNSTEIN, A., BRANDELLI, A., NOREÑA, C. P. Z. Characterization of Powdered Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) Juice and Pulp. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, p. 2183-2191, 2012.

LEONETI, A. B.; ARAGÃO-LEONETI, V.; OLIVEIRA, S. V. W. B. Glycerol as a by-product of biodiesel production in Brazil: Alternatives for the use of unrefined glycerol. **Renewable Energy**, v. 45, p. 138-145, 2012.

LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. **Drying Technology**, v. 14, p. 391–413, 1996.

LUPETTI, K.O. et al. Análise de imagem em química analítica: empregando metodologias simples e didáticas para entender e prevenir o escurecimento de tecidos vegetais. **Química Nova**, São Carlos, v. 28, n. 3, p. 548-554, 2005.

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

MANRIQUE, I.; PÁRRAGA, A.; HERMANN, M. **Jarabe de Yacon: Principios y Procesamiento**. Series: Conservacion y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos andinos: Uma década de investigación para el desarrollo (1993–2003). 8A. International Potato Center Universidad Nacional Alcides Carrión. Erbacher Foundation. Lima, Peru: Swiss Agency for Development and Cooperation, pp. 31, 2005.

MARTÍN-DIANA, A. B. et al. Calcium for extending the shelf life of fresh whole and minimally processed fruits and vegetables: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 18, p. 210-218, 2007.

MERCALI, G. D. **Estudo da transferência de massa na desidratção osmótica de banana (*Musa sapientum*, shum.)**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. Dissertação, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

MERCALI, G. D.; MARCZAK, L. D. F.; TESSARO, I. C.; NOREÑA, C. P. Z. Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, shum.). **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 82-91, 2011.

MEYER, D.; BAYARRI, S.; TÁRREGA, A.; COSTELL, E. Inulin as texture modifier in dairy products. **Food Hydrocolloids**, v. 25, n. 8, p. 1881-1890, dez. 2011.



- MORAGA, M.J.; MORAGA, G.; FITO, P.J.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Effect of vacuum impregnation with calcium lactate on the osmotic dehydration kinetics and quality of osmodehydrated grapefruit. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 3, p. 372–379, 2009.
- MORAGA, M.J.; MORAGA, G.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Effect of the re-use of the osmotic solution on the stability of osmodehydro-refrigerated grapefruit. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 35-41, 2011.
- MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; VÁZQUEZ, G. Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, p. 1507–1514, 2007.
- MORENO, J. et al. Effect of blanching/osmotic dehydration combined methods on quality and stability of minimally processed strawberries. **Food Research International**, v. 33, p. 609-616, 2000.
- OJANSIVU, Ilkka; FERREIRA, Celia Lucia; SALMINEN, Seppo. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. **Trends in Food Science & Technology**, v. 22, p. 40-46, 2011.
- OSORIO, Coralía *et al.* Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 8, p. 353–359, 2007.
- OZDEMIR, M; OZEN, B. F.; DOCK, L. L.; FLOROS, J. D. Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, p. 2044-2050, 2008.
- PASSOS, L. M. L.; PARK, Y. K. Frutooligosacarídeos: implicações na saúde humana e utilização em alimentos. **Ciência Rural**, v. 33, p. 385–390, 2003.
- PATEL, Seema; GOYAL, Arun. The current trends and future perspectives of prebiotics research: a review. **3 Biotech**, v. 2, n. 2, p. 115-125, 2012.
- PELEG, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, 1216-1219.
- RAOULT-WACK, A. L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 5, p. 255-260, 1994.
- RASTOGI, N. K.; ANGERSBACH, A.; KNORR, D. Valuation of mass transfer mechanisms during osmotic treatment of plant materials. **Journal of Food Science**, v. 65, p. 1016-1021, 2000.
- RASTOGI, N. K.; NIRANJAN, K. Enhanced Mass Transfer During Osmotic Dehydration of High Pressure Treated Pineapple. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 3, p. 508-511, 1998.
- RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 34, p. 429-440, 1997.
- RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN, K. **Emerging Technologies for Food Processing**. Cap. 9: Developments in Osmotic Dehydration. p. 222-249, 2005.

RIZZOLO, Anna *et al.* Headspace volatile compounds during osmotic dehydration of strawberries (cv Camarosa): Influence of osmotic solution composition and processing time. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, p. 529–535, 2007.

ROSA, M. C.; GIROUX, F. Osmotic treatments (OT) and problems related to the solution management. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 223-236, 2001.

RÓZEK, Aleksandra *et al.* Grape phenolic impregnation by osmotic treatment: Influence of osmotic agent on mass transfer and product characteristics. **Journal of Food Engineering**, v. 94, p. 59-68, 2009.

SAFTNER, R.A.; BAI, J.; ABBOTT, J.; LEE, Y. Sanitary dips with calcium propionate, calcium chloride, or a calcium amino acid chelate maintain quality and shelf stability of fresh-cut honeydew chunks. **Postharvest Biology and Technology**, v. 29, p. 257–269, 2003.

SALVATORI, D.; ANDRÉS, A.; ALBORS, A.; CHIRALT, A.; FITO, P. Structural and Compositional Profiles in Osmotically Dehydrated Apple. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 4, p. 606-610, 1998.

SANTANA, Isabelle; CARDOSO, Marisa Helena. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.3, p.898-905, mai-jun 2008.

SCHER, C.F.; RIOS, A.O.; NOREÑA, C.P.Z. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. **Int. J. Food Sci. Technol.**, v. 44, p. 2169-2175, 2009.

SCHMIDT, F.C.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 553–559, 2009.

SEMINÁRIO, J.; VALDERRAMA, M.; MANRIQUE, I. El Yacon: fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio. **Centro Internacional de La Papa (CIP)**, Universidad Nacional de Cajamarca, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), Lima, Perú, 60 p.

SHI, J.; LE MAGUER, M. Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects. **Food Reviews International**, v. 18, n. 4, p. 305–335, 2002.

SINGH, Bahadur; PANESAR, Parmjit S.; NANDA, Vikas; KENNEDY, John F. Optimisation of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. **Food Chemistry**, v. 123, p. 590–600, 2010.

TOGRUL, I. T.; ISPIR, A. Equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of apricot. **Food and Bioproducts Processing**, v. 86, p. 254–267, 2008.

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. 3 Ed. New York: Springer, 2007. 579 p.

TONELI, J. C. L.; MÜRR F. E. X.; MARTINELLI, P.; FABBRO, I. M. D.; PARK, K. J. Optimization of a physical concentration process for inulin. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 832-838, 2007.

TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research International**, v. 26, p. 59-68, 1993.

TORRES, J. D.; TALENS, P.; ESCRICHE, I.; CHIRALT, A. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. **Journal of Food Engineering**, v. 74, p. 240–246, 2006.

TORRES, J.D.; CASTELLÓ, M.L.; ESCRICHE, I.; CHIRALT, A. Quality characteristics, respiration rates and microbial stability of osmotically treated mango tissue (*Mangifera indica* L.) with or without calcium lactate. **Food Science and Technology International**, v. 14, n. 4, p. 355–365, 2008.

TYERMAN, S.D.; BOHNERT, H.J.; MAUREL, C.; STEUDLE, E.; SMITH, J.A.C. Plant aquaporins, their molecular biology, biophysics and significance for plant water relations. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, p. 1055–1071, 1999.

VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. *Smallanthus sonchifolius* and *Lepidium meyenii* – prospective Andean crops for the prevention of chronic diseases. **Biomedical Papers**, Czech Republic, v.147, n.2, p.119-130, 2003.

VALLE, J. M. del; ARÁNGUIZ, V.; LEÓN, H. Effects of blanching and calcium infiltration on PPO activity, texture, microstructure and kinetics of osmotic dehydration of apple tissue. **Food Research International**, v. 31, n. 8, p. 557-569, 1998.

VICTORY. **High-Tech D.C. Victory Biology Engineering (Zhuhai) Co. Ltd.** Zhuhai, China. Disponível em: <<http://www.vitafos.com/company.asp?id=10>> Acesso em: 04 jul. 2013.

VIEIRA, G. S. **Otimização do processo de desidratação osmótica de goiaba e avaliação do uso de pulso de vácuo e sais de cálcio.** Campinas: UNICAMP, 2010. Dissertação, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2010.

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

WAKABAYASHI, K. Changes in cell wall polysaccharides during fruit ripening. **Journal of Plant Research**, v.113, p.231-237, 2000.

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

ZULETA, A., SAMBUCETTI, E. Inulin determination for food labeling. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 10, p. 4570-4572, 2001.