



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

Anahi Bernstein

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E DE IMAGEM
DO YACON (*Smallanthus sonchifolius*) DURANTE A SECAGEM

Porto Alegre

2011/2

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E DE IMAGEM
DO YACON (*Smallanthus sonchifolius*) DURANTE A SECAGEM**

Anahi Bernstein

Monografia apresentada ao curso de
Engenharia de Alimentos para obtenção do
título de Engenheiro de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Caciano Pelayo Zapata
Noreña

Porto Alegre

2011/2

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E DE IMAGEM
DO YACON (*Smallanthus sonchifolius*) DURANTE A SECAGEM**

Anahi Bernstein

Aprovado em / /

BANCA EXAMINADORA

.....

Prof. Dr. Caciano Pelayo Zapata Noreña

Pós-Doutor pelo Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos/Espanha

.....

Prof. Dra. Florencia Cladera-Olivera

Doutora em Engenharia Química DEQUI/UFRGS

.....

Engenheira Luciane Fante

Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos ICTA/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre me apoiou e me incentivou, mesmo que a distância, em especial aos meus pais e irmão por todo carinho e compreensão.

Aos colegas de curso que tornaram esta caminhada muito mais divertida, em especial à Mariana e à Júlia, que sempre estiveram me apoiando.

Às colegas do laboratório 116, pela amizade e por todos os ensinamentos durante o período em que fui bolsista.

Ao meu orientador, Prof. Caciano P. Z. Noreña, por todas as oportunidades durante a graduação e pela confiança e conhecimentos compartilhados.

À equipe do laboratório 213 pelo auxílio nas análises experimentais.

Aos professores e funcionários do Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, pela amizade e ensinamentos, essenciais para que esta conquista fosse possível.

RESUMO

Foram elaboradas as isotermas de sorção do yacon desidratado em ar quente a 50°C e calculadas as propriedades termodinâmicas, bem como analisadas as mudanças de volume decorrente da perda de umidade na secagem. Também foram feitas análises de cor e microscopia eletrônica de varredura para o yacon com e sem prévio branqueamento, desidratado em ar quente e liofilizado, em rodela e moído. Para isso, as raízes de yacon foram selecionadas, lavadas, descascadas e cortadas em rodela de $1\pm 0,35$ mm de espessura. No branqueamento as rodela foram distribuídas uniformemente em cestas e colocadas dentro de uma autoclave gerando vapor a 100°C durante 4 minutos, seguido de banho de gelo por 3 minutos. Os experimentos de secagem foram conduzidos em secador de ar forçado a 50°C nas primeiras 5 horas e a 75°C nas 5 horas seguintes. Para a liofilização, o yacon foi previamente congelado a -80°C e liofilizado à pressão de 64µmHg por 72 horas. Para os testes de variação de volume durante a secagem, o yacon foi cortado em cubos de 1mm³ e desidratado em ar forçado. Durante a secagem foram monitoradas a atividade de água, a umidade e o volume mediante escaneamento tridimensional com laser. Os experimentos de secagem em ar forçado indicaram altas taxas de perda de umidade e atividade de água nos primeiros 150 minutos de secagem, sendo os valores finais de umidade e atividade de água de $0,15\pm 0,071$ g/g de matéria seca e $0,38\pm 0,019$, respectivamente. A perda de volume (em torno de 87%) e a deformação foram bastante significativas durante o experimento de secagem, evidenciando a necessidade de considerar o fenômeno de encolhimento para a caracterização de modelos de secagem. Quanto às isotermas de sorção, o modelo de Henderson foi o que melhor ajustou os dados de sorção. As isotermas obtidas foram do tipo III, característico de produtos com alto teor de açúcares. A entalpia e a entropia diferenciais aumentam drasticamente para baixos conteúdos de umidade, e com o aumento de umidade, decrescem rapidamente até a curva de tornar assintótica. Nas amostras liofilizadas, em comparação às desidratadas por ar quente, o parâmetro L^* foi maior e os parâmetros a^* e b^* foram menores, obtendo-se amostras mais claras, esverdeadas e azuladas.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMENTOS | 4 |
| RESUMO | 5 |
| SUMÁRIO | 6 |
| LISTA DE FIGURAS | 7 |
| LISTA DE TABELAS | 7 |
| CAPÍTULO 1 | 9 |
| INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 Yacon | 10 |
| 1.2 Prebióticos | 11 |
| 1.3 Atividade de água | 12 |
| 1.4 Secagem | 12 |
| 1.5 Liofilização | 13 |
| 1.6 Isotermas de sorção..... | 14 |
| 1.7 Propriedades termodinâmicas..... | 16 |
| 1.8 Microscopia | 17 |
| 1.9 Escaneamento 3D..... | 17 |
| 1.10 Análise colorimétrica | 18 |
| 1.11 Objetivos | 20 |
| CAPÍTULO 2 | 21 |
| Análise das propriedades termodinâmicas e de imagem do yacon (<i>Smallanthus sonchifolius</i>) durante a secagem..... | 22 |
| REFERÊNCIAS | 47 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Representação dos 5 tipos de isotermas de sorção para alimentos descritos por BET | 14 |
| Figura 2. Coordenadas do sistema CIEL *a*b* | 18 |
| Figura 3. Umidade em função do tempo de secagem | 30 |
| Figura 4. Atividade de água em função do tempo de secagem | 30 |
| Figura 5. Imagens tridimensionais do yacon inteiro | 31 |
| Figura 6. Imagens tridimensionais do yacon em cubos <i>in natura</i> e desidratado | 32 |
| Figura 7. Razão entre volumes em função da razão entre umidades | 33 |
| Figura 8. Valores experimentais de umidade de equilíbrio em função da atividade de água para diferentes temperaturas | 33 |
| Figura 9. Isoterma de sorção do yacon | 35 |
| Figura 10. Entalpia diferencial de adsorção em função da umidade de equilíbrio do yacon..... | 36 |
| Figura 11. Entropia diferencial de adsorção em função da umidade de equilíbrio do yacon..... | 36 |
| Figura 12. Entalpia diferencial em função da entropia diferencial do yacon | 37 |
| Figura 13. Imagens microscópicas do yacon desidratado | 38 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Composição química média do yacon em base úmida | 10 |
| Tabela 2. Modelos de isotermas de sorção utilizados para o ajuste dos dados experimentais | 15 |
| Tabela 3. Dados de volume e umidade obtidos para as amostras <i>in natura</i> e desidratadas..... | 32 |
| Tabela 4. Valores estimados dos coeficientes obtidos através do ajuste aos modelos de sorção..... | 34 |
| Tabela 5. Parâmetros de cor do yacon <i>in natura</i> e moído, com e sem branqueamento | 39 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Yacon

O yacon (*Smallanthus sonchifolius*) é uma planta de origem andina, da família Asteraceae. Tem aparência semelhante a uma batata doce, sabor doce e polpa crocante, sendo geralmente consumido *in natura* (SANTANA & CARDOSO, 2008). Foi introduzido no Brasil no início dos anos 90, no interior de São Paulo, por agricultores brasileiros de origem japonesa (LAGO, 2010).

Possui grande quantidade de água e carboidratos. O percentual de água varia entre 83 e 90% do peso fresco, e devido a isso seu valor energético é baixo e sua vida útil em condições ambientes é reduzida para em torno de 7 dias (SANTANA & CARDOSO, 2008). Segundo Lachman *et al.* (2003), os carboidratos representam cerca de 70 a 80% da matéria seca das raízes.

As raízes recém colhidas possuem sabor insípido e amiláceo, porém após 3 a 5 dias de exposição ao sol ocorre a hidrólise dos frutanos, provocando aumento do teor de sacarose e frutose livres, tornando as raízes suculentas e doces (ZARDINI, 1991). Desta forma, quando destinadas ao consumo *in natura*, as raízes devem ser expostas ao sol para que ocorra o incremento do sabor doce, porém, quando destinadas ao consumo por diabéticos ou para obtenção de inulina e frutooligossacarídeos, devem ser processadas ou consumidas rapidamente (SILVA, 2007).

De acordo com Takenaka *et al.* (2003), as raízes de reserva de yacon possuem quantidades importantes de potássio, elevado teor de cálcio, compostos fenólicos derivados do ácido caféico, substâncias antioxidantes como ácido clorogênico e triptofano, e várias fitoalexinas com a atividade fungicida. Além de vitaminas, lipídios e outros compostos que podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição Química média do yacon em base úmida.

| Componentes | Composição (mg/100g) |
|--------------------|-----------------------------|
| Potássio | 334 |
| Fósforo | 34 |
| Cálcio | 12 |
| Magnésio | 8,4 |
| Sódio | 0,4 |
| Ferro | 0,2 |
| Vitamina B1 | 0,07 |
| Vitamina B2 | 0,31 |
| Vitamina C | 5,0 |
| β - caroteno | 0,13 |
| Polifenóis | 203 |

Fonte: Lachman *et al.* (2003)

O yacon apresenta uma coloração amarelo-clara à intensa, devido à presença de pigmentos carotenóides. Quando cortado, rapidamente adquire uma coloração esverdeada devido à presença de enzimas polifenoloxidasas. Essa reação deprecia o produto e pode ser controlada através da inativação da enzima pelo calor ou pelo uso de agentes redutores como o ácido ascórbico (YAN, 1999).

1.2 Prebióticos

Prebióticos são carboidratos não-digeríveis, incluindo a inulina e diversos tipos de oligossacarídeos, que afetam benéficamente o hospedeiro, pois estimulam seletivamente o crescimento e/ou atividade das bactérias desejáveis no cólon (SAAD, 2006).

As concentrações de inulina e frutooligossacarídeos no yacon podem chegar a até 20% do seu peso fresco (HAULY & MOSCATO, 2002). Em diversas outras plantas como alho, cebola, chicória e alcachofra-de-Jerusalém, também é possível encontrar estes compostos, porém em menores quantidades (VAN LOO *et al.*, 1995).

As diferenças nos tamanhos das cadeias da inulina e das oligofrutoses são também responsáveis pelas diferenças entre suas propriedades. Devido às cadeias mais longas, a inulina é menos solúvel que as oligofrutoses e possui capacidade de

formar microcristais quando misturada com água e leite. Estes microcristais interagem para formar uma mistura cremosa e macia, promovendo a sensação de presença de gordura. A inulina tem sido utilizada com sucesso como substituto da gordura em recheios prontos, sobremesas congeladas e molhos. Também melhora a textura e o sabor (MONTAN, 2003).

1.3 Atividade de água

O termo atividade de água indica a intensidade das forças que unem a água aos outros componentes não-aquosos e, conseqüentemente, a água disponível para o crescimento de microrganismos e para que se possam realizar diferentes reações químicas e bioquímicas (ORDÓÑEZ, 2005).

Quando se define a atividade de água é necessário especificar a temperatura, já que os valores são diretamente dependentes, pois uma vez que aumenta a temperatura, a atividade de água também aumenta porque cresce a pressão de vapor. Quando um alimento sofre congelamento, vão se formando cristais de gelo praticamente puros, enquanto que os solutos migram para a fase líquida, na qual se concentram cada vez mais. Portanto, a atividade de água dos alimentos congelados, isto é, na presença de gelo, depende fundamentalmente da temperatura, não importando o tipo de solutos que estejam presentes. Ao contrário, nos alimentos não congelados, ela depende, sobretudo, da composição e em menor quantidade da temperatura (ORDÓÑEZ, 2005).

1.4 Secagem

A secagem de alimentos é o método mais simples e de maior consumo de energia utilizado para a preservação de alimentos, na qual o produto é exposto a uma corrente de ar quente contínua, que promove a evaporação da umidade (RATTI, 2001). Este processo melhora a estabilidade do alimento uma vez que reduz consideravelmente a atividade de água do alimento, reduzindo a atividade microbiológica e minimizando mudanças físicas e químicas durante o armazenamento (MAYOR & SERENO, 2004; HATAMIPOUR, 2007).

Os principais objetivos pelos quais as indústrias de alimentos recorrem à secagem são: aumentar o período de conservação do alimento através da inibição do crescimento de microrganismos, da atividade de enzimas e de reações químicas devido à redução da atividade de água; reduzir o peso e o volume do alimento facilitando e reduzindo custos de estocagem e transporte; e obter novos produtos, com características sensoriais diferenciadas (LAGO, 2010).

A principal mudança física que ocorre durante a secagem por ar quente é a redução do volume externo, devido à perda de água e aquecimento. A mudança na forma, perda de volume e aumento da dureza são as principais causas de perda de qualidade do produto desidratado. A determinação de fatores que alterem a qualidade durante a desidratação é de extrema importância, uma vez que a constante demanda por alimentos de alta qualidade requer que os produtos desidratados mantenham a qualidade nutricional e organoléptica do produto fresco (MAYOR & SERENO, 2004).

O processo de secagem possui diferentes etapas: no início tem-se um período de taxa de secagem constante, até chegar a um teor de umidade crítico, sendo que depois desse ponto começa o período de secagem decrescente, que no caso de alimentos se dá por difusão, até atingir a umidade de equilíbrio (GEANKOPLIS, 1986).

1.5 Liofilização

A liofilização ou *freeze-drying* é um método de desidratação de materiais congelados pelo processo de sublimação sob alto vácuo, ou seja, ocorre a retirada da água do alimento sem submetê-lo a altas temperaturas, comuns nos processos de desidratação (MARTINS, 2000).

Esta técnica pode ser utilizada para desidratar alimentos líquidos como sucos e café, no entanto é mais utilizada na secagem de alimentos sólidos com alto valor agregado como cogumelos, camarão e morango. Nestes tipos de alimentos é importante manter características como *flavour*, coloração, textura e aparência, que não são bem preservados pelos demais métodos de desidratação. A liofilização permite minimizar as mudanças ocorridas durante a secagem, pois além de utilizar

baixas temperaturas, com o congelamento os alimentos têm pequenas chances de romper ou distorcer sua estrutura quando perdem umidade (POTTER & HOTCHKLSS, 1998).

A liofilização é o melhor método de remoção de água, pois permite obter produtos desidratados de alta qualidade em comparação com outros métodos de secagem. A ausência de água líquida e as baixas temperaturas do processo de liofilização tornam a maioria das reações microbiológicas e de deterioração mais lentas, obtendo-se produtos de alta qualidade. O estado sólido da água durante a liofilização protege a estrutura primária e a forma dos produtos, com redução mínima de volume. Apesar das vantagens, o processo ainda é considerado caro para a produção de alimentos desidratados (RATTI, 2001).

1.6 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção relacionam atividade de água com a umidade de equilíbrio dos alimentos à temperatura constante (CLADERA-OLIVERA *et al.*, 2008). São de extrema importância na área de alimentos, pois podem ser utilizadas para prever mudanças na estabilidade dos alimentos, determinar métodos de estocagem, selecionar embalagens e ingredientes e otimizar equipamentos de secagem (STENCL, 2004).

As isotermas são úteis para determinar propriedades termodinâmicas, que relacionam a interação entre os componentes do alimento e a água, tais como calor total de sorção (Δh), entropia diferencial (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) (PEDRO *et al.*, 2010).

Existem basicamente 5 tipos de isotermas, que foram descritas em 1938 por Braunauer, Emmet e Teller (BET) conforme Mathlouthi e Rogé (2003), que podem ser observadas na Figura 1.

Tipo I – isoterma de Langmuir, obtida pela adsorção de gás na camada monomolecular em sólidos porosos.

Tipo II – isoterma sigmóide, obtida por produtos solúveis e representada por uma curva assintótica.

Tipo III – isoterma de Flory-Huggins, ocorre pela adsorção de um solvente ou substâncias como glicerol, abaixo da temperatura de transição vítrea.

Tipo IV – descreve a adsorção gerada por um sólido hidrofílico até máxima hidratação dos sítios de adsorção.

Tipo V – isoterma de adsorção multicamada de BET, observada pela adsorção de vapor de água, relacionada aos Tipos II e III.

As isotermas mais comumente encontradas em alimentos são as do Tipo II. Entre os trabalhos realizados pode-se citar a determinação de isotermas de ananás (HOSSAIN *et al.*, 2001), soja (AVIARA *et al.*, 2004), pinhão (CLADERA-OLIVERA, 2008), entre outros.

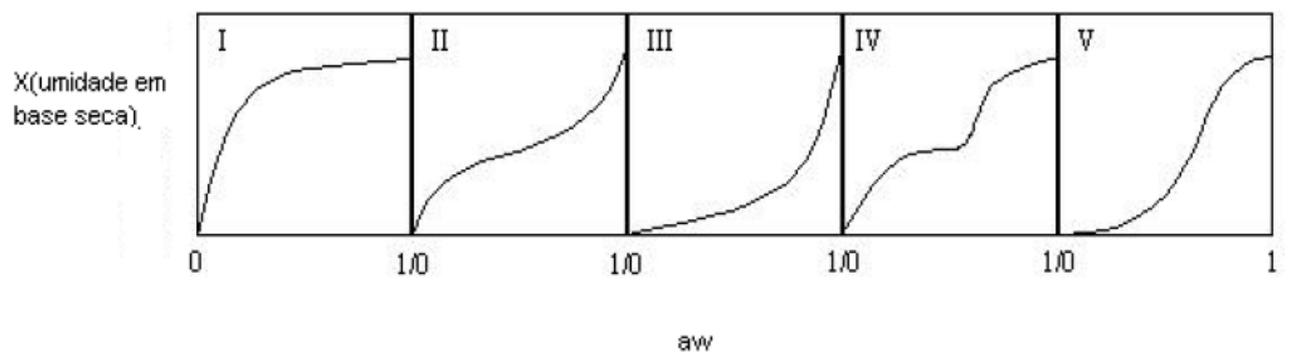


Figura 1: Representação dos 5 tipos de isotermas de sorção para alimentos descritos por BET

Fonte: Mathlouthi & Rogé (2003)

Para estimar as condições de equilíbrio de sorção para materiais biológicos são utilizadas equações teóricas, empíricas e semi-empíricas. A Tabela 2 apresenta os modelos utilizados no presente trabalho, semelhante ao utilizado por Cladera-Olivera *et al.* (2008) para pinhão cru e cozido e farinha de pinhão e por Thys *et al.* (2010) para amido nativo de pinhão.

Tabela 2 – Modelos de isotermas de sorção utilizados para o ajuste dos dados experimentais

| Nome da equação | Equação |
|-----------------|--|
| BET | $\frac{aw}{(1-aw).X} = \frac{1}{Xm.C} + \frac{(C-1).aw}{Xm.C} \quad (1)$ |
| GAB | $X = \frac{Xm.C.K.aw}{(1-K.aw)(1-K.aw+C.K.aw)} \quad (2)$ |
| Oswin | $X = A \left(\frac{aw}{1-aw} \right)^B \quad (3)$ |
| Chung-Pfost | $\ln(aw) = -A \exp(-B.X) \quad (4)$ |
| Henderson | $(1-aw) = \exp(-A.X^B) \quad (5)$ |
| Smith | $X = A + [B.\log(1-aw)] \quad (6)$ |
| Halsey | $aw = \exp\left(-\frac{A}{X^B}\right) \quad (7)$ |

X – umidade de equilíbrio (g água.g de sólidos secos⁻¹); aw – atividade de água; Xm – umidade de monocamada; A, B, C, K – constantes das equações

Fonte: Cladera-Olivera *et al.* (2008)

1.7 Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas dos alimentos relacionam a concentração de água no alimento com sua pressão parcial em equilíbrio, que é fundamental na análise dos fenômenos de transporte de calor e massa durante a desidratação. Elas determinam o ponto final até o qual o alimento pode ser desidratado de forma a obter um produto estável, com uma umidade ótima e a quantidade mínima de energia requerida para remover uma determinada quantidade de água do alimento (AL-MUHTASEB *et al.*, 2004).

A entalpia diferencial ou calor de sorção (Δh) fornece a medida da força da ligação da água-sólido (AL-MUHTASEB *et al.*, 2004). A entropia diferencial (ΔS) é proporcional ao número de sítios de sorção disponíveis em um nível de energia específico (MADAMBA *et al.*, 1996). A energia livre de Gibbs (ΔG) indica a finidade dos sorventes pela água e se a adsorção ocorre como um processo espontâneo (TELIS *et al.*, 2000).

1.8 Microscopia

O conhecimento da microestrutura dos alimentos é fundamental para se entender as suas propriedades, podendo-se desta forma descrever, prever e controlar seu comportamento e a organização de seus componentes. Para entender essas relações estrutura-propriedade são utilizadas técnicas de análise de microestrutura como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) (FANTE, 2011).

A microestrutura de alimentos é definida pela organização dos seus componentes e suas interações. Durante o processamento ela pode ser destruída e posteriormente reconstituída, resultando na sua reestruturação e reorganização (AGUILERA & STANLEY, 1999).

A MEV é usada para examinar superfícies nas quais as amostras podem se apresentar secas (MEV convencional) ou congeladas abaixo de -80°C (cryo-MEV) (DANILATOS, 1993). Elementos orgânicos não condutores devem ser previamente metalizados para poderem ser visualizados por esta técnica. A metalização consiste na precipitação, a vácuo, de uma película micrométrica de material condutor (ouro) sobre a superfície do material, possibilitando a condução da corrente elétrica (DUARTE *et al.*, 2003).

O MEV destina-se basicamente ao exame de superfície das amostras, sendo que as superfícies internas das amostras também pode ser visualizadas desde que estejam previamente fraturadas e expostas. Uma ampla faixa de aumento pode ser usada (20x-100.000x) e a MEV pode alcançar uma profundidade de campo de aproximadamente 500 vezes maior que a microscopia ótica (JAMES, 2009).

1.9 Escaneamento 3D

O escaneamento 3D é um método automático e não-destrutivo para determinar características geométricas de alimentos, principalmente com formas irregulares. É muito útil, pois permite obter medidas da área superficial e do volume, além da textura, sem destruir a amostra (UYAR & ERDOGDU, 2009).

Em estudos de modelagem, assumir produtos homogêneos com formas regulares tem sido uma abordagem comum, pois a caracterização geométrica de um

objeto é o primeiro passo para se determinar as soluções analíticas do modelo. No entanto, a infinidade de configurações dos produtos usados na indústria de alimentos dificulta esse processo (UYAR & ERDOGDU, 2009).

A variação do volume de diversos vegetais desidratados como cenoura, batata, batata doce, radite, aipo, cogumelo, foi estudada por diversos autores (UYAR & ERDGODU, 2009), que definiram a relação entre o volume destes produtos e o seu teor de água:

$$\frac{V(u)}{V_0} = au + b \quad (8)$$

Substituindo u por u/u_0 para se obter uma equação mais geral tem-se:

$$\frac{V(u)}{V_0} = a \frac{u}{u_0} + b \quad (9)$$

Que também equivale a:

$$\frac{V(u)}{V_0} = (1 - b) \frac{u}{u_0} + b \quad (10)$$

Sendo que $V(u)$ é o volume do produto que corresponde à sua umidade quando transcorrido um determinado tempo de secagem ($u < u_0$) [m^3], V_0 é o volume inicial do produto que corresponde à umidade inicial ($u = u_0$) [m^3], a é um coeficiente empírico [adimensional], b é o valor máximo do coeficiente de encolhimento [adimensional], u/u_0 é a razão entre o conteúdo de água do produto [adimensional].

1.10 Análise colorimétrica

O processamento térmico é um dos mais importantes métodos de conservação de alimentos, no entanto, durante o processo, o alimento exposto a altas temperaturas pode ter sua qualidade afetada, sendo suscetível a degradação de cor. A cor é considerada um dos mais importantes atributos do alimento, porque é o primeiro julgamento de qualidade feito pelo consumidor no local de venda e influencia diretamente na aceitabilidade do produto (MASKAN, 2001). Durante o processamento térmico, muitas reações podem afetar a cor, sendo as mais comuns

a degradação de pigmentos, especialmente carotenóides e clorofilas, e reações de escurecimento enzimático e não-enzimático (BARREIRO et. al, 1997). Outros fatores que afetam a cor incluem o pH, a acidez, o tempo e a temperatura do processo. A fim de minimizar a deterioração da cor tem-se utilizado pré-tratamentos como o branqueamento, que atua inativando enzimas de escurecimento, além de enzimas responsáveis pela alteração do sabor e amolecimento dos tecidos (REJANO et. al, 1997).

Uma das técnicas usadas para observar as mudanças de cor nos alimentos é a sua medição através de aparelhos específicos que iluminam a amostra e medem a energia luminosa refletida ou transmitida pela superfície (LOZANO & IBARZ, 1996).

O sistema tridimensional CIE $L^*a^*b^*$ fornece três coordenadas retangulares que permitem ao observador determinar com exatidão a cor da amostra. Na Figura 2 pode-se observar as coordenadas do sistema CIE $L^*a^*b^*$, no qual o eixo x corresponde às cores que variam do verde ($-a^*=-60$) ao vermelho ($+a^*=+60$), o eixo y corresponde às cores que variam do azul ($-b^*=-60$) ao amarelo ($+b^*=+60$) e o eixo z corresponde à luminosidade (L^*) que varia de 0 (preto absoluto) a 100 (branco total) (WENDT, 2006).

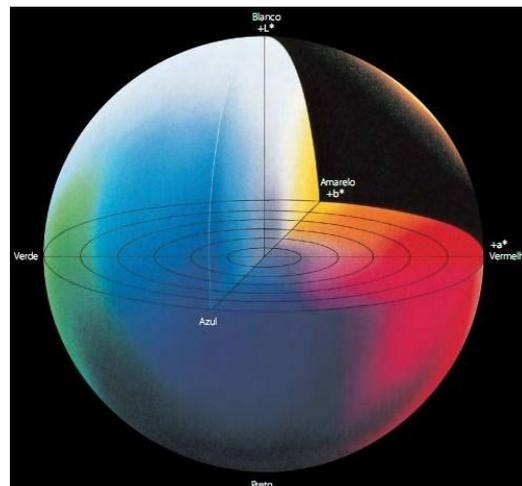


Figura 2: Coordenadas do sistema CIE $L^*a^*b^*$.

Fonte: Konica Minolta (1998)

1.11 Objetivos

1.11.1 Objetivo geral

Análise da cinética de secagem do yacon em rodela por convecção em ar quente a 50°C e por liofilização.

1.11.2 Objetivos específicos

- Análise da cinética de secagem do yacon por convecção em ar quente a 50°C.
- Elaboração das isotermas de sorção do yacon a 25, 30, 35 e 40°C e determinação das suas propriedades termodinâmicas.
- Estudo da microscopia do yacon desidratado por ar quente e liofilizado, com e sem branqueamento, através de microscopia eletrônica de varredura.
- Avaliação das mudanças de cor do yacon *in natura* e submetido à desidratação por ar quente e liofilização, com e sem branqueamento.
- Avaliação das mudanças de volume do yacon durante a secagem por ar quente.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E DE IMAGEM DO YACON (*Smallanthus sonchifolius*) DURANTE A SECAGEM

Análise das propriedades termodinâmicas e de imagem do yacon (*Smallanthus sonchifolius*) durante a secagem

Anahi Bernstein & Caciano Pelayo Zapata Noreña*

Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, Av. Bento Gonçalves, n° 9500, Prédio 43.112, CEP 91501-70.

**e-mail: czapatan@ufrgs.br*

Resumo

Foram elaboradas as isotermas de sorção do yacon desidratado em ar quente a 50°C e calculadas as propriedades termodinâmicas, bem como analisadas as mudanças de volume decorrente da perda de umidade na secagem. Também foram feitas análises de cor e microscopia eletrônica de varredura para o yacon com e sem prévio branqueamento, desidratado em ar quente e liofilizado, em rodela e moído. Para isso, as raízes de yacon foram selecionadas, lavadas, descascadas e cortadas em rodela de 1±0,35mm de espessura. No branqueamento as rodela foram distribuídas uniformemente em cestas e colocadas dentro de uma autoclave gerando vapor a 100°C durante 4 minutos, seguido de banho de gelo por 3 minutos. Os experimentos de secagem foram conduzidos em secador de ar forçado a 50°C nas primeiras 5 horas e a 75°C nas 5 horas seguintes. Para a liofilização, o yacon foi previamente congelado a -80°C e liofilizado à pressão de 64µmHg por 72 horas. Para os testes de variação de volume durante a secagem, o yacon foi cortado em cubos de 1mm³ e desidratado em ar forçado. Durante a secagem foram monitoradas a atividade de água, a umidade e o volume mediante escaneamento tridimensional com laser. Os experimentos de secagem em ar forçado indicaram altas taxas de perda de umidade e atividade de água nos primeiros 150 minutos de secagem, sendo os valores finais de umidade e atividade de água de 0,15±0,071g/g de matéria seca e 0,38±0,019, respectivamente. A perda de volume (em torno de 87%) e a deformação foram bastante significativas durante o experimento de secagem, evidenciando a necessidade de considerar o fenômeno de encolhimento para a caracterização de modelos de secagem. Quanto às isotermas de sorção, o modelo de Henderson foi o que melhor ajustou os dados de sorção. As isotermas obtidas foram do tipo III, característico de produtos com alto teor de açúcares. A entalpia e a entropia diferenciais aumentam drasticamente para baixos conteúdos de umidade, e com o aumento de umidade, decrescem rapidamente até a curva de tornar assintótica. Nas amostras liofilizadas, em comparação às desidratadas por ar quente, o parâmetro L^* foi maior e os parâmetros a^* e b^* foram menores, obtendo-se amostras mais claras, esverdeadas e azuladas.

Palavras-chave: *yacon, isotermas, liofilização, escaneamento, cor, encolhimento*

Introdução

O yacon é uma planta de origem andina, de aparência semelhante a uma batata doce, sabor doce e polpa crocante, sendo geralmente consumido *in natura*. Possui grande quantidade de água e carboidratos. O percentual de água varia entre 83 e 90% do peso fresco, o que faz com que seu valor energético seja baixo (SANTANA & CARDOSO, 2008). Após a colheita é necessário expor as raízes ao sol por 3 a 5 dias, para que ocorra incremento no sabor doce (ZARDINI, 1991).

Inulina e frutooligossacarídeos são considerados prebióticos, pois estimulam seletivamente o crescimento e/ou atividade das bifidobactérias no intestino (SAAD, 2006). No yacon as concentrações de inulina e frutooligossacarídeos podem chegar a até 20% do seu peso fresco (HAULY & MOSCATO, 2002).

A secagem de alimentos é o método mais simples e de maior consumo de energia utilizado para a preservação de alimentos, na qual o produto é exposto a uma corrente de ar quente contínua, que promove a evaporação da umidade (RATTI, 2001). A principal mudança física que ocorre durante a secagem por ar quente é a redução do volume externo, devido à perda de água e aquecimento. A mudança de forma, perda de volume e aumento da dureza são as principais causas da perda de qualidade do produto desidratado. A determinação de fatores que alterem a qualidade durante a desidratação é de extrema importância, uma vez que a constante demanda por alimentos de alta qualidade requer que os produtos desidratados mantenham a qualidade nutricional e organoléptica do produto fresco (MAYOR & SERENO, 2004).

A liofilização ou *freeze-drying* é um método de desidratação de materiais congelados pelo processo de sublimação sob alto vácuo, na qual ocorre retirada da água do alimento sem submetê-lo a altas temperaturas, comuns nos processos de desidratação (MARTINS, 2000). É o melhor método de remoção de água, pois permite obter produtos desidratados de alta qualidade em comparação com outros métodos de secagem. O estado sólido da água durante o processo protege a estrutura primária e a forma dos produtos, com redução mínima de volume (RATTI, 2001).

As isotermas de sorção relacionam a atividade de água com a umidade de equilíbrio dos alimentos à temperatura constante (CLADERA-OLIVERA *et al.*, 2008). São de extrema importância na área de alimentos, pois podem ser utilizadas para prever mudanças na estabilidade dos alimentos, determinar métodos de estocagem, selecionar embalagens e ingredientes e otimizar equipamentos de secagem (STENCL, 2004).

As isotermas são úteis para determinar propriedades termodinâmicas, que relacionam a interação entre os componentes do alimento e a água, tais como calor total de sorção (Δh), entropia diferencial (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) (PEDRO *et al.*, 2010). A entalpia diferencial ou calor de sorção fornece a medida da força da ligação da água-sólido (AL-MUHTASEB *et al.*, 2004). A entropia diferencial é proporcional ao número de sítios de sorção disponíveis em um nível de energia específico (MADAMBA *et al.*, 1996). A energia livre de Gibbs indica a afinidade dos sorventes pela água e se a adsorção ocorre como um processo espontâneo (TELIS *et al.*, 2000).

As isotermas mais comumente encontradas em alimentos são as do Tipo II. Entre os trabalhos realizados pode-se citar a determinação de isotermas de ananás (HOSSAIN *et al.*, 2001), soja (AVIARA *et al.*, 2004), pinhão (CLADERA-OLIVERA, 2008), entre outros.

O conhecimento da microestrutura dos alimentos é fundamental para se entender as suas propriedades, podendo-se desta forma descrever, prever e controlar seu comportamento e a organização de seus componentes. São utilizadas técnicas de análise de microestrutura como a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A MEV é usada para examinar superfícies nas quais as amostras podem se apresentar secas ou congeladas abaixo de -80°C (DANILATOS, 1993). Como o yacon é um produto orgânico não condutor, existe a necessidade de prévia metalização com pó de ouro para possibilitar a condução da corrente elétrica (DUARTE *et al.*, 2003).

O escaneamento 3D é um método automático e não-destrutivo para determinar características geométricas de alimentos, principalmente com formas irregulares. É muito útil, pois permite obter medidas da área superficial e do volume, além da textura, sem destruir a amostra (UYAR & ERDOGDU, 2009).

Durante a secagem de alimentos ocorre encolhimento do produto, fator este que deve ser considerado para o ajuste a modelos de secagem. A variação do volume de diversos vegetais desidratados como cenoura, batata, batata doce, radite, aipo, cogumelo, foi estudada por diversos autores (UYAR & ERDGODU, 2009).

O processamento térmico é um dos mais importantes métodos de conservação de alimentos, no entanto, durante o processo, o alimento exposto a altas temperaturas pode ter sua qualidade afetada, sendo suscetível a degradação de cor. A cor é considerada um dos mais importantes atributos do alimento, porque é o primeiro julgamento de qualidade feito pelo consumidor no local de venda e influencia diretamente na aceitabilidade do produto (MASKAN, 2001). Uma das técnicas usadas para observar as mudanças de cor nos alimentos é a sua medição através de aparelhos específicos que iluminam a amostra e medem a energia luminosa refletida ou transmitida pela superfície (LOZANO & IBARZ, 1996).

Os objetivos deste trabalho foram elaborar as isotermas de sorção do yacon e determinar suas propriedades termodinâmicas, bem como estudar a microscopia e as mudanças de cor do yacon desidratado por ar quente e liofilizado, além de avaliar as mudanças de volume durante a secagem por ar quente.

Materiais e métodos

Matéria-prima

As raízes de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) provenientes do estado de São Paulo foram adquiridas na Central de Abastecimento do Rio Grande do Sul (CEASA), na cidade de Porto Alegre. Foram selecionadas considerando a ausência de injúrias visuais e infecções, lavadas e armazenadas sob refrigeração ($8\pm 2^{\circ}\text{C}$) até o momento do uso.

Procedimento experimental

As raízes de yacon foram descascadas e cortadas em rodela de $1\pm 0,35\text{mm}$ de espessura, utilizando um processador de alimentos. A seguir as amostras

passaram pela operação de branqueamento por vapor, na qual as rodela foram distribuídas uniformemente em cestas e colocadas dentro de uma autoclave gerando vapor a 100°C à pressão atmosférica durante 4 minutos (SCHER *et al.*, 2009). Após esta etapa as amostras foram rapidamente resfriadas em banho de gelo por 3 minutos (AGÜERO *et al.*, 2008).

Posteriormente, as rodela de yacon foram dispostas em bandejas de malha de aço inoxidável e levadas a um secador de ar forçado, a 50°C por 5 horas no primeiro dia e a 75°C por 5 horas no segundo dia.

Durante a secagem, a perda de peso e a atividade de água foram medidas a cada 30 minutos nas primeiras 2,5 horas e cada 1 hora no tempo restante.

As amostras de yacon também foram desidratadas por liofilização conforme Alves *et al.* (2010). O processo consistiu em congelar previamente as amostras em ultrafreezer (Liobras, Brasil) a -80°C por 24 horas. E, a seguir, as rodela de yacon foram dispostas em bandejas dentro de um liofilizador (Liobras L101, Brasil) empregando pressão de 64µmHg, onde permaneceram por 72 horas.

Todas as amostras, desidratadas e liofilizadas, foram acondicionadas em sacos de polietileno e armazenadas em dessecador para análises posteriores.

Atividade de água

Os valores experimentais de atividade de água foram obtidos através de leitura direta em medidor eletrônico (Aqualab 3TE – Decagon, Pullman, USA) conforme método n° 978.18 da AOAC (1990). As medições foram realizadas em duplicata para cada ponto, com retirada aleatória de amostras.

Umidade

Os valores experimentais de umidade foram determinados através de secagem em estufa a 105°C, conforme o método n° 984.25 da AOAC (1984). A determinação de umidade foi feita em duplicata para cada ponto.

Microscopia eletrônica de varredura

As amostras de yacon desidratadas e liofilizadas foram moídas com o auxílio de um pilão e visualizadas por microscopia eletrônica de varredura. Conforme método empregado por Toneli *et al.* (2008), aproximadamente um grama da amostra foi aderido com fita dupla face em suportes metálicos (*stubs*) e submetidos a revestimento com uma camada fina de metal.

As amostras foram visualizadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV)(JSM 6060, Tóquio, Japão) operando a uma tensão de 10kV. As imagens foram obtidas com aumento de 200x.

Medição de cor

A análise de cor foi feita no yacon *in natura* em rodela, com e sem branqueamento, e nas amostras desidratadas e liofilizadas, com e sem branqueamento, em pó.

As amostras em pó foram colocadas em suportes plásticos de 1 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura, cheios até o topo (ANCOS *et al.*, 1999). Nas amostras *in natura* a leitura foi feita diretamente na raiz, cortada somente no momento da leitura para evitar escurecimento enzimático.

A cor foi medida por leitura direta em colorímetro Minolta (CR400/410) através de sistema tridimensional CIEL*a*b*, no qual L* é a luminosidade (variando de 0 – preto a 100 – branco), a* é uma medida que varia do verde (-60) ao vermelho (+60), e b* varia do azul (-60) ao amarelo (+60). O instrumento foi padronizado com uma placa de cerâmica branca (L* = 97,47; a* = 0,08; b* = 1,76).

Escaneamento 3D

As raízes de yacon foram cortadas em cubos de 1 cm de lado e secas em secador de ar forçado a 50°C nas primeiras 5 horas e a 75°C na 5 horas seguintes. Após, as amostras foram escaneadas em scanner tridimensional (Digimill - Techonodril, Novo Hamburgo, Brasil), com resolução entre pontos de 0,1 mm. As

imagens foram obtidas através do software Geomatic Studio 10 (Techonodrill, Novo Hamburgo, Brasil). Como as amostras eram de cor muito clara, foi necessário pulverizá-las com spray branco para refletir o laser.

Mudanças de volume durante a secagem

Para avaliar as mudanças de volume em função do teor de umidade durante a secagem foi empregada a seguinte equação, conforme o estudado para vegetais desidratados (SUZUKI *et al.*, 1976; MAZZA & LEMAGUER, 1980; KARATHANOS *et al.*, 1993):

$$\frac{V(u)}{V_0} = a \frac{u}{u_0} + b \quad (15)$$

Sendo que $V(u)$ é o volume que corresponde à umidade (u) em determinado tempo de secagem; V_0 é o volume inicial do yacon que corresponde à umidade inicial do produto (u_0).

Isotermas de sorção

Para a determinação das isotermas de sorção foi empregada a metodologia recomendada por Benado & Rizvi (1985), Fasina (2006) e Ajibola *et al.* (2003).

A umidade inicial do yacon foi de 88% em base úmida. Para obter amostras com diferentes teores de umidade, as rodela de yacon foram desidratadas em secador de ar forçado a 50°C durante 5 horas e a 75°C durante as 5 horas seguintes.

Durante a secagem foram retiradas amostras, em intervalos pré-determinados de tempo. Foram obtidas dez amostras com teores de umidade na faixa de 87,9 a 3,7% em base úmida. As amostras foram acondicionadas em sacos de polietileno e armazenadas em dessecador por 24 horas, para que no interior das amostras se estabelecesse um equilíbrio, devido ao gradiente de umidade gerado durante a secagem.

Para essas amostras foram determinados o conteúdo de umidade e a atividade de água nas temperaturas de 25, 30, 35 e 40°C. Com estes dados foram elaboradas as isotermas de sorção.

Os dados experimentais foram ajustados a diferentes modelos de sorção, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos de isotermas de sorção utilizados para o ajuste dos dados experimentais

| Nome da equação | Equação |
|-----------------|--|
| BET | $\frac{aw}{(1-aw).X} = \frac{1}{Xm.C} + \frac{(C-1).aw}{Xm.C} \quad (1)$ |
| GAB | $X = \frac{Xm.C.K.aw}{(1-K.aw)(1-K.aw+C.K.aw)} \quad (2)$ |
| Oswin | $X = A \left(\frac{aw}{1-aw} \right)^B \quad (3)$ |
| Chung-Pfost | $\ln(aw) = -A \exp(-B.X) \quad (4)$ |
| Henderson | $(1-aw) = \exp(-A.X^B) \quad (5)$ |
| Smith | $X = A + [B.\log(1-aw)] \quad (6)$ |
| Halsey | $aw = \exp\left(-\frac{A}{X^B}\right) \quad (7)$ |

X – umidade de equilíbrio (g água.g de sólidos secos⁻¹); aw – atividade de água; Xm – umidade de monocamada; A, B, C, K – constantes das equações

Fonte: Cladera-Olivera *et al.* (2008)

Calor isostérico (entalpia diferencial) e entropia diferencial de sorção

O calor isostérico de sorção Δh (J.mol⁻¹) e a entropia diferencial de sorção ΔS (J.mol⁻¹.K⁻¹) foram determinados utilizando a equação de Clapeyron-Clausius (TSAMI, 1991):

$$\Delta h = -R \left[\frac{\partial \ln(aw)}{\partial (1/T)} \right]_x \quad (16)$$

A entalpia e a entropia são relacionadas a partir da Equação 17:

$$\ln(aw)_x = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta h}{RT} \quad (17)$$

Sendo que R representa a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T é a temperatura absoluta (K), a_w e atividade de água e X a umidade de equilíbrio ($\text{kg água.kg sólidos secos}^{-1}$).

A partir da análise de regressão de $\ln(a_w)$ em função de $1/T$, à umidade constante, são obtidos os coeficientes angular e linear representados por $-\Delta h/R$ e $\Delta S/R$, respectivamente. O modelo que melhor descreveu os dados experimentais foi utilizado para determinar os valores de atividade de água em função da temperatura.

A energia livre de Gibbs foi obtida através da relação (BERINSTAIN *et al.*, 1996; TELIS *et al.*, 2000):

$$\Delta h = T_\beta \cdot \Delta S + G_\beta \quad (18)$$

Sendo que T_β é a temperatura isocinética (K) e ΔG é a energia livre (J/mol) na temperatura T_β e são calculadas por regressão linear.

Resultados e discussão

Curvas de secagem

As curvas de secagem de umidade e de atividade de água em função do tempo para as rodela de yacon podem ser observadas nas Figuras 3 e 4. A secagem foi realizada a 50°C por 5 horas, em secador de bandejas.

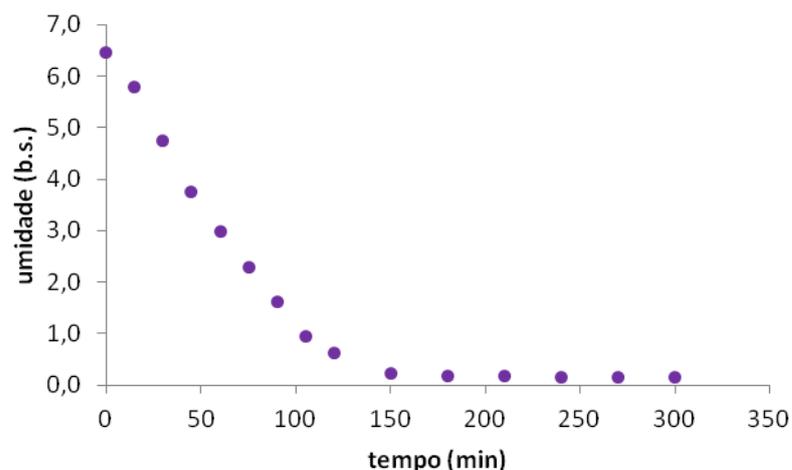


Figura 3: Umidade em função do tempo de secagem

Na Figura 3, pode-se observar que a umidade diminuiu rapidamente durante os primeiros 150 minutos de secagem até valores próximos de $0,23 \pm 0,098 \text{ g/g}$ de matéria seca, e após este período a diminuição se tornou mais lenta até atingir o equilíbrio em $0,15 \pm 0,071 \text{ g/g}$ de matéria seca.

Na Figura 4, se observa que a atividade de água também diminuiu rapidamente durante os primeiros 150 minutos até valores próximos a $0,44 \pm 0,011$, período no qual houve maior retirada da água livre do produto. Após este período a perda de água se tornou mais lenta, até atingir o equilíbrio em $0,38 \pm 0,019$.

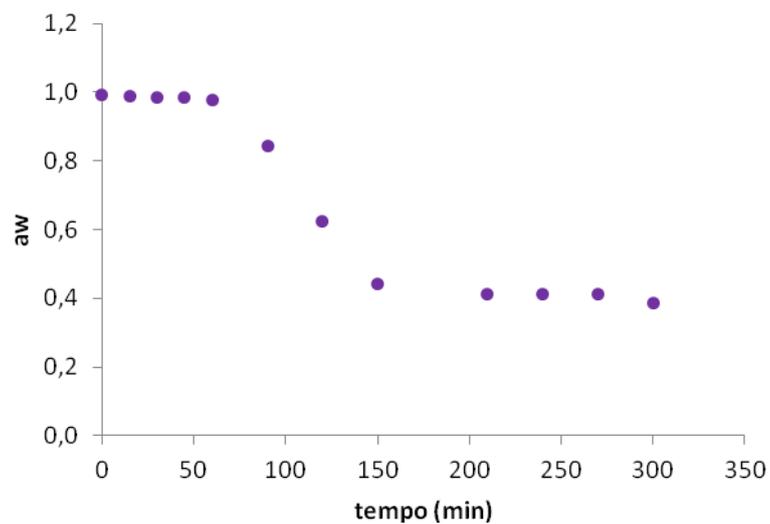


Figura 4: Atividade de água em função do tempo de secagem

Mudanças de volume durante a desidratação

Durante a secagem de alimentos ocorre encolhimento do produto, fator este que deve ser considerado para o ajuste a modelos de secagem (PABIS, 1999).

Em testes preliminares realizados se observou a mudança na estrutura do yacon inteiro após ocorrer o encolhimento devido à perda de água, quando acondicionado sob refrigeração por 72 horas (Figura 5). Observa-se uma redução acentuada no tamanho, bem como alteração visível da textura. A partir disto é possível confirmar a necessidade de se levar em consideração este encolhimento para o cálculo de modelos de secagem.

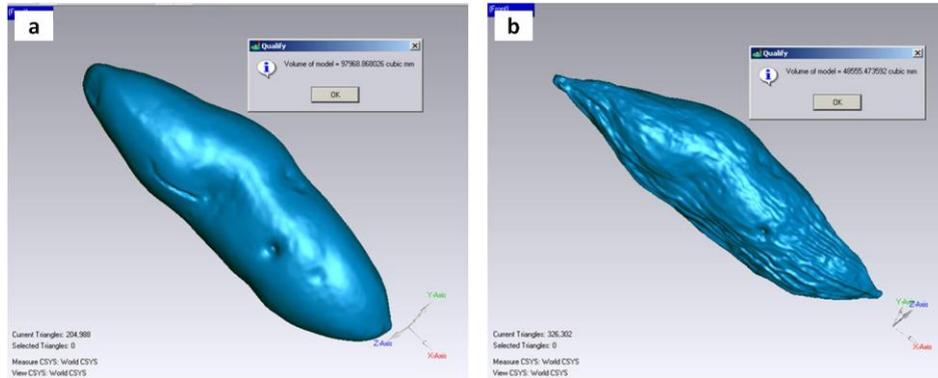


Figura 5: Imagens tridimensionais do yacon inteiro *in natura* (a) e após sofrer encolhimento devido à perda de água (b).

Na Figura 6, se observa os cubos de yacon *in natura* (6a) e as amostras em diferentes tempos durante o período de 10 horas de secagem. A secagem foi realizada a 50°C nas primeiras 5 horas e a 75°C nas 5 horas seguintes. Observa-se diferença bastante significativa no volume e na textura ao decorrer do tempo de secagem.

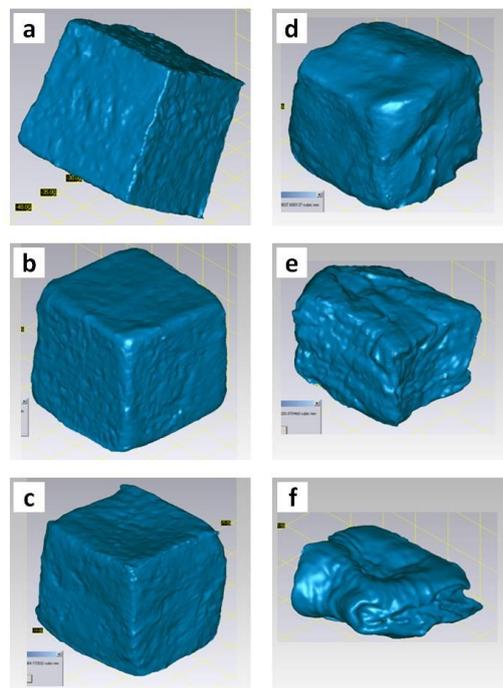


Figura 6: Imagens tridimensionais do yacon em cubos *in natura* (a) e desidratado por 2h (b), 5h (c), 7h (d), 9h (e) e 10h (f).

A Tabela 3 apresenta os valores de volume obtidos. Através destes dados é possível comprovar a diminuição significativa do volume dos cubos desidratados.

Tabela 3 – Dados de volume e umidade obtidos para as amostras *in natura* e desidratadas.

| | Tempo (h) | Volume (mm ³) | V/V ₀ | Umidade | Umidade (b.s.) | X/X ₀ |
|------|-----------|---------------------------|------------------|---------|----------------|------------------|
| 50°C | 0 | 7861,71 | 1,000 | 88,13 | 7,42 | 1,000 |
| | 2 | 5960,83 | 0,758 | 85,72 | 6,00 | 0,809 |
| | 3 | 5064,17 | 0,644 | 84,99 | 5,66 | 0,762 |
| | 5 | 3837,60 | 0,488 | 80,31 | 4,08 | 0,549 |
| 75°C | 7 | 2020,07 | 0,257 | 58,02 | 1,38 | 0,186 |
| | 9 | 1111,83 | 0,141 | 34,16 | 0,52 | 0,070 |
| | 10 | 886,21 | 0,113 | 23,61 | 0,31 | 0,042 |

A partir do modelo proposto por Pabis (1999), avaliou-se a perda de volume durante a desidratação, como mostrado na Figura 7, na qual estão representadas a razão de volumes em função da razão de umidade. É possível observar a relação linear entre a perda de umidade e a perda de volume (coeficiente de determinação R² de 0,977).

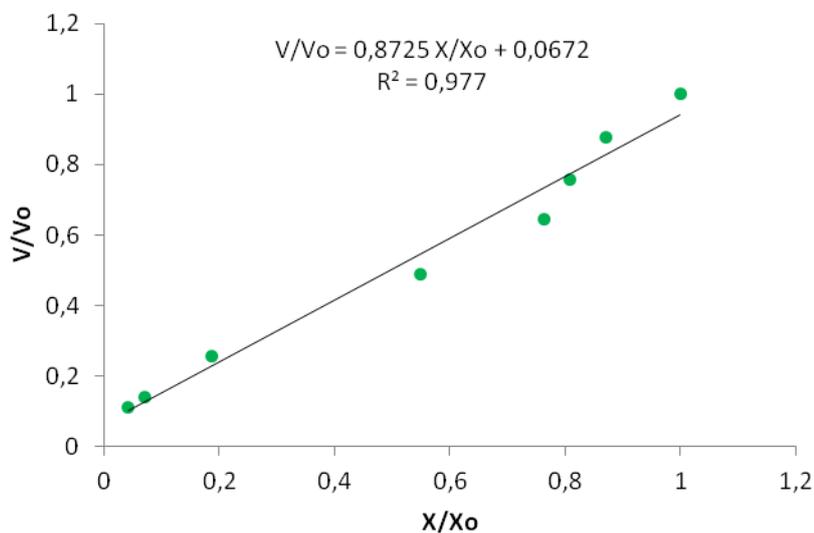


Figura 7: Razão entre volumes em função da razão entre umidades em base seca

Isotermas de sorção

A Figura 8 mostra os valores experimentais de umidade de equilíbrio em função da atividade de água para as diferentes temperaturas.

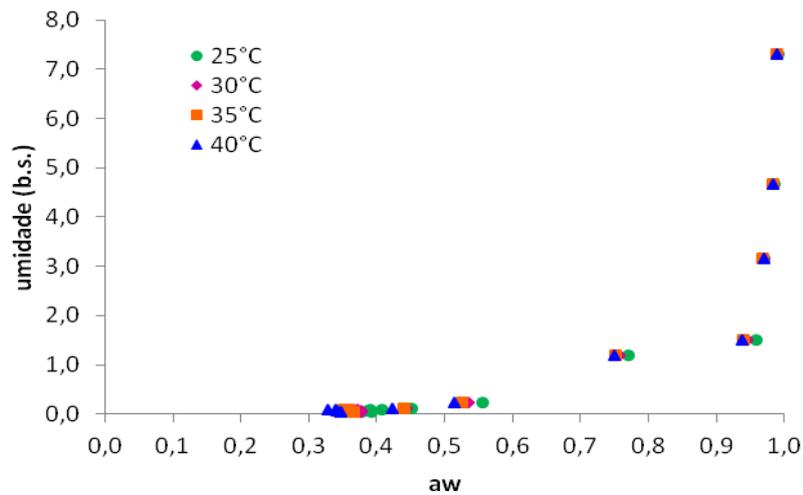


Figura 8: Valores experimentais de umidade de equilíbrio em função da atividade de água para diferentes temperaturas

Pode-se observar valores de equilíbrio para atividades de água entre 0,33 e 0,99. Também se observa que para a faixa de temperatura utilizada (25 a 40°C), as isotermas de sorção do yacon foram praticamente independentes da temperatura. Comportamento semelhante foi observado por Cladera-Olivera *et al.* (2008) para o pinhão cru e cozido e para a farinha de pinhão em temperaturas entre 15 e 40°C.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos da Tabela 2. Os parâmetros obtidos por análise de regressão, assim como os coeficientes de determinação, são mostrados na Tabela 4. Nessa tabela se observa que o modelo de Henderson foi o que melhor descreveu os dados experimentais, seguido dos modelos de Oswin e Halsey, visto que os coeficientes de correlação ($R^2 = 0,96$) foram mais próximos de 1.

Tabela 4 – Valores estimados dos coeficientes obtidos através do ajuste aos modelos de sorção

| Modelo | Constante | Temperatura | | | |
|--------------|----------------|-------------|----------|----------|----------|
| | | 25°C | 30°C | 35°C | 40°C |
| BET | Xm | -0,0699 | -0,0798 | -0,0974 | -0,1224 |
| | C | -0,5171 | -0,5162 | -0,4826 | -0,4530 |
| | a | 27,656 | 24,284 | 21,269 | 18,030 |
| | b | -41,956 | -36,820 | -31,534 | -26,198 |
| | R ² | 0,4438 | 0,3476 | 0,3139 | 0,2848 |
| GAB | Xm | 2,54E-11 | 4,23E-11 | 6,42E-11 | --- |
| | C | 2,0000 | 2,0000 | 1,9999 | --- |
| | K | 8034895 | 5620724 | 4173366 | --- |
| | R ² | 0,8412 | 0,8025 | 0,7952 | 0,7891 |
| Halsey | a | - 2,4198 | - 2,3175 | - 2,2771 | - 2,2667 |
| | b | -0,8930 | -0,8714 | -0,8698 | -0,8851 |
| | R ² | 0,9201 | 0,9210 | 0,9224 | 0,9241 |
| Oswin | a | - 2,1574 | - 2,0882 | - 2,0401 | - 1,9808 |
| | b | 0,9279 | 0,9447 | 0,9439 | 0,9252 |
| | R ² | 0,9360 | 0,9371 | 0,9393 | 0,9417 |
| Chung e Pfof | a | - 0,3825 | - 0,3293 | - 0,2884 | - 0,2445 |
| | b | -0,7182 | -0,7009 | -0,7023 | -0,7138 |
| | R ² | 0,8515 | 0,8528 | 0,8607 | 0,8602 |
| Henderson | a | 0,6268 | 0,5836 | 0,5614 | 0,5432 |
| | b | 0,4790 | 0,4826 | 0,4904 | 0,5070 |
| | R ² | 0,9650 | 0,9642 | 0,9663 | 0,9679 |
| Smith | a | - 0,7743 | - 0,7587 | - 0,7436 | - 0,6956 |
| | b | -3,0661 | -3,1702 | -3,2078 | -3,1681 |
| | R ² | 0,8666 | 0,8686 | 0,8777 | 0,8779 |

Cladera-Olivera *et al.* (2008) reportou que os modelos de Chirife, Halsey e Oswin foram os que melhor ajustaram os dados para o pinhão cru e cozido e para a farinha de pinhão.

Na Figura 9, que representa a isoterma de sorção do yacon, se observa que a isoterma é do tipo III, característica de produtos com alto teor de açúcares. Comportamento esperado visto que no yacon os teores de açúcares correspondem a 90% do peso seco das raízes recém colhidas (MOSCATTO *et al.*, 2006). Estes produtos se caracterizam por adsorver pequenas quantidades de água em baixas atividades de água, no entanto, quando a umidade relativa aumenta, passam a reter

grandes quantidades de água (SAMANIEGO-ESGUERRA *et al.*, 1991). Resultados similares foram encontrados para cogumelos comestíveis (MULET *et al.*, 2002), pistache (MASKAN & GÖGUS, 1997) e casca de limão (GARCÍA-PÉREZ *et al.*, 2008).

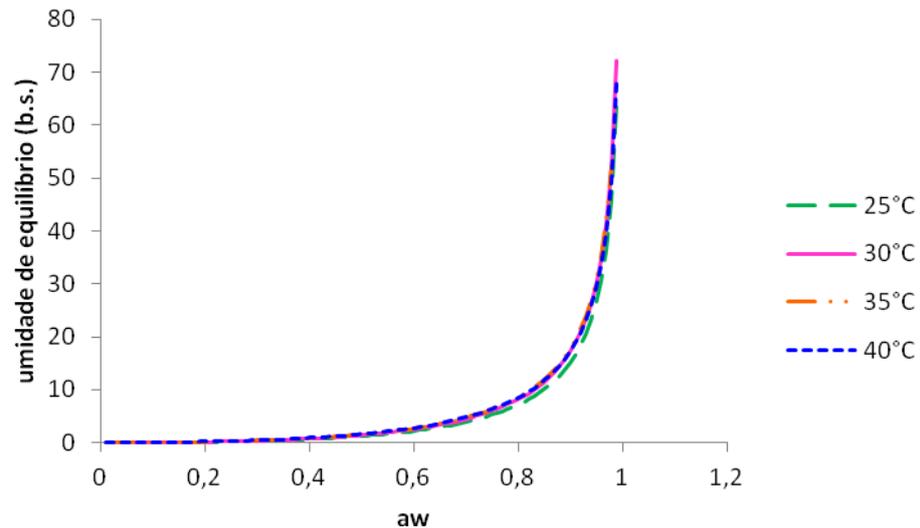


Figura 9: Isoterma de sorção do yacon

Propriedades termodinâmicas

A partir do modelo de Henderson foram determinadas as propriedades termodinâmicas de sorção. Na Figura 10, estão mostrados os valores de entalpia diferencial de adsorção em função da umidade de equilíbrio. Nela se observa que a entalpia diferencial apresenta alta dependência do conteúdo de umidade. Para baixos teores de umidade, o calor de sorção aumenta drasticamente, e com o aumento da umidade, decresce rapidamente até a curva se tornar assintótica. Este comportamento pode ser explicado porque em baixos teores de umidade, ocorre uma forte interação entre o produto e a água contida nele, sendo preciso altos valores de energia (calor de sorção) para retirar a água presente nas amostras (SHIVHARE *et al.*, 2004).

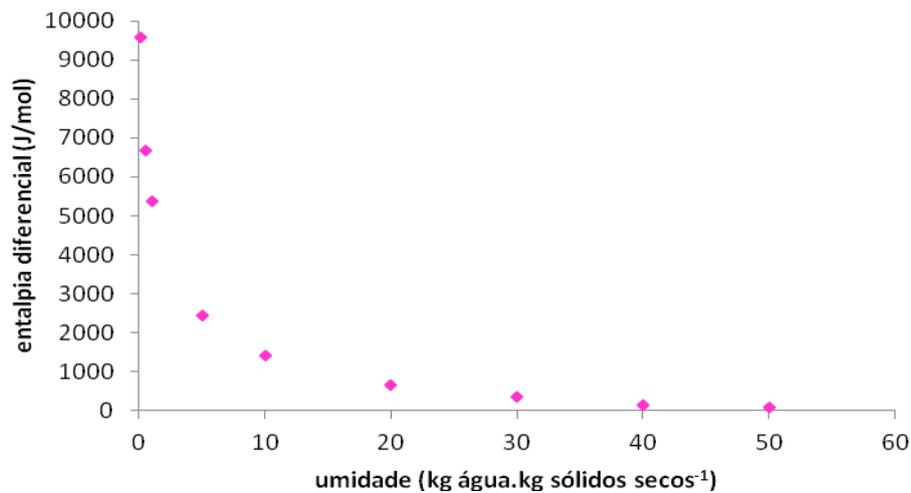


Figura 10: Entalpia diferencial de adsorção em função da umidade de equilíbrio do yacon

A Figura 11 apresenta os valores de entropia de sorção em função da umidade de equilíbrio para o yacon. Percebe-se que assim como o encontrado para a entalpia diferencial de sorção, a entropia diferencial de sorção aumenta com o decréscimo da umidade de equilíbrio, devido à alta dependência do conteúdo de umidade.

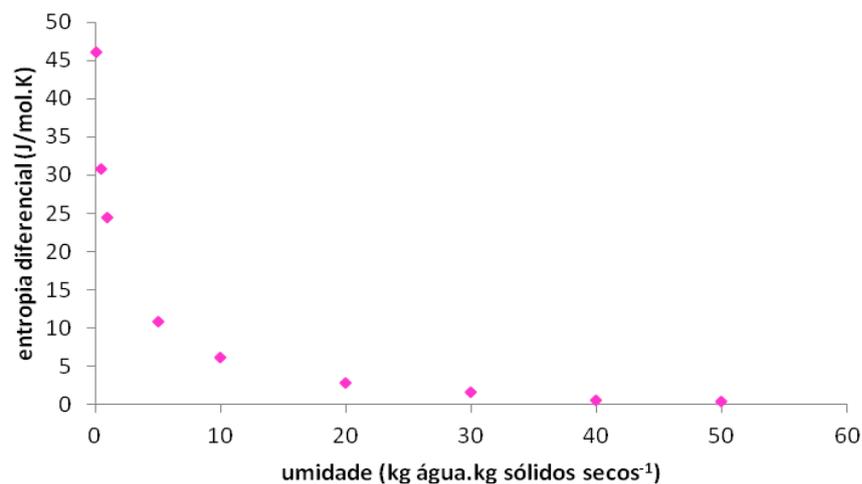


Figura 11: Entropia diferencial de adsorção em função da umidade de equilíbrio do yacon

A Figura 12 mostra a entalpia diferencial em função da entropia diferencial, podendo-se observar a relação linear entre estas variáveis (com coeficiente de determinação $R^2 = 0,999$).

O valor de ΔG obtido (80,7 J/mol) sugere que o processo é não espontâneo ($\Delta G > 0$), semelhante ao encontrado para o amido nativo de pinhão (THYS *et al.*, 2010). A partir do ponto de vista termodinâmico, a mudança da energia livre pode ser um indicativo da afinidade do sorvente com a água, e ainda fornecer um critério para saber se a absorção de água é um processo espontâneo ($\Delta G < 0$) ou não espontâneo ($\Delta G > 0$) (APOSTOLOPOULOS & GILBERT, 1990).

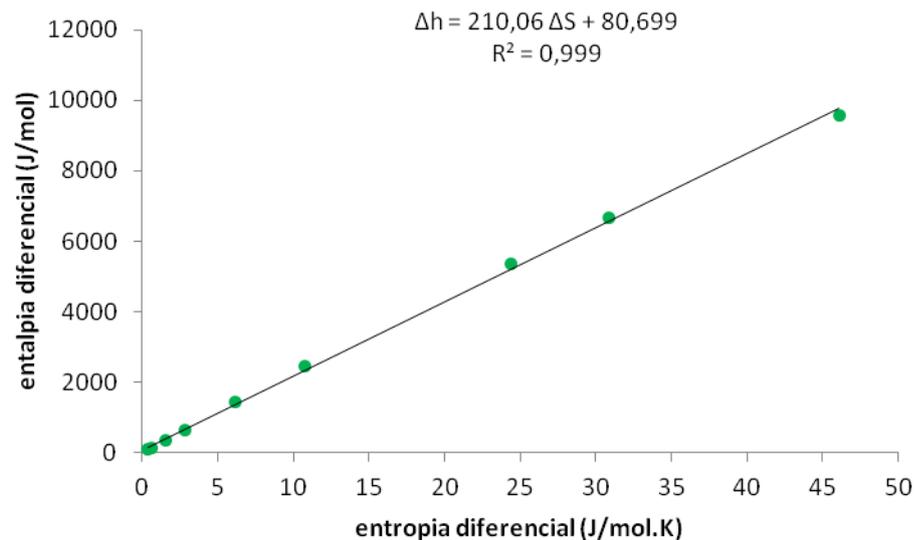


Figura 12: Entalpia diferencial em função da entropia diferencial do yacon

Análise microscópica

A microscopia eletrônica tem sido usada para observar as características de aglomeração de partículas de pó, incluindo forma e tamanho (GHOSAL *et al.*, 2010).

A Figura 13 apresenta as imagens microscópicas do yacon com e sem branqueamento, em fatia e moído, seco por convecção de ar quente ou liofilizado.

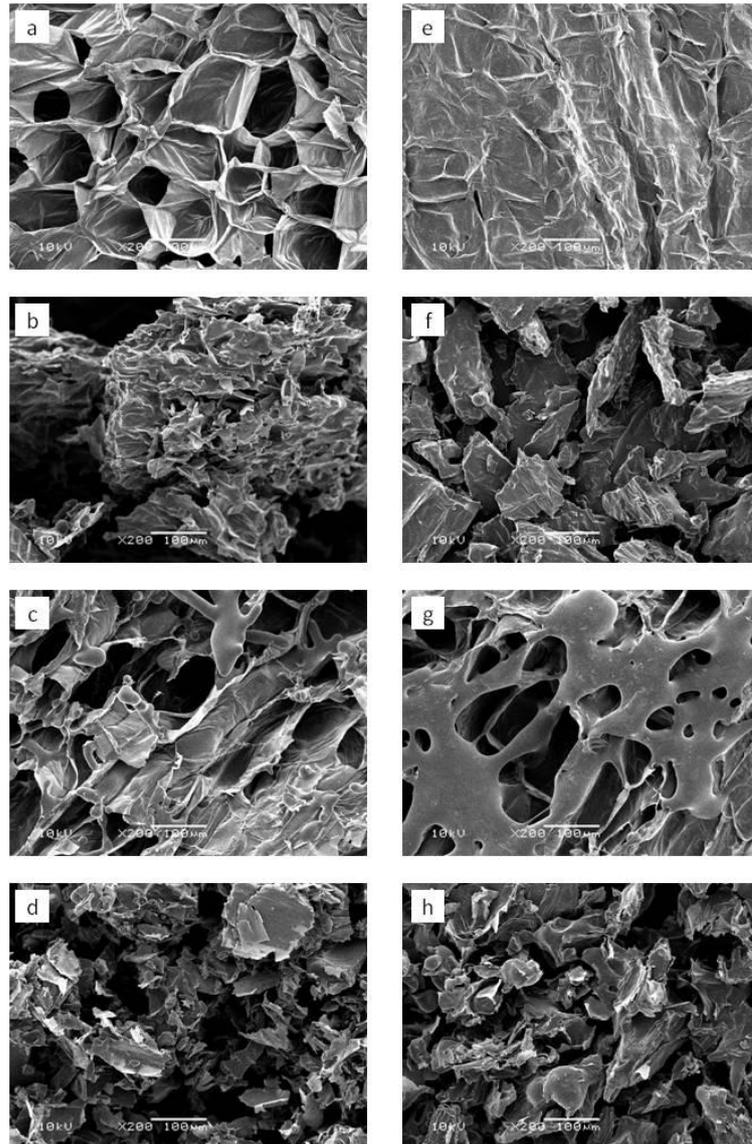


Figura 13: Imagens microscópicas do yacon desidratado, com aumento de 200x. Sem branqueamento (a) desidratado em ar forçado, fatia, (b) desidratado em ar forçado, moído, (c) liofilizado, fatia, (d) liofilizado, moído. Com branqueamento (e) desidratado em ar forçado, fatia, (f) desidratado em ar forçado, moído, (g) liofilizado, fatia, (h) liofilizado, moído.

Nas amostras em fatias sem branqueamento (Fig. 13a, c) é possível observar a estrutura mais simétrica e com formas mais alongadas, decorrente do menor dano ao tecido íntegro. Entretanto, nas amostras submetidas ao branqueamento (Fig. 13e, g) observa-se a degradação causada pelo pré-tratamento, o qual modifica as propriedades estruturais dos tecidos, ocasionando a deformação das partículas, deixando a estrutura com aspecto de “derretido” (PINEDO & MURR, 2005).

Nas amostras em pó, sem branqueamento desidratadas por ar (Fig. 13b), as partículas apresentam estrutura tipo lâminas, com rugosidades em toda a extensão da superfície, conforme pode ser visto também para o alho em pó (FANTE, 2011). As amostras liofilizadas sem branqueamento (Fig. 13d) apresentaram aspecto de vidro quebrado, típico de produtos liofilizados, conforme observações realizadas por Chronakis *et al.* (2004) para cereais de aveia.

Comparando amostras desidratadas por ar quente e liofilizadas se observa que as liofilizadas apresentam maior dano na superfície, provavelmente devido ao congelamento das amostras. Conforme James (2009), a liofilização origina menor contração e conseqüentemente menor rugosidade nas amostras do que na secagem por ar, porém podem-se produzir danos estruturais devido à formação de cristais de gelo durante o congelamento prévio à liofilização.

Análise colorimétrica

A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros L^* , a^* e b^* do yacon *in natura* e moído, obtidos por desidratação por ar forçado e liofilização, com e sem branqueamento.

Tabela 5 – Parâmetros de cor do yacon *in natura* e das amostras desidratadas moídas, com e sem branqueamento

| Tratamento | L^* | | a^* | | b^* | |
|------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | sb | cb | sb | cb | sb | cb |
| <i>In natura</i> | 52,01±4,647 ^a | 43,32±0,841 ^b | -1,75±0,304 ^a | -2,62±0,064 ^b | 12,79±2,220 ^a | 12,85±1,450 ^a |
| Secagem por ar | 60,67±0,813 ^c | 76,71±0,707 ^d | 2,07±0,092 ^c | -3,04±0,141 ^b | 26,69±0,651 ^b | 34,12±0,898 ^c |
| Liofilização | 79,00±0,099 ^{de} | 85,84±0,163 ^e | 1,01±0,021 ^d | -3,08±0,014 ^b | 15,64±0,099 ^a | 22,39±0,226 ^b |

sb: sem branqueamento, cb: com branqueamento

Valores expressos da média ± desvio padrão

Letras iguais indicam que não há diferença significativa ($p>0,05$)

É possível observar que os valores de L^* foram significativamente maiores no yacon liofilizado com e sem branqueamento que nas amostras desidratadas por ar, sendo as liofilizadas mais claras, o que também foi observado por Li *et al.* (2007) e Topuz *et al.* (2009), para fatias de alho e purê de pimentão, respectivamente. Entre

as amostras liofilizadas não houve diferença significativa devido ao tratamento de branqueamento. Para todas as amostras, liofilizadas e desidratadas por ar, se observam diferenças significativas em relação às amostras *in natura*, que são mais escuras.

O parâmetro a^* para as amostras sem branqueamento desidratadas por ar foi significativamente maior ($p < 0,05$) em relação às liofilizadas, indicando amostras mais avermelhadas ($+a^*$). As amostras submetidas a branqueamento não apresentaram diferença significativa entre si ($p > 0,05$), no entanto, em relação às não branqueadas, foram significativamente menores ($p < 0,05$), indicando que ficaram mais esverdeadas ($-a^*$).

O parâmetro b^* foi significativamente menor ($p < 0,05$) para as amostras liofilizadas em relação às desidratadas por ar, sendo estas mais azuladas ($-b^*$). As amostras branqueadas foram significativamente maiores ($p < 0,05$) que as sem branqueamento, para um mesmo método de secagem, sendo estas mais amareladas ($+b^*$).

Conclusão

A cinética de secagem em ar forçado indicou rápida diminuição dos valores de umidade e atividade de água durante os primeiros 150 minutos de secagem. Os valores de umidade finais obtidos foram $0,15 \pm 0,071$ g/g de matéria seca. Enquanto que os valores de atividade de água foram próximos de $0,38 \pm 0,019$.

As isotermas de sorção para a faixa de temperatura estudada (25 a 40°C) foram independentes da temperatura, sendo que os dados experimentais foram melhor ajustados com o modelo de Henderson, com coeficiente de determinação de 0,96. As isotermas obtidas foram do tipo III, característico de produtos com alto teor de açúcares. Os valores da entalpia e entropia diferencial variaram entre 82 e 9590 J/mol e 0,40 e 46 J/mol.K, respectivamente, sendo que estes valores aumentaram para baixos conteúdos de umidade, e com o aumento de umidade, decresceram rapidamente até a curva se tornar assintótica. O valor de energia livre foi de 80,7 J/mol ($\Delta G > 0$) o que sugere que o processo é não espontâneo.

Nas amostras submetidas a branqueamento foi possível observar a degradação da microestrutura devido ao rompimento dos tecidos provocada pelo calor úmido. Nas amostras liofilizadas se observou maior dano tecidual causado pelo processo, possivelmente devido à formação cristais de gelo durante o congelamento prévio à liofilização que romperam os tecidos.

O parâmetro L^* foi significativamente maior e os parâmetros a^* e b^* foram significativamente menores para o yacon desidratado por liofilização quando comparados à desidratação por ar forçado, obtendo-se amostras mais claras, esverdeadas e azuladas. Para ambos, desidratação por ar e liofilização, se observa diferença significativa em relação às amostras *in natura*, que foram mais escuras.

Nos testes de perda de volume durante a secagem observa-se uma perda acentuada, em torno de 87%, bem como alteração visível na textura das amostras com o decorrer da secagem. Estes fatores comprovam a necessidade de se levar em conta o encolhimento ocorrido durante a desidratação para o cálculo e ajuste aos modelos de secagem.

Referências

AGÜERO, R.M.; ANSORENA, I.S.; ROURA, V.E.C. Thermal inactivation of peroxidase during blanching of butternut squash. **Food Science and Technology**, v. 41, p. 401-407, 2008.

AJIBOLA, O.O. Desorption isotherms for plantain at several temperatures. **Journal of Food Science**, v. 51 (1), 1986.

AJIBOLA, O.O.; AVIRA, N.A.; AJETUMOBI, O.E. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Food Engineering**, v. 58, p. 317-324, 2003.

ALVES, O.C.C.; RESENDE, V.J.; PRADO, T.E.M.; CRUVINEL, R.S.R. The effects of added sugars and alcohols on the induction of crystallization and the stability of freeze-dried peki (*Caryocar brasiliense Camb*) fruit pulps. **Food Science and Technology**, v. 43, p. 934-941, 2010.

AL-MUHTASEB, A.H.; MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v. 62, p. 135-142, 2004.

ANCOS, B.; CANO, P.M.; HERNANDEZ, A.; MONREAL, M. Effects of microwave heating on pigment composition and colour of fruit purees. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 79, p. 663-670, 1999.

AOAC. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Washington, DC, 1984.

AOAC. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Washington, DC, 1990.

APOSTOPOULOS, D.; GILBERT, S. Water sorption of coffee soluble by frontal inverse gas chromatography: thermodynamic considerations. **Journal of Food Science**, v. 55, p. 475-477, 1990.

AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O.O.; ONI, S.A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v. 87 (2), p. 179-190, 2004.

BENADO, A.L.; RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of water on rice as calculated from reversible and irreversible isotherms. **Journal of Food Science**, v. 50, p. 101-105, 1985.

BERINSTAIN, C.I.; GARCIA, H.S.; AZUARA, E. Enthalpy-entropy compensation in food vapor adsorption. **Journal of Food Engineering**, v. 30, p. 405-415, 1996.

CHRONAKIS, I.S.; TRIANTAFYLLOUB, A.; ÖSTE, R. Solid-state characteristics and redispersible properties of powders formed by spray-drying and freeze-drying cereal dispersion of varying (1 \rightarrow 3,1 \rightarrow 4)- β -glucan content. **Journal of Cereal Science**, v. 40, p. 183-193, 2004.

CLADERA-OLIVERA, F.; PETTERMANN, A.C.; NOREÑA, C.P.Z.; WADA, K.; MARCZAK, L.D.F. Thermodynamic properties of moisture desorption of raw pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 43, p. 900-907, 2008.

DANILATOS, G.D. Introduction to the ESEM instrument. **Microscopy Research and Technique**, v. 25, p. 354-361, 1993.

DUARTE, L.C.; JUCHEM, P.L.; PULZ, G.M.; BRUM, T.M.M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A.C.; ACAUAN, R.B. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, v.30 (2), p. 3-15, 2003.

FASINA, O.O. Thermodynamic properties of sweetpotato. **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 149-155, 2006.

GARCÍA-PÉREZ, J.V.; CÁRCEL, J.A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **LWT – Lebensmittel-Weissenschaft & Technology**, v. 41, p. 18-25, 2008.

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

HAULY, M.C.O.; MOSCATO, J.A. Inulina e oligofruktoses: uma revisão sobre propriedades funcionais, efeito prebiótico e importância na indústria de alimentos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 23 (1), p. 105-118, 2002.

HOSSAIN, M.D.; BALA, B.K.; HOSSAIN, M.A.; MONDOL, M.R.A. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 103-107, 2001.

JAMES, B. Advances in "wet" electron microscopy techniques and their application to the study of food structure. **Trends in Food Science and Technology**, v. 20, p. 114-124, 2009.

KARATHANOS, V.; ANGLEA, S.; KAREL, M. Collapse of structure during drying of celery. **Drying Technology**, v. 11, p. 1005-1023, 1993.

LI, Y.; XU, S.Y.; SUN, W. Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. **Journal of Food Engineering**, v. 83, p. 76-83, 2007.

LOZANO, J.E.; IBARZ, A. Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 31, p. 365-373, 1997.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v.28, p. 109-119, 1996.

MARTINS, B.T. Tecnologia de secagem preserva as características dos alimentos. **Revista Engenharia de Alimentos**, v. 6, n. 30, p. 40-42, 2000.

MASKAN, M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 169-175, 2001.

MASKAN, M.; GÖGUS, F. The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nuts paste. **Journal of Food Engineering**, v. 33, p. 227-237, 1997.

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

MAZZA, G.; LEMAGUER, M. Dehydration of onions: some theoretical and practical considerations. **Journal of Food Technology**, v. 15, p. 181-194, 1980.

MOSCATTO, J.A.; BORSATO, D.; BONA, E.; OLIVEIRA A.S.; HAULY, M.V. O. The optimization of the formulation for a chocolate cake containing inulin and yacon meal. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 41 (2), p. 181-188, 2006.

MULET, A.; GARCÍA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; GARCÍA-REVERTER, J. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, v. 53, p. 75-81, 2002.

PABIS, S. The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.72, p. 187-195, 1999.

PINEDO, A.A.; MURR, F.E.X. Influence of pressure and temperature and pre treatments in the carrot and pumpkin vacuum drying. **Food Science and Technology**, v. 25, p. 636-643, 2005.

PEDRO, M.A.M.; TELIS-ROMERO, H.; TELIS, V.R.N. Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp powder. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30 (4), p. 993-1000, out.-dez., 2010.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value food: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 311-310, 2001.

SAAD, S.M.I. Probióticos e prébióticos: o estado da arte. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v.42, n.1, p. 1-16, 2006.

SAMANIEGO-ESGUERRA, C.M.; BOAG, I.F.; ROBERTSON, G.L. Comparison of regression methods fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruits and vegetables. **Journal of Food Engineering**, v.13, p. 115-133, 1991.

SANTANA, I.; CARDOSO, M.H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**, v.38, 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. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p. 2169-2175, 2009.

SHIVHARE, U.S.; ARORA, S.; AHMED, J.; RAGHAVAN, G.S.V. Moisture adsorption isotherms for mushroom. **LWT – Lebensmittel-Weissenschaft & Technology**, v. 37, p. 133-137, 2004.

STENCL, J. Modelling the water sorption isotherms of yoghurt powder spray. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 65, p. 157-164, 2004.

SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**, v. 41, p. 1189-1193, 1976.

TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochemica Acta**, v. 343, p. 49-56, 2000.

THYS, R.C.S.; NOREÑA, C.P.Z.; MARCZAK, L.D.F.; AIRES, A.G.; CLADERA-OLIVERA, F. Adsorption isotherms of pinhão (*araucaria angustifolia* seeds) starch

and thermodynamic analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 100, p. 468-473, 2010.

TONELI, L.C.T.J.; PARK, J.K; MURR, X.E.F.; NEGREIROS, A.A. Effect of moisture on the microstructure of inulin powder. **Food Science and Technology**, v. 28 (1), p. 122-131, 2008.

TOPUZ, A.; FENG, H.; KUSHAD, M. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. **Food Science and Technology**, v. 42, p. 1667-1673, 2009.

TSAMI, E. Differential enthalpy of sorption in dried fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 327-335, 1991.

UYAR, R.; ERDOGDU, F. Potencial use of 3-dimensional scanners for food process modeling. **Journal of Food Engineering**, v. 93, p. 337-343, 2009.

ZARDINI, E. Ethnobotanical notes on "Yacon", *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). **Economix Boanic Bronx**, v. 45, p. 72-85, 1991.

REFERÊNCIAS

- AGÜERO, R.M.; ANSORENA, I.S.; ROURA, V.E.C. Thermal inactivation of peroxidase during blanching of butternut squash. **Food Science and Technology**, v. 41, p. 401-407, 2008.
- AGUILERA, J.M.; STANLEY, D.W. Microstructural Principles of Food Processing and Engineering. 2 ed., Aspen Publication, 1999.
- AJIBOLA, O.O. Desorption isotherms for plantain at several temperatures. **Journal of Food Science**, v. 51 (1), 1986.
- AJIBOLA, O.O.; AVIRA, N.A.; AJETUMOBI, O.E. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Food Engineering**, v. 58, p. 317-324, 2003.
- AL-MUHTASEB, A.H.; MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v. 62, p. 135-142, 2004.
- ALVES, O.C.C.; RESENDE, V.J.; PRADO, T.E.M.; CRUVINEL, R.S.R. The effects of added sugars and alcohols on the induction of crystallization and the stability of freeze-dried peki (*Caryocar brasiliense Camb*) fruit pulps. **Food Science and Technology**, v. 43, p. 934-941, 2010.
- ANCOS, B.; CANO, P.M.; HERNANDEZ, A.; MONREAL, M. Effects of microwave heating on pigment composition and colour of fruit purees. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 79, p. 663-670, 1999.
- AOAC. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Washington, DC, 1984.
- AOAC. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Washington, DC, 1990.
- APOSTOPOULOS, D.; GILBERT, S. Water sorption of coffee soluble by frontal inverse gas chromatography: thermodynamic considerations. **Journal of Food Science**, v. 55, p. 475-477, 1990.
- AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O.O.; ONI, S.A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v. 87 (2), p. 179-190, 2004.
- BARREIRO, J.A.; MILANO, M.; SANDOVAL, A.J. Kinetics of colour change of Double concentrated tomato paste during thermal treatment. **Journal of Food Engineering**, v. 33, p. 359-371, 1997.
- BENADO, A.L.; RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of water on rice as calculated from reversible and irreversible isotherms. **Journal of Food Science**, v. 50, p. 101-105, 1985.

BERINSTAIN, C.I.; GARCIA, H.S.; AZUARA, E. Enthalpy-entropy compensation in food vapor adsorption. **Journal of Food Engineering**, v. 30, p. 405-415, 1996.

CHRONAKIS, I.S.; TRIANTAFYLLOUB, A.; ÖSTE, R. Solid-state characteristics and redispersible properties of powders formed by spray-drying and freeze-drying cereal dispersion of varying (1→3,1→4)-β-glucan content. **Journal of Cereal Science**, v. 40, p. 183-193, 2004.

CLADERA-OLIVERA, F.; PETTERMANN, A.C.; NOREÑA, C.P.Z.; WADA, K.; MARCZAK, L.D.F. Thermodynamic properties of moisture desorption of raw pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 43, p. 900-907, 2008.

DANILATOS, G.D. Introduction to the ESEM instrument. **Microscopy Research and Technique**, v. 25, p. 354-361, 1993.

DUARTE, L.C.; JUCHEM, P.L.; PULZ, G.M.; BRUM, T.M.M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A.C.; ACAUAN, R.B. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, v.30 (2), p. 3-15, 2003.

FANTE, L. **Estudo da cinética de branqueamento e de secagem por ar quente e liofilização do alho (*Allium sativum* L.)**. Dissertação de mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2011.

FASINA, O.O. Thermodynamic properties of sweetpotato. **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 149-155, 2006.

GARCÍA-PÉREZ, J.V.; CÁRCEL, J.A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **LWT – Lebensmittel-Weissenschaft & Technology**, v. 41, p. 18-25, 2008.

GEANKOPLIS, C.J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. México, Cia Editorial Continental, 1986.

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

HATAMIPOUR, M.S.; KAZEMI, H.H.; NOORALIVAND A.; NOZARPOOR, A. Drying characteristics of six varieties of sweet potatoes in different dryers. **Food and Bioproducts Processing**, v. 85 (C3), p. 171-177, 2007.

HAULY, M.C.O.; MOSCATO, J.A. Inulina e oligofrutoses: uma revisão sobre propriedades funcionais, efeito prebiótico e importância na indústria de alimentos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 23 (1), p. 105-118, 2002.

HOSSAIN, M.D.; BALA, B.K.; HOSSAIN, M.A.; MONDOL, M.R.A. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 103-107, 2001.

JAMES, B. Advances in “wet” electron microscopy techniques and their application to the study of food structure. **Trends in Food Science and Technology**, v. 20, p. 114-124, 2009.

KARATHANOS, V.; ANGLEA, S.; KAREL, M. Collapse of structure during drying of celery. **Drying Technology**, v. 11, p. 1005-1023, 1993.

KONICA MINOLTA. **Comunicação precisa da cor**. 59 p., 1998.

LACHMANN, J.; FERNANDÉZ, E.C.; ORSÁK, M. Yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poep. et Endl.) H. Robinson] chemical composition and use – a review. Czech University of Agriculture in Prague, Czech Republic. **Plant Soil Environment**, v. 49 (6), p. 283-290, 2003.

LAGO, C. **Estudo do suco concentrado e da polpa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*)**. Dissertação de mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2010.

LAGO, C.; BERNSTEIN, A.; BRANDELLI, A.; NOREÑA, C.P.Z. Characterization of powdered yacon (*Smallanthus sonchifolius*) juice and pulp. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, 2011.

LI, Y.; XU, S.Y.; SUN, W. Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum and vacuumdrying as well as microencapsulation. **Journal of Food Engineering**, v. 83, p. 76-83, 2007.

LOZANO, J.E.; IBARZ, A. Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 31, p. 365-373, 1997.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v.28, p. 109-119, 1996.

MARTINS, B.T. Tecnologia de secagem preserva as características dos alimentos. **Revista Engenharia de Alimentos**, v. 6, n. 30, p. 40-42, 2000.

MASKAN, M.; GÖGÜS, F. The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nuts paste. **Journal of Food Engineering**, v. 33, p. 227-237, 1997.

MASKAN, M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 169-175, 2001.

MATHLOUTHI, M.; ROGÉ, B. Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. **Food Chemistry**, v. 82, p. 61-71, 2003.

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

MAZZA, G.; LEMAGUER, M. Dehydration of onions: some theoretical and practical considerations. **Journal of Food Technology**, v. 15, p. 181-194, 1980.

MONTAN, M. **As fibras invisíveis**. Revista Brasil Alimentos, n. 19, v.4, 2003.

MOSCATTO, J.A.; BORSATO, D.; BONA, E.; OLIVEIRA A.S.; HAULY, M.V. O. The optimization of the formulation for a chocolate cake containing inulin and yacon meal. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 41 (2), p. 181-188, 2006.

MULET, A.; GARCÍA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; GARCÍA-REVERTER, J. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, v. 53, p. 75-81, 2002.

ORDÓÑEZ, J.A.; RODRÍGUEZ, L.F.; SANZ, M.L.G.; MINGUILLÓN, G.D.G.F.; PERALES, L.H.; CORTECERO, M.D.S. **Tecnología de Alimentos**. v.1, Artmed, 2005.

PABIS, S. The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.72, p. 187-195, 1999.

PEDRO, M.A.M.; TELIS-ROMERO, H.; TELIS, V.R.N. Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp powder. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30 (4), p. 993-1000, out.-dez., 2010.

PINEDO, A.A.; MURR, F.E.X. Influence of pressure and temperature and pre treatments in the carrot and pumpkin vacuum drying. **Food Science and Technology**, v. 25, p. 636-643, 2005.

POTTER, N.N.; HOTCHKLSS, J.H. **Food Science**. New York: Chapman e Hall. 1998. 608 p.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value food: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 311-310, 2001.

REJANO, L.; SANCHEZ, A.H.; CASTRO, A. de; MONTANO, A. Storage stability of pickled garlic prepared using different processes. **Journal of Food Science**, v. 62, n. 6, 1997.

SAAD, S.M.I. Probióticos e prébióticos: o estado da arte. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v.42, n.1, p. 1-16, 2006.

SÁENZ, C.; SEPÚLVEDA, E.; ARAYA, E. Colour changes in concentrated juices of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) during the storage at different temperatures. **Lebensm. Wiss.-U-Technology**, v. 26, p. 417-421, 1993.

SAMANIEGO-ESGUERRA, C.M.; BOAG, I.F.; ROBERTSON, G.L. Comparison of regression methods fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruits and vegetables. **Journal of Food Engineering**, v.13, p. 115-133, 1991.

SANTANA, I.; CARDOSO, M.H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**, v.38, 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. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p. 2169-2175, 2009.

SHIVHARE, U.S.; ARORA, S.; AHMED, J.; RAGHAVAN, G.S.V. Moisture adsorption isotherms for mushroom. **LWT – Lebensmittel-Weissenschaft & Technology**, v. 37, p. 133-137, 2004.

SILVA, A.S.S. **A raiz do yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepping & Endlicher) como fonte de fibras alimentares, sua caracterização físico-química, uso na panificação e sua influência na glicemia pós-prandial.** Dissertação de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2007.

STENCL, J. Modelling the water sorption isotherms of yoghurt powder spray. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 65, p. 157-164, 2004.

SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**, v. 41, p. 1189-1193, 1976.

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

TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v. 343, p. 49-56, 2000.

THYS, R.C.S.; NOREÑA, C.P.Z.; MARCZAK, L.D.F.; AIRES, A.G.; CLADERA-OLIVERA, F. Adsorption isotherms of pinhão (*araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 100, p. 468-473, 2010.

TONELI, L.C.T.J.; PARK, J.K; MURR, X.E.F.; NEGREIROS, A.A. Effect of moisture on the microstructure of inulin powder. **Food Science and Technology**, v. 28 (1), p. 122-131, 2008.

TOPUZ, A.; FENG, H.; KUSHAD, M. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. **Food Science and Technology**, v. 42, p. 1667-1673, 2009.

TSAMI, E. Differential enthalpy of sorption in dried fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 327-335, 1991.

UYAR, R.; ERDOGDU, F. Potencial use of 3-dimensional scanners for food process modeling. **Journal of Food Engineering**, v. 93, p. 337-343, 2009.

VAN LOO, J.; COUSSEMENT, O.; DE LEENHEER, L.; HOEBREGS, H.E.; SMITS, G. On the presence of inulin and oligofructose as natural ingredients in the Western diet. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 35, p. 522-552, 1995.

WENDT, S.C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2006.

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 (11), p. 4711-4713, 1999.

ZARDINI, E. Ethnobotanical notes on "Yacon", *Polymnia sonchifolia* (Asteraceae). **Economix Boanic Bronx**, v. 45, p. 72-85, 1991.