
**ESTUDIO TERMODINÁMICO Y ESPECTROFOTOMÉTRICO DEL SECADO
DE PASTA FORMULADA CON HARINA DE CHUFA**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL MEDI
NATURAL



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTION DE LA CALIDAD Y SEGURIDAD
ALIMENTARIA**

ALUMNO: Gabriela Massiel Rodríguez Sepúlveda

TUTOR: Pedro Fito Suñer

Cotutor: Marta Castro Giraldez

Cotutor: María Eugenia Martín Esparza

Resumen

En este trabajo se formuló pasta a partir de harina de chufa y se secó a baja temperatura (40°C, 1,5 m/s) durante distintos tiempos de secado (10, 20, 40, 80, 140 y 200 min), analizando la masa, el volumen, la humedad y la actividad del agua, antes del tratamiento, inmediatamente después del tratamiento y tras 24h de reposo (envasado y atemperado a 4°C).

Controlando las condiciones del aire de secado, las deformaciones volumétricas y las propiedades fisicoquímicas de la pasta a lo largo del secado, se desarrolló un modelo termodinámico que incluye el desarrollo de una isoterma de sorción y de un modelo cinético de transporte, que permitió el desarrollo de algoritmos de control de secado de pasta con harina de chufa.

Palabras clave: pasta, harina de chufa, secado, cinética, termodinámica.

Abstract

In this work, tiger nut pasta was formulated and dried at low temperature (40 °C, 1.5 m/s) during different drying times (10, 20, 40, 80, 140 y 200 min). Mass, volume, water content, water activity and permittivity (Hz-MHz) were determined before the treatment, immediately after drying and after 24 hours of storage (packaging and tempering at 4 °C).

Controlling the drying air conditions, the volumetric deformations and the physicochemical properties of the paste during the drying, a thermodynamic model was developed including the development of a sorption isotherm and a transport kinetic model, which allowed the development of drying control algorithms of tiger nut pasta.

Keywords: pasta, tiger nut flour, drying, kinetics, thermodynamics

INTRODUCCIÓN

La pasta es un alimento de gran consumo y de alta aceptabilidad a nivel mundial debido a su bajo costo, su facilidad de transporte, manipulación, cocinado y almacenamiento (Sabanis et al., 2006) Debido a que la pasta es un alimento ampliamente difundido y consumido en el mundo, está considerado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Food and Drug Administration (FDA) como un buen vehículo para la adición de nutrientes, pudiendo así ayudar a mejorar la salud de los consumidores. Una de las formas posibles de mejorar las propiedades nutricionales y funcionales de la pasta consiste en sustituir total o parcialmente la sémola de trigo duro por “harinas” no convencionales. En el presente trabajo se ha empleado con este fin harina de chufa (*Cyperus esculentus* L.). El principal componente en la harina de chufa es el almidón, con un 26%, seguido de la fibra (15-24%), de los lípidos (24%) y de los azúcares (mayoritariamente sacarosa) con un 21%. Con mucha menor proporción se encuentran las proteínas (4%). Se ha encontrado que el 84% de los lípidos de la chufa son ácidos grasos insaturados, con cantidades apreciables de ácido mirístico, ácido oleico y ácido linoleico (Eteshola & Oraedu, 1996). Las proteínas de la chufa son ricas en aminoácidos esenciales (Bosch et al., 2005). Los minerales que destacan son el potasio, el fósforo, magnesio, sodio, calcio, hierro, estos dos últimos favorecen el crecimiento (Oladele & Aina, 2007). Además las chufas son una fuente rica en vitaminas como la C y E, y en antioxidantes naturales (Adejuyitan, 2011).

El uso de temperaturas altas (60-84°C) o muy altas (>84°C) se ha ido imponiendo en la industria de las pastas alimenticias desde los años 70 debido a la enorme reducción en los tiempos de secado (hasta 2-3h) y la mejora de los estándares higiénicos (Sicignano et al., 2015). Sin embargo, las altas temperaturas pueden ocasionar un elevado daño térmico, dando lugar a colores y olores no deseados (reacciones de Maillard), reducción en el valor nutritivo de las proteínas (al disminuir la cantidad disponible de lisina y metionina) y formación de compuestos no deseados (Sicignano et al., 2015). Zhang et al. (2013) demostraron que la distribución de humedad en la pasta durante su cocción depende de la temperatura empleada en el secado y que temperaturas de secado por debajo de la de gelatinización del almidón supone una mayor capacidad de absorción de agua (mejor comportamiento en la cocción). Cuando se emplean temperaturas bajas ($\leq 50^{\circ}\text{C}$), no se produce un cambio conformacional de las gluteninas (lo que podría dar lugar a agregados de proteína que impedirían el acceso del agua a los gránulos de almidón) (Lagrain et al., 2008) y además la formación de complejos amilosa-lípido es inferior (Zhang et al., 2013). La humedad de la pasta ronda el 30% al inicio del secado, pero la mayor parte del agua es eliminada en la primera etapa del secado, por lo que no se espera que quede suficiente agua durante el proceso para causar el completo hinchamiento y gelatinización del almidón. Y mucho menos si la temperatura de secado es baja.

Es sabido que el conocimiento de la relación de la actividad del agua +y el contenido de humedad de equilibrio de los alimentos es importante para predecir los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que ocurren durante el almacenamiento y transformación (Moreira et al., 2008). Esta relación entre la actividad del agua y el contenido de humedad de equilibrio a una temperatura constante es llamada isoterma de sorción, que hace referencia a procesos de adsorción (hidratación o rehidratación) o de desorción (deshidratación). Los datos experimentales son ajustados generalmente a diferentes modelos. Existe una gran variedad de ellos, utilizados para describir el comportamiento de las isotermas de sorción (Guglielmone et al., 2007). El de Guggenheim, Anderson y De Boer (G.A.B.), para la región de multicapas tiene un interés práctico debido a su número razonablemente reducido de tres parámetros y a que representa adecuadamente los datos experimentales en un intervalo de actividades del agua de 0 a 0,95 para la mayoría de los alimentos.

En el secado industrial, el objetivo es usar la mínima cantidad de energía necesaria para eliminar el agua y alcanzar la humedad y actividad del agua deseadas en el producto final. Para entender las interacciones de energía y el comportamiento termodinámico durante el secado convectivo, es necesario realizar balances de energía empleando la primera y segunda ley de la termodinámica (Akpınar et al., 2006). Durante el secado de la pasta, el flujo de calor inducido por el gradiente de temperaturas del aire entre el interior y el exterior de la cámara de secado tiene lugar desde la superficie al interior del producto, mientras que el transporte de agua tiene lugar en sus formas líquida y gaseosa en sentido inverso (Datta, 2007). La evaluación de los perfiles de agua en el interior de la pasta durante su secado es de gran importancia para ajustar la calidad del producto final, minimizando la formación de fisuras en superficie y logrando alcanzar las condiciones de transición vítrea uniformemente (Mercier et al., 2014). Los modelos físicos o matemáticos son importantes para simular qué ocurre durante el secado y por tanto para predecir los valores de las propiedades relevantes y deseadas en el producto final.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo termodinámico que ayude a comprender los mecanismos de transporte de calor y de agua que tienen lugar durante el secado convectivo de pasta a bajas temperaturas y formulada con sustitución parcial de sémola de trigo duro por harina de chufa, y poder predecir así las transformaciones químicas y estructurales que tengan lugar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materias primas

Para la elaboración de la pasta se utilizó sémola de trigo duro, harina de chufa, huevo y agua potable. La sémola de trigo duro fue suministrada por un

proveedor de la industria agroalimentaria, Harineras Villamayor, S.A. (Huesca, España). La harina de chufa se adquirió en la empresa Tigernuts Traders S.L. (L'Eliana, Valencia). Por último, se utilizaron huevo y agua embotellada adquiridos en un supermercado local (Valencia, España). Se empleó un mismo lote de todas las materias primas.

2.2. Elaboración de la pasta

La pasta fue elaborada utilizando una combinación de sémola de trigo duro (42,6%), harina de chufa (28,4%), huevo (15%) y agua (13%). En primer lugar, se procedió a pesar las materias primas en una balanza Mettler Toledo Modelo AB304-S con precisión de 0,0001 g. A continuación se mezclaron los ingredientes sólidos y líquidos utilizando un equipo Thermomix modelo TM-31 (Vorwerk España M.S.L., S.C., Madrid). La mezcla obtenida fue amasada a velocidad de espiga por un período de 5 min en la Thermomix. Una vez se terminó el amasado, se dejó reposar la mezcla por 5 min. Pasado este tiempo, se repitió el amasado a velocidad de espiga por un tiempo de 5 minutos. A la masa obtenida se le dio forma de bola de forma manual y se dejó reposar en una bolsa cerrada herméticamente durante 20 minutos a 4°C. A continuación, se realizó el laminado de la masa en una laminadora modelo A 2500 (Imperia, Italia) acoplada a un motor eléctrico que permite laminar a una velocidad constante. El espesor final de la lámina fue de aproximadamente 1 mm. Finalizado el laminado, se procedió a cortar la masa laminada en secciones de 2 cm x 2 cm.

A continuación se procedió al secado de la pasta, en condiciones controladas de temperatura y velocidad del aire (40°C, 1,5 m/s) en un secador convectivo construido a nivel laboratorio (Martín et al., 2003; Figura 2.1). La pasta se secó hasta alcanzar actividades de agua inferiores a 0,5 (valor alcanzado por la pasta comercial). Transcurridos diferentes tiempos de secado (10, 20, 40, 80, 140 y 200 min), se determinaron en la pasta los siguientes parámetros: actividad del agua (a_w), humedad (x_w), masa, volumen y permitividad dieléctrica. La metodología empleada se describe a continuación.

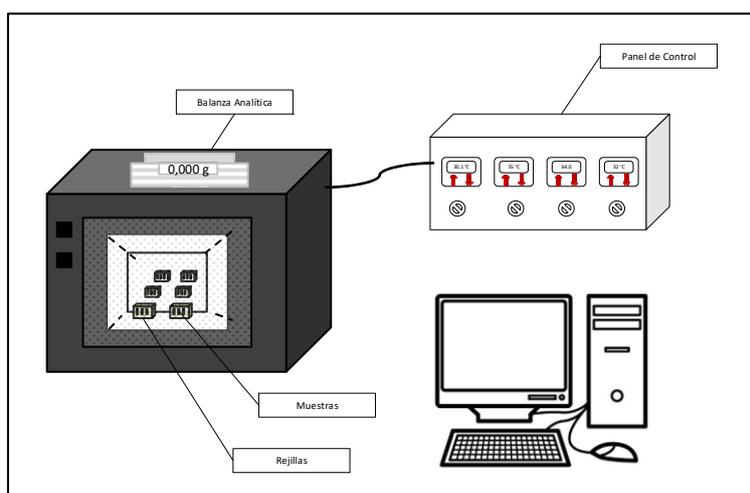


Figura 2.1. Esquema del secador empleado

2.3. Determinaciones analíticas

2.3.1. Actividad del agua (a_w)

La a_w se midió a las muestras frescas (antes del secado) y en las muestras tratadas utilizando un equipo AquaLab Serie 3, con precisión de $\pm 0,003$. Las medidas de la pasta cruda fueron tomadas una vez se terminó de laminar y seccionar todas las muestras. En el caso de la pasta seca, se hicieron medidas en diferentes tiempos de secado (10 min, 20, 40 min, 140, y 200 min). Así mismo fueron medidas las muestras tratadas dichos tiempos y pasadas 24 horas de su tratamiento (conservadas a 4°C).

2.3.2. Contenido de agua (x_w)

Para la determinación de la humedad se utilizó una estufa SELECTA, en donde se estableció una temperatura de 130 °C \pm 1°C. La pérdida de agua que experimentaron las muestras fueron medidas hasta conseguir un peso constante, usando el método gravimétrico AACC 44-40 (AACC, 2000). Para medir las variaciones de masa en las muestras se empleó una Mettler Toledo Modelo AB304-S con precisión de 0,0001 g.

2.3.3. Volumen

Para la obtención de las medidas se utilizó papel milimetrado y el software Photoshop CS5 de la compañía Adobe. Se hicieron fotos de las diferentes muestras, tanto a las que no habían sido tratadas y aquellas que fueron tratadas en los diferentes tiempos que se habían determinado el mismo día del secado y después de pasadas 24 horas a 4°C. Una vez se obtuvieron las fotos, éstas fueron procesadas en el programa antes mencionado y con la herramienta de regla se pudieron determinar las dimensiones de las mismas. En cuanto al grosor de las láminas de pasta se utilizó un pie de rey (PCE- DCP 200N, PCE Ibérica S.L., Albacete, España).

2.3.4. Densidad aparente y densidad real

Se pesó una muestra no tratada en la balanza Mettler Toledo Modelo AB304-S para así obtener su masa, y se procedió a determinar el volumen utilizando el método que fue descrito con anterioridad. Teniendo la masa y el volumen determinado, se calculó la densidad aparente. Para determinar la densidad real se utilizó el método del picnómetro considerando aceite de girasol como sustancia de referencia.

2.3.5. Isotherma de sorción

Se llevó a cabo un proceso de secado para modelar la isoterma de desorción. Las muestras de pasta fueron colocadas en el interior del secador convectivo, en rejillas. Se colocaron 6 rejillas, en cada una de las cuales se colocaron 3 láminas de pasta de forma vertical. Por tanto, se secó un total de 18 muestras en 6 rejillas, colocadas en dos columnas de 3 filas. Cada rejilla correspondía a

un tiempo de secado y punto diferente de la curva isotérmica. Los tiempos considerados fueron 10 min, 20 min, 40 min, 80 min, 140 min y 200 min. Pasado cada uno de ellos, la correspondiente rejilla era sacada para el posterior análisis de la pasta según la metodología descrita previamente (a_w , x_w , masa y volumen).

La temperatura del aire de secado y la humedad relativa del ambiente fueron medidas a través de la temperatura y humedad registrada en el panel de control del equipo. En el caso de la temperatura ambiente, ésta fue medida a través de un termómetro HIBOK 14 con una precisión de $\pm(0.3\%) + 1^\circ \text{C}$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variación de masa de las muestras durante el proceso de secado se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$\Delta M = \frac{M^t - M^0}{M^0} \quad (3.1)$$

Donde M representa la masa de la muestra (kg) y el superíndice t representa el tiempo del proceso, siendo 0 el tiempo inicial. La curva de variación de masa se puede observar en la figura 3.1. Como es un proceso de secado, la variación de masa total de la muestra durante el proceso se debe a la pérdida de agua.

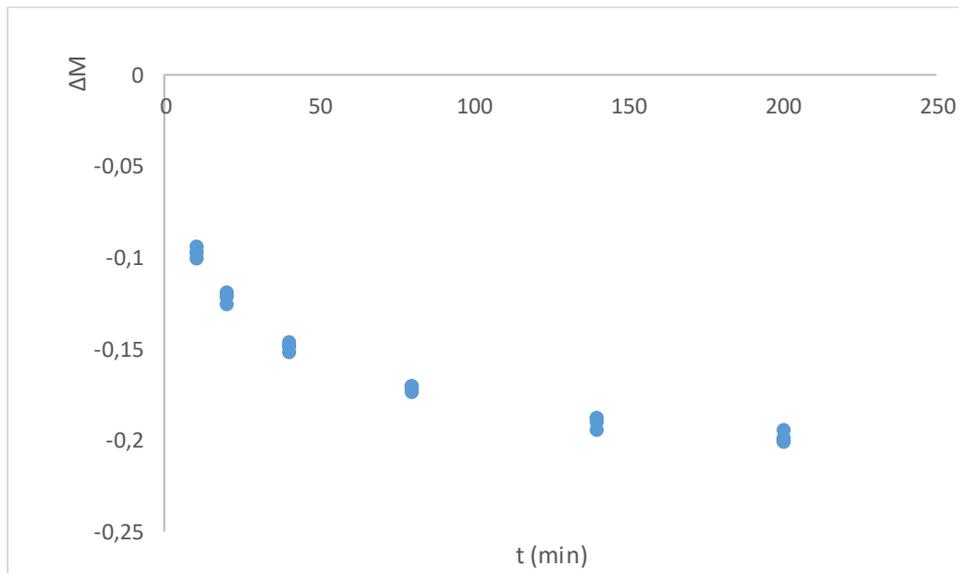


Figura 3.1. Variación de masa total de las muestras de pasta durante el secado.

El proceso de secado envuelve fenómenos estructurales complejos que difícilmente se explican con modelos tradicionales. El uso de la termodinámica irreversible permite tener en cuenta la estructura en el transporte de agua durante el secado. La variación de la energía libre de Gibbs se puede analizar mediante la siguiente ecuación (Castro-Giráldez et al., 2010):

$$dG = -SdT + VdP + Fdl + \psi de + \sum_i \mu_i dn_i \quad (3.2)$$

Donde: SdT corresponde con el término entrópico y está relacionado con los flujos de calor; VdP corresponde con el término de energías mecánicas relacionadas con la variación de presión; Fdl corresponde con el término de energías mecánicas relacionadas con la fuerza de elongación; ψde corresponde con el término de energías relacionadas con el campo eléctrico inducido por los iones disueltos; $\sum_i \mu_i dn_i$ corresponde con el término de actividades y es el sumatorio del potencial químico de la especie "i", siendo constantes el resto de las variables de estado.

Para poder analizar termodinámicamente el proceso, es necesario definir una interfase (Figura 3.2).

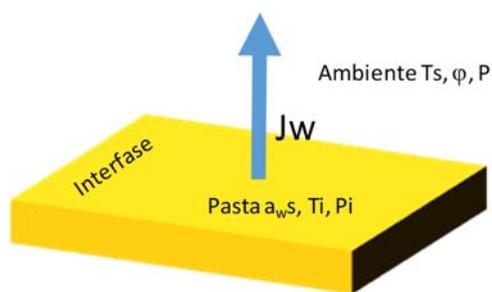


Figura 3.2. Esquema de la interfase de la muestra de pasta durante el secado.

Si se considera la variación de energía libre por mol de agua, es posible definir el potencial químico extendido del agua de acuerdo con la ecuación 3.3.

$$\Delta\mu_w = \frac{\Delta G}{\Delta n_w} \quad (3.3)$$

Donde: $\Delta\mu_w$ = potencial químico del agua ($J \cdot mol^{-1}$); ΔG = variación de la energía libre de Gibbs (J); Δn_w = moles de agua (mol).

A partir de las ecuaciones 3.2 y 3.3 se puede obtener la ecuación 3.4. Los términos Fdl y ψde de la ecuación 3.2 se pueden despreciar ya que la pasta se puede considerar un sistema coloidal altamente elástico en el inicio y además no existe un gran efecto de los iones debido a que se encuentran en baja proporción en la composición de la pasta, respectivamente.

$$\Delta\mu_w = -s_w (T^{aire} - T^m) + v_w (P^{aire} - P^m) + RT^m \ln \frac{a_w^m}{\varphi^{aire}} \quad (3.4)$$

Donde: s_w = entropía molar parcial del agua ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$); T = temperatura (K); v_w = volumen molar parcial de agua ($m^3 \cdot mol^{-1}$); P = presión (atm); R = constante de los gases ideales ($8,314472 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$); a_w = actividad de agua; φ = humedad relativa. Los superíndices m y $aire$ se refieren a la muestra y al aire que rodea a la misma, respectivamente.

Con el objetivo de obtener el potencial químico del agua es necesario desarrollar la entropía molar parcial del agua (Ecuación 3.5).

$$s_w = \frac{C_p^m \cdot (T^m - T^{aire}) \cdot M_t^m + \Delta G_{vap} \cdot M_0^m \Delta M_w^m}{M_t^m \cdot T^m \cdot x_w^m \cdot Mr_w} \quad (3.5)$$

Donde: C_p^m = calor específico del producto ($1,672 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, Mujumdar, 2014); T^m = temperatura superficial de la muestra (K); T^{aire} = temperatura del aire que rodea a la muestra (K); M_t^m = masa de la muestra para cada tiempo del proceso de secado (kg); ΔG_{vap} = calor latente de vaporización $2494,4 kJ \cdot kg^{-1}$ (Fletcher, 1970); M_0^m = masa inicial de la muestra (kg); ΔM_w^m = variación de masa de agua de la muestra durante el secado (-); x_w^m = fracción másica de agua de la muestra durante el secado ($kg \cdot kg^{-1}$); Mr_w = masa molecular del agua ($18 g \cdot mol^{-1}$).

A partir de la humedad para cada tiempo del proceso de secado, y la actividad de agua de las muestras, se obtuvo la isoterma de sorción de la pasta tras el tratamiento y tras 24 horas de reposo a $4^\circ C$ (Figura 3.4).

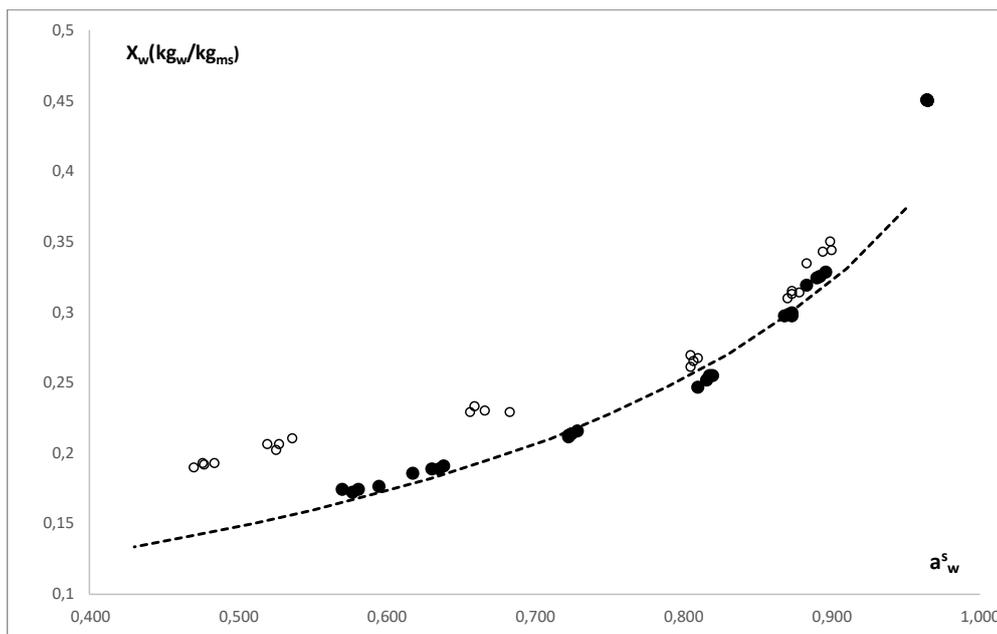


Figura 3.4. Isoterma de sorción de pasta seca con aire caliente, donde: los círculos vacíos representan las muestras tratadas sin equilibrar y los círculos llenos las muestras equilibradas.

X_{w0} (kg _w /kg _T)	C	K	Q_c (J/mol)
0,097	20,00	0,784	7796

Los datos de la isoterma de sorción se modelizaron mediante el ajuste de G.A.B., obteniendo los parámetros siguientes: humedad de la capa monomolecular $X_{w0} = 0,097$ kg_w/kg_T, parámetro $C=20$ y $K=0,784$, que se asemejan a los obtenidos por otros autores para el secado de pasta (Lagoudaqui et al., 1993).

Es posible observar como los datos de tratamiento muestran una zona de fuerte cambio de la a_w mientras se mantiene constante la humedad, esto implica un fuerte cambio conformacional que genere una fuerte retención de agua sin cambiar su proporción. Es posible que esta transformación sea la vitrificación de la pasta.

Conociendo la actividad de agua de la muestra durante el proceso y la humedad relativa del ambiente (dato proporcionado por el secador), se calculó el término de actividades de la ecuación 3.4. Por último, el término de energías mecánicas de la ecuación 3.4 no es posible calcularlo ya que no se puede medir la variación de presión de la muestra.

Aplicando las relaciones de Onsager (Castro-Giráldez et al., 2010), el flujo molar de agua está relacionado con el potencial químico del agua, como fuerza impulsora del transporte de agua, mediante el coeficiente fenomenológico (Ecuación 3.6). El coeficiente fenomenológico es constante en procesos reversibles, pero si los almacenamientos de energía mecánica producen roturas irreversibles en el medio, el coeficiente fenomenológico evolucionará en función de la transformación sufrida por el sistema.

$$J_w = L_w \cdot \Delta\mu_w \quad (3.6)$$

Donde: J_w = flujo molar de agua ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); L_w = coeficiente fenomenológico ($\text{mol}^2\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); $\Delta\mu_w$ = potencial químico del agua ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$).

Para poder entender el transporte de agua a lo largo del tejido, es importante estimar el flujo de agua mediante la ecuación (3.7).

$$J_w = \frac{\Delta M_w^m \cdot M_0^m}{\Delta t \cdot S^m \cdot Mr_w} \quad (3.7)$$

Donde J_w es el flujo de agua ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); ΔM_w^m = variación de masa de agua de la muestra durante el secado (-); M_0^m = masa inicial de la muestra (kg); Δt es el tiempo del proceso (s), S^m corresponde con la superficie de la muestra durante el tratamiento (m^2); Mr_w = masa molecular del agua (18 g mol^{-1}).

A partir de la ecuación 3.7 se obtuvo el flujo de agua durante el tratamiento (Figura 3.5).

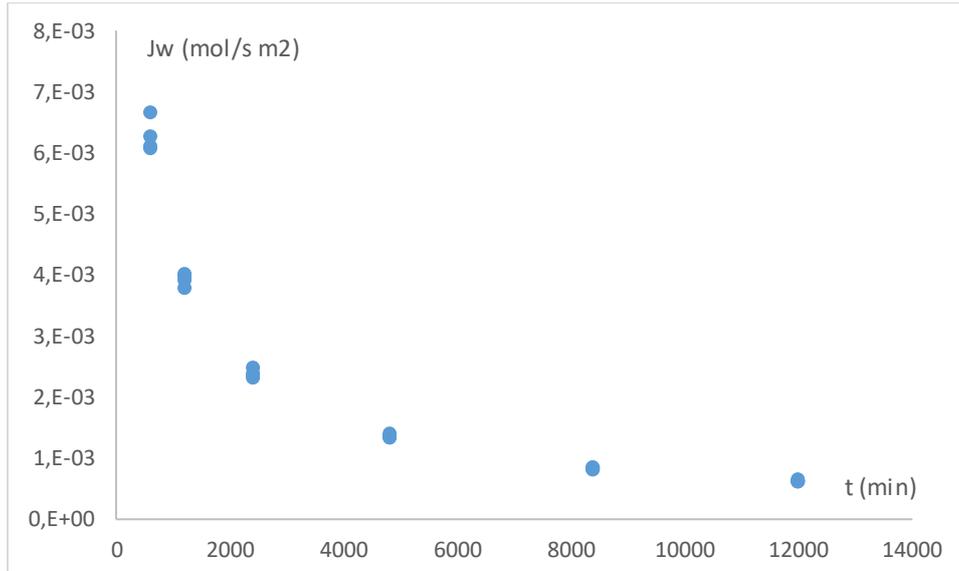


Figura 3.5. Flujo de agua durante el tratamiento de secado.

Tal y como se ha explicado anteriormente, no es posible calcular el término mecánico del potencial químico, por ello se ha determinado el potencial químico de agua sin considerar los términos mecánicos ($\Delta\mu_w^*$) mediante la ecuación 3.8.

$$\Delta\mu_w^* = -s_w (T^{aire} - T^m) + RT^m \ln \frac{a_w^m}{\varphi^{aire}} \quad (3.8)$$

La evolución de los términos entrópico y de actividad de la muestra durante el secado se puede observar en la figura 3.6, donde es posible observar la disminución de los mismos durante el tratamiento, causada por la reducción de la fuerza impulsora del mismo medida que avanza el secado.

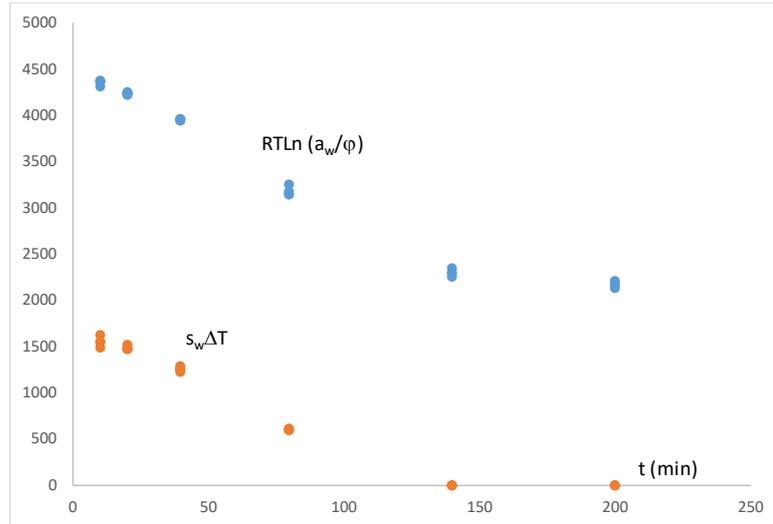


Figura 3.6. Evolución del término entrópico y de actividades del potencial químico del agua con el tiempo de secado

Aplicando las ecuaciones 3.6 a 3.8 es posible obtener el coeficiente fenomenológico sin considerar el término mecánico (L_w^*) (Ecuación 3.9).

$$L_w^* = \frac{J_w}{\Delta\mu_w^*} \quad (3.9)$$

En la figura 3.7, es posible observar la relación de L_w^* con respecto al flujo de agua (J_w). En la gráfica se puede apreciar que existe una relación lineal entre el coeficiente fenomenológico sin considerar los términos mecánicos y el flujo de agua. Por lo tanto, siguiendo esa predicción lineal del coeficiente fenomenológico y extendiéndola para todo el tratamiento de secado, se podrían estimar los términos mecánicos a partir de la siguiente ecuación:

$$v_w \Delta P = \Delta\mu_w - \Delta\mu_w^* \quad (3.10)$$

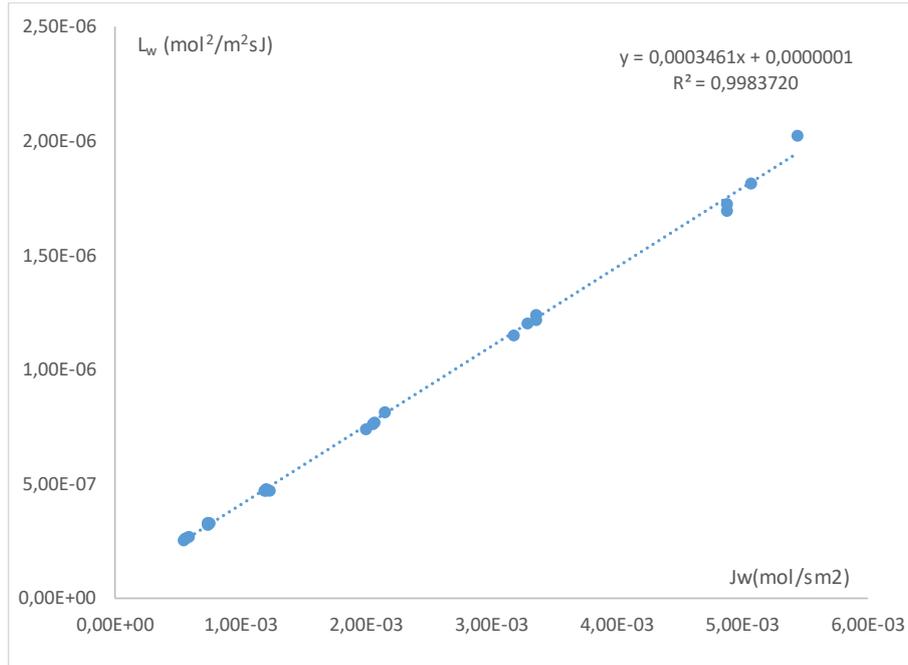


Figura 3.7. a) Relación entre el coeficiente fenomenológico sin considerar los términos mecánicos (L_w^*) y el flujo de agua durante todo el tratamiento de secado.

La evolución de la energía mecánica, desarrollada a partir del modelo termodinámico propuesto, se puede observar en la figura 3.8. En dicha figura se puede apreciar la contracción de la pasta a lo largo de todo el secado produce una retención mecánica a la pérdida de agua. Sin embargo, aproximadamente a los 100 min de proceso se produce una liberación de energía mecánica que favorece la pérdida de agua, esta fuerte liberación indica una transformación del sistema estructural, que posiblemente pase de elástico a rígido. Es decir que posiblemente la transformación inducida a este tiempo sea de segundo orden o transición vítrea en superficie. Esta transición coincide en tiempo con el fenómeno detectado en la isoterma de sorción demostrándose que el proceso de transformación es una vitrificación.

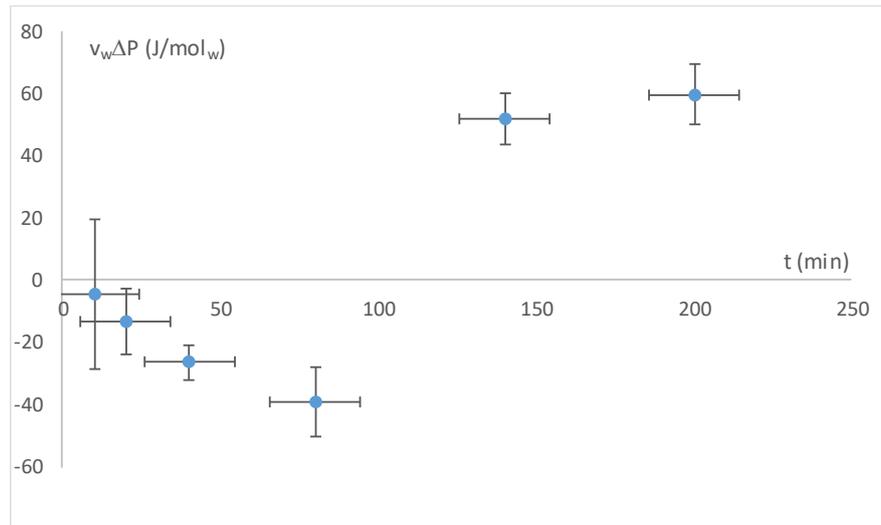


Figura 3.8. Evolución de la energía mecánica, desarrollada a partir del modelo termodinámico propuesto, a lo largo de todo el tratamiento de secado.

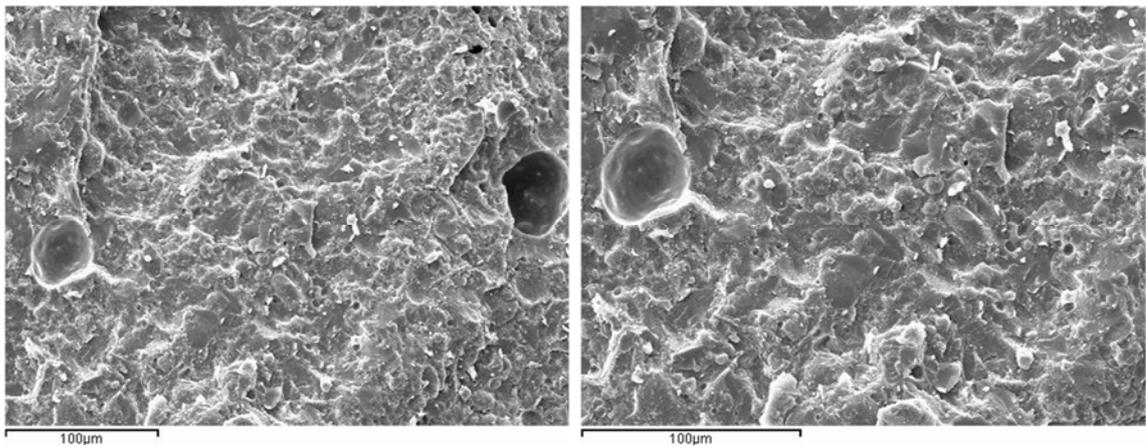


Figura 3.9. Micrografías de pasta de chufa fresca

La figura 3.9 muestra que la pasta está compuesta de almidón embebido en una red de proteínas que forma un gel, además al tener una elevada proporción de grasa proveniente de la chufa también se puede observar alguna gota de aceite de mayor tamaño. La apariencia granulada de la micrografía es típica de productos con elevado contenido en almidón.

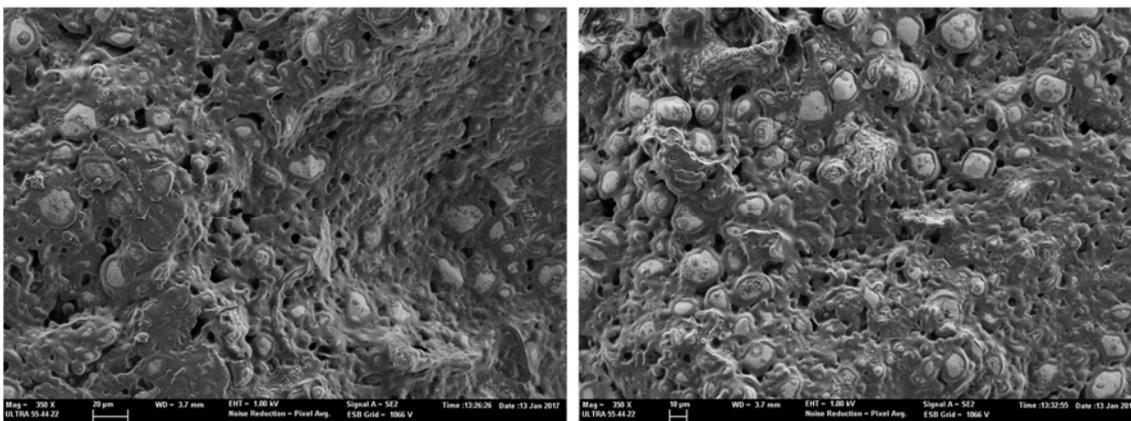


Figura 3.10. Micrografías de pasta de chufa seca

Tras la deshidratación, la red de proteínas parecía más densa, rígida, continua y compacta y se observan los poros que ha dejado la salida del agua (Figura 3.10). La deshidratación causa la contracción de la red de las proteínas de la matriz de gluten, procedentes de la harina de trigo, glutenina y gliadina. Además, produce un reordenamiento/retrogradación de los gránulos de almidón contribuyendo a la formación de un gel fuerte.

Los componentes principales de la trufa son los carbohidratos. El contenido de aceite es de aproximadamente 24,5%. Algunos autores han informado que el contenido de aceite de la trufa varía entre 22,8 y 32,8 g / 100 g (Mokady y Dolev 1970, Addy y Eteshola 1984, Linssen y otros 1988, Temple y otros 1989, Coşkuner y otros 2002). Los contenidos de lípidos, proteínas y carbohidratos de la trufa (fibra y almidón incluidos) son más altos que los de otros tubérculos mostrados en la Tabla 1. En general, los tubérculos tienen un alto contenido de carbohidratos: su perfil y contenido relativo cambian de acuerdo con las variedades de nueces de tigre y maduración. El contenido de almidón de tubérculos de nueces de tigre disminuye y el contenido de azúcar reductor (azúcar invertido) aumenta durante el almacenamiento (Coşkuner y otros 2002). Los carbohidratos del tubérculo de la tuerca del tigre se componen, principalmente, del almidón y de la fibra dietética. Los tubérculos de tuerca tigre contienen casi el doble de la cantidad de almidón que los tubérculos de patata o de camote (Coşkuner y otros 2002). Sin embargo, si se compara la tuerca del tigre con las nueces reales (Cuadro 2), se puede observar que su contenido en fibras (Alegría-Torán y Farré-Rovira 2003) se encuentra dentro del rango habitual de nueces (Ros 2010), pero su humedad y carbohidratos los contenidos son mucho más altos y los contenidos de lípidos y proteínas de la nuez de tigre son más bajos que en los frutos secos (Venkatachalam y Sathe 2006, Ros 2010, Cárcel y otros 2011, Panahia y Khezri 2011)

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado la isoterma de sorción ajustando un modelo que GAB que ha permitido obtener un punto crítico de transformación de la pasta (proceso de vitrificación).

Se ha desarrollado un modelo termodinámico capaz de describir los procesos de deshidratación superficial así como la vitrificación superficial. Dicho modelo permitirá realizar un algoritmo de control en procesos de secado de pasta.

Se ha observado mediante microscopia que el proceso de vitrificación se alcanza por la compactación de la malla de gluten, que alcanza su máxima contracción en la vitrificación.

6. BIBLIOGRAFIA

- Adejuyitan, J.A. (2011). Tigernut processing: its food uses and health benefits. *American Journal of Food Technology*, 6(3), 197-201.
- Akpinar, E.K., Midilli, A., & Bicer, Y., 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering*, 72 (4), 320-331.
- Barbosa-Cánovas, G., & Juliano, F. (2007). Desorption phenomena in food dehydration processes. *Water Activity in Foods*, 313-339.
- Bosch, L., Alegria, A., & Farre, R. (2005). RP-HPLC determination of tigernut and orgeat amino acid contents. *Food Science and Technology International*, 11, 33-40.
- Coşkuner, Y., Ercan, R., Karababa, E. & Nazlıcan, A. N. (2002). Physical and chemical properties of chufa (*Cyperus esculentus* L) tubers grown in the Çukurova region of Turkey. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82, 625-631.
- Desrosier, N. W. (1989). Elementos de Tecnología de Alimentos. En N. W. Desrosier, *Elementos de Tecnología de* (págs. 523-553). México: CECOSA.
- Escudero Álvarez, E., & Sánchez González, P. (2006). La Fibra Diética. *Nutrición Hospitalaria*, 21, 61-72.
- Eteshola, E., & Oraedu, A. (1996). Fatty acid compositions of tigernut tubers (*Cyperus esculentus* L.), baobab seeds (*Adansonia digitata* L.) and their mixture. *Journal of American Oil Chemistry Society*, 73, 255-257.
- Fito, P., Albors, A., & Barat, J. (1998). *Deshidratación de Productos Agrícolas: Secado por Aire Caliente*. Valencia: Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Guglielmone, A., Castelli, M., Mangold, A., Aguirre, D., Alcaraz, E., Cafrune, M., & Suárez, V. (2007). Isotermas de Adsorción y Cinética de Secado de Ciertas Hortalizas y Aromáticas Cultivadas en Misiones. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 36, 115-129.
- Labuza, T. P., & Altunakar, B. (2007). Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms. *Water Activity in Foods*, 104-154.
- Lagrain, B., Thewissen, B. G., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2008). Mechanism of gliadin–glutenin cross-linking during hydrothermal treatment. *Food Chemistry*, 107(2), 753–760.
- Linssen, J., Cozijnsen, J. L., & Pilnik, W. (1989). Chufa (*Cyperus esculentus* L.): a new source of dietary fibre. *Journal Science Food Agricultural*, 49, 291-296.
- Mercier, S., Marcos, B., Moresoli, C., Mondor, M., & Villeneuve, S. (2014). Modeling of internal moisture transport during durum wheat pasta drying. *Journal of Food Engineering*, 124, 19-27.
- Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M., & Vallejo, N. (2008). Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. *Journal of Food Engineering*, 88, 514-521.
- Oladele, A.K., & Aina, J.O. (2007). Chemical composition and functional properties of flour produced from two varieties of tiger nut (*Cyperus esculentus*). *African Journal of Biotechnology*, 6(21), 2473-2476.

- Ramírez-Miranda, M., Cruz y Victoria, M., Vizcarra-Mendoza, M., & Anaya-Sosa, I. (2014). Determinación de las Isotermas de Sorción y las Propiedades Termodinámicas de Harina de Maíz Nixtamalizada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13, 165-178.
- Sabanis, D., Makri, E., & Doxastakis, G. (2006). Effect of durum flour enrichment with chickpea flour on the characteristics of dough and lasagne. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 1938-1944.
- Sicignano, A., di Monaco, R., Masi, P. & Cavella, S. (2015). From rawmaterial to dish: pasta quality step by step. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 2579–2587.
- Zhang, L., Nishizu, T., Hayakawa, S., Nakashima, R. & Goto, K. (2013). Effects of different drying conditions on water absorption and gelatinization properties of pasta. *Food Bioprocess Technology*, 6, 2000–2009.