

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

**EFECTO DEL TIPO DE SECADO Y ORIGEN EN LA
MORFOLOGÍA, CINÉTICA DE REHIDRATACIÓN Y LA
SOLUBILIDAD DE YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*)**

**TESIS PARA OPTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Autores : Bach. Milagros Guadalupe Gutierrez Cervantes.

Bach. Lucia de los Angeles Vargas Alarcón.

Asesor : Mg. Sc. James Euler Villar Estrada.

Línea de Investigación: LI_IIA_03 Ingeniería de Procesos Alimentarios.

JAÉN – PERÚ

2025

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 3% Publicaciones
- 5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Segundo Sánchez Tello
Responsable (e) de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 06 de junio del año 2025, siendo las 11:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Hubert Luzdemio Arteaga Miñano

Secretario: Dr. Juan Dario Rios Mera

Vocal: Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava, para evaluar la Sustentación de:

- () Trabajo de Investigación
() Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: "EFECTO DEL TIPO DE SECADO Y ORIGEN EN LA MORFOLOGÍA, CINÉTICA DE REHIDRATACIÓN Y LA SOLUBILIDAD DE YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*)", presentado por las tesis **Milagros Guadalupe Gutierrez Cervantes** y **Lucia de los Angeles Vargas Alarcón** de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

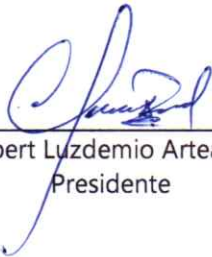
() Aprobar () Desaprobar () Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

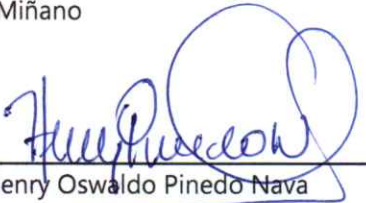
- | | | |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | () |
| c) Bueno | 14, 15 | (15) |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 12:30 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Jaén, 06 de junio de 2025


Dr. Hubert Luzdemio Arteaga Miñano
Presidente


Dr. Juan Dario Rios Mera
Secretario


Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava
Vocal

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS

Yo, Lucia de los Angeles Vargas Alarcón, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI N° 70074981.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“Efecto del tipo de secado y origen en la morfología, cinética de rehidratación y la solubilidad de Yacón (*Smallanthus sonchifolius*)”.

Asesorado por el Mg. Sc. James Euler Villar Estrada.

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, miércoles 8 de octubre del 2025.



Lucia de los Angeles Vargas Alarcón



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO DE LA TESIS

Yo, Milagros Guadalupe Gutierrez Cervantes, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI N° 72289478. escribíu texto.

Declaro bajo juramento que:

7. Soy Autor del trabajo titulado:

“Efecto del tipo de secado y origen en la morfología, cinética de rehidratación y la solubilidad de Yacón (*Smallanthus sonchifolius*)”.

Asesorado por el Mg. Sc. James Euler Villar Estrada.

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias

8. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.

9. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.

10. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

11. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.

12. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

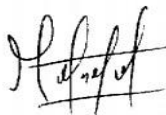
Fecha: Jaén, miércoles 8 de octubre del 2025.



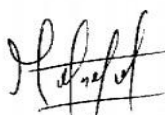
Milagros Guadalupe Gutierrez Cervantes

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN	7
ABSTRACT.....	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. MATERIAL Y MÉTODOS.....	11
3.1. Material.....	11
3.2. Población, muestra y muestreo	14
3.3. Variables de estudio.....	15
3.4. Métodos, técnicas, procedimientos e instrumentos de recolección de datos	16
3.4.1. Proceso de secado	16
3.4.2. Métodos de análisis.....	18
III. RESULTADOS.....	24
4.1. Cinética de secado.....	24
4.2. Cinética de rehidratación de las rebanadas	27
4.3. Cambios morfológicos durante el secado: intensidad de escala de grises, contracción del área y perímetro.....	32
4.3.1. Parámetros cinéticos respecto a la intensidad de escala de grises durante el secado.....	34
4.3.2. Cinética del área proyectada y perímetro proyectado durante el secado	36
4.4. Cambios morfológicos durante la rehidratación: intensidad de escala de grises, contracción del área y perímetro	40
4.4.1. Parámetros cinéticos de los cambios morfológicos durante la rehidratación.....	42
4.5. Efecto del secado en propiedades funcionales: solubilidad	46
IV. DISCUSIÓN.....	47
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57

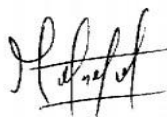


VI. REFERENCIAS..... 58
AGRADECIMIENTO..... 64
DEDICATORIA..... 65
ANEXOS..... 67



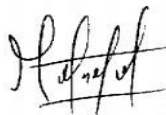
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros cinéticos k y n (modelo de Page) del secado	26
Tabla 2 Parámetros de Peleg durante el proceso de rehidratación.....	29
Tabla 3 Parámetros morfológicos (modelo de Weibull) de la intensidad de escala de grises	35
Tabla 4 Parámetros morfológicos (modelo de Weibull) del área proyectada.....	38
Tabla 5 Parámetros morfológicos (modelo de Weibull) del perímetro	40
Tabla 6 Parámetros del análisis de imágenes del área proyectada durante la rehidratación.....	44
Tabla 7 Parámetros del análisis de imágenes del perímetro durante la rehidratación	44

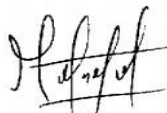


ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Materiales y equipos	13
Figura 2 Materiales y equipos	14
Figura 3 Diseño del experimento, incluyendo procesos de secado, rehidratación y solubilidad de yacón.....	18
Figura 4 Cambios en el contenido de humedad porcentual y humedad adimensional durante el proceso de secado	24
Figura 5 Ganancia de humedad durante la rehidratación	28
Figura 6 Cambios morfológicos durante el secado.....	33
Figura 7 Resultados morfológicos durante la rehidratación	41
Figura 8 Resultados de la solubilidad en los diferentes tratamientos de secado	47
Figura 9 Contraste de las dimensiones en el secado convectivo y solar, secado convectivo con refrigeración y congelación previa	54
Figura 10 Refrigeración y congelación de yacón	89
Figura 11 Descongelamiento y pelado del yacón	89
Figura 12 Rebanado y cortado del yacón.....	90
Figura 13 Secado convectivo 60°C de las muestras de yacón (primera repetición)	91
Figura 14 Rehidratación de las muestras del secado convectivo 60°C (primera repetición)	92
Figura 15 Secado convectivo + refrigeración de las muestras de yacón (primera repetición)	93
Figura 16 Rehidratación de las muestras del secado convectivo + refrigeración (primera repetición)	94
Figura 17 Secado convectivo + congelación de las muestras de yacón (primera repetición).....	95
Figura 18 Rehidratación de las muestras del secado convectivo + congelación (primera repetición)	



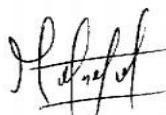
.....	96
Figura 19 Secado solar de las muestras de yacón (primera repetición)	97
Figura 20 Rehidratación de las muestras del secado solar (primera repetición)	98
Figura 21 Secado convectivo 60°C de las muestras de yacón (segunda repetición)	99
Figura 22 Rehidratación de las muestras del secado convectivo 60°C (segunda repetición).....	100
Figura 23 Secado convectivo + refrigeración de las muestras de yacón (segunda repetición) ..	101
Figura 24 Rehidratación de las muestras del secado convectivo + refrigeración (segunda repetición)	102
Figura 25 Secado convectivo + congelación de las muestras de yacón (segunda repetición) ...	103
Figura 26 Rehidratación de las muestras del secado convectivo + congelación (segunda repetición)	104
Figura 27 Secado solar de las muestras de yacón (segunda repetición)	105
Figura 28 Rehidratación de las muestras del secado solar (segunda repetición)	106
Figura 29 Análisis de humedad	107
Figura 30 Triturado de las muestras secas	107
Figura 31 Se peso 0,5 g muestras (base seca) de cada tratamiento y se colocó en tubos de ensayo y vasos de precipitación + 12 mL de agua destilada	108
Figura 32 Centrifuga.....	109
Figura 33 Baño maría	109
Figura 34 Se tomó 5 ML del líquido sobrenadante de cada muestra, se transfirió a las placas Petri y se llevó a la estufa de secado a una temperatura de 110 °C por 16 horas	110
Figura 35 Se peso la recuperación de sólidos para calcular el porcentaje de solubilidad	111


RESUMEN

Este estudio analizó cómo diferentes métodos de secado afectan las propiedades físicas y tecnológicas de rebanadas de yacón (*Smallanthus sonchifolius*), incluyendo secado solar y convectivo a 60 °C, con pretratamientos de refrigeración (4 °C) o congelación (-18 °C). El modelo de Page describió la pérdida de humedad, excepto en el secado solar. Las rebanadas congeladas presentaron menor capacidad de rehidratación, mayor contracción y oscurecimiento. En contraste, las refrigeradas mantuvieron mejor forma y color durante la rehidratación. El modelo de Weibull analizó los cambios morfológicos. Las muestras secadas al sol o congeladas mostraron mayor solubilidad, mientras que el secado convectivo, con o sin refrigeración, redujo esta propiedad. También se evaluó el origen del yacón: raíces de Gran Chimú mostraron mayor contracción y oscurecimiento, mientras que las de Otuzco conservaron mejor estructura y color. En resumen, el tipo de secado, el pretratamiento y el origen geográfico influyen significativamente en la cinética de secado, capacidad de rehidratación y propiedades tecnológicas del yacón, siendo clave para optimizar su procesamiento industrial.

Palabras clave: yacón, cinética de secado, cinética de rehidratación, análisis de imágenes, contracción en el secado.



ABSTRACT

This study analyzed how different drying methods affect the physical and technological properties of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices, including solar drying and convective drying at 60 °C, with pre-treatments of refrigeration (4 °C) or freezing (-18 °C). The Page model described moisture loss, except in solar drying. Frozen slices showed lower rehydration capacity, greater shrinkage, and darkening. In contrast, refrigerated slices maintained better shape and color during rehydration. The Weibull model was used to analyze morphological changes. Samples dried in the sun or frozen exhibited higher solubility, while convective drying, with or without refrigeration, reduced this property. The origin of the yacon was also evaluated: roots from Gran Chimú showed greater shrinkage and darkening, whereas those from Otuzco retained better structural and color integrity. In summary, the drying method, pre-treatment, and geographical origin significantly influence drying kinetics, rehydration capacity, and the technological properties of yacon, which are key to optimizing its industrial processing.

Keywords: yacon, drying kinetics, rehydration kinetics, image analysis, drying shrinkage.



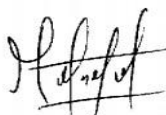
I. INTRODUCCIÓN

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*) es una planta originaria de los andes sudamericanos, cultivada principalmente en Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia, y otros países de la región. Su cultivo y conservación se realizan mediante prácticas tradicionales locales, desde los Andes de Argentina hasta Ecuador (Grau, 1997). Hace más de 30 años, las raíces de yacón ganaron popularidad al descubrirse que son una fuente natural de fructooligosacáridos (FOS), un tipo de fructanos con propiedades prebióticas (Salinas et al., 2018).

Los FOS de yacón están compuestos por una cadena de fructosa unida a un monómero de glucosa mediante enlaces β (2 \rightarrow 1), formando una mezcla de 1-kestosa (GF₂), nistosa (GF₃) y 1F- β -fructofuranosil nistosa (GF₄), entre con otros GF (Silva et al., 2018). Estos compuestos mejoran el balance intestinal y tienen efectos positivos para la salud, ya que son fermentados selectivamente por bifidobacterias y lactobacilos, lo que confirma sus propiedades prebióticas (Pedreschi et al., 2003). Es importante destacar que el contenido de FOS en las raíces de yacón varía según el lugar de origen y el grado de madurez de las raíces; a medida que maduran, disminuyen los FOS y aumentan los azúcares reductores y la sacarosa (Chirinos Gallardo, 1999).

En esta investigación se emplearon raíces de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) provenientes de dos zonas distintas del norte del Perú: la provincia de Gran Chimú y la provincia de Otuzco, ambas ubicadas en el departamento de La Libertad. Estas zonas presentan condiciones climáticas y altitudinales distintas, que pueden influir en las propiedades físicas, químicas y estructurales del yacón cultivado.

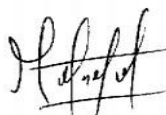
Estudios previos han señalado que, si bien existen similitudes morfológicas generales entre raíces procedentes de ambas zonas, se han observado diferencias significativas en características agronómicas como la altura de planta y el número de tallos (Vallejos & Rojas, 2021). Asimismo, el contenido de fructooligosacáridos (FOS) y otros compuestos funcionales del yacón puede variar según el lugar de cultivo y el grado de madurez (Chirinos Gallardo, 1999).



La industria alimentaria ha trabajado intensamente para mejorar el procesamiento y comercialización del yacón, buscando maximizar sus beneficios en una variedad de productos. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran el secado y el escaldado, que permiten conservar los componentes saludables de las raíces (Reis et al., 2021). El secado del yacón ha evolucionado desde el secado con aire caliente hasta métodos más innovadores como el secado al vacío, con bomba de calor, deshidratación osmótica, secado osmoconvectivo, secado por aspersión y liofilización, obteniéndose productos como harinas, polvos y chips.

Diversos estudios, como el de Scher, Ríos y Noreña (2009), han analizado la cinética del secado de rebanadas de yacón, mostrando que el escaldado previo y el uso de temperaturas más altas aceleran el proceso de secado. Sin embargo, también se observó una reducción en la concentración de inulina y un aumento en los azúcares reductores debido al hidrólisis de la inulina. Los procesos de secado convectivo pueden alterar los compuestos promotores de la salud presentes en el yacón, como la hidrólisis de los FOS y la degradación de compuestos fenólicos (Reis et al., 2021). A pesar de las limitaciones, el secado es esencial para conservar las fibras prebióticas, que se perderían rápidamente si las raíces se almacenaran frescas (Reis et al., 2021).

El procesamiento adecuado del yacón sigue siendo un desafío para la industria, debido a la falta de una parametrización óptima en etapas clave como el secado con aire caliente. Particularmente, existe escasa información sobre los efectos de la refrigeración y la congelación. En general, las bajas temperaturas cercanas a cero grados (como 2 °C) no son recomendables, ya que inducen daño fisiológico que compromete la calidad del tubérculo (Graefe et al., 2004). Esto podría afectar negativamente la integridad del tubérculo, incluyendo una reducción en los niveles de azúcares y posibles alteraciones en los FOS. En contraste, temperaturas moderadas (alrededor de 14 °C) han sido previamente sugeridas como más adecuadas para la conservación poscosecha (Graefe et al., 2004). No obstante, el efecto de las bajas temperaturas de almacenamiento sigue siendo incierto, especialmente considerando los posibles riesgos químicos y microbiológicos. En este contexto, el presente estudio evaluó el impacto de la



refrigeración y congelación como pretratamientos previos al secado convectivo, comparándolos con el secado solar. Estos métodos de secado son comunes tanto en prácticas culturales tradicionales como en sistemas utilizados por pequeños agricultores e incluso por grandes empresas agroindustriales. El secado representa una estrategia importante para el procesamiento y conservación de las raíces de yacón, ya que las condiciones del proceso afectan directamente las características intrínsecas del producto deshidratado (Reis, 2011).

Estudiar el proceso de secado implica entender la forma como se podrían deformar las rebanadas, ya que la contracción de estas podría afectar la cinética de secado. Por otro lado, la rehidratación de las rebanadas secas podría abrir diversas posibilidades, ya que la facilidad de absorber agua, también posibilita la absorción de vitaminas y otros nutrientes hidrosolubles (Rojas et al., 2020).

Para estudiar el secado, se pueden evaluar en función a los parámetros cinéticos del proceso en las rebanadas, así como la facilidad de hidratación y la solubilidad de la harina obtenida. Durante el secado, las rebanadas también experimentan cambios morfológicos, como contracción y pardeamiento, que dependen del tipo de secado, las condiciones del proceso y las características de la materia prima. El objetivo principal fue comparar el secado en cabina, con y sin pretratamientos en frío, con el secado solar y secado convectivo en términos de cinética de secado y rehidratación, solubilidad de la harina obtenida después del secado, y el efecto en la morfología de las rebanadas obtenida (intensidad de escala de grises y contracción del área y perímetro).

II. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Material

Lugar de ejecución

La presente investigación se realizó en la Universidad Nacional de Jaén (UNJ), ciudad de Jaén, departamento de Cajamarca. Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de “Tecnología de Alimentos” de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias.



Materia prima

Se emplearon dos cultivares de yacón (*Smallanthus sonchifolius*), procedentes de dos diferentes zonas del Perú. El primer cultivar tuvo como origen la provincia de Gran Chimú, en el departamento de La Libertad; el segundo cultivar también procedió del departamento de La Libertad, específicamente de la provincia de Otuzco. Las raíces fueron colectadas en un mercado local de la provincia de Trujillo, desde donde fueron transportadas hasta la Universidad Nacional de Jaén, donde fueron llevados los experimentos. Para lo cual se cortaron en rebanadas de aproximadamente 5 mm de espesor y dimensiones de (5 cm x 4 cm), según el tratamiento que se realizó.

Equipos y materiales de laboratorio

Para el secado por bandejas se utilizó una estufa (figura 1B) (marca FAITHFUL y serie GXBE) del laboratorio de Tecnología de Alimentos, tanto para los tratamientos con refrigeración previa, con congelación previa y sin aplicación de frío. Para el secado solar se utilizó un secador solar indirecto de madera con ventilación accionada (figura 1A) por el viento (natural) de la Universidad Nacional de Jaén. El almacenamiento de las muestras en frío fue llevado en un refrigerador – congelador (figura 1C y 1D) (marca BORD y modelo XD470NFS-M), esto para refrigerar y congelar durante 10 días las raíces de yacón como pretratamientos, los controles de pesos fueron llevados en una balanza analítica (figura 1E) y una balanza de humedad (figura 1F) para determinar la humedad de las rebanadas antes de iniciar el secado y finalizando el secado.

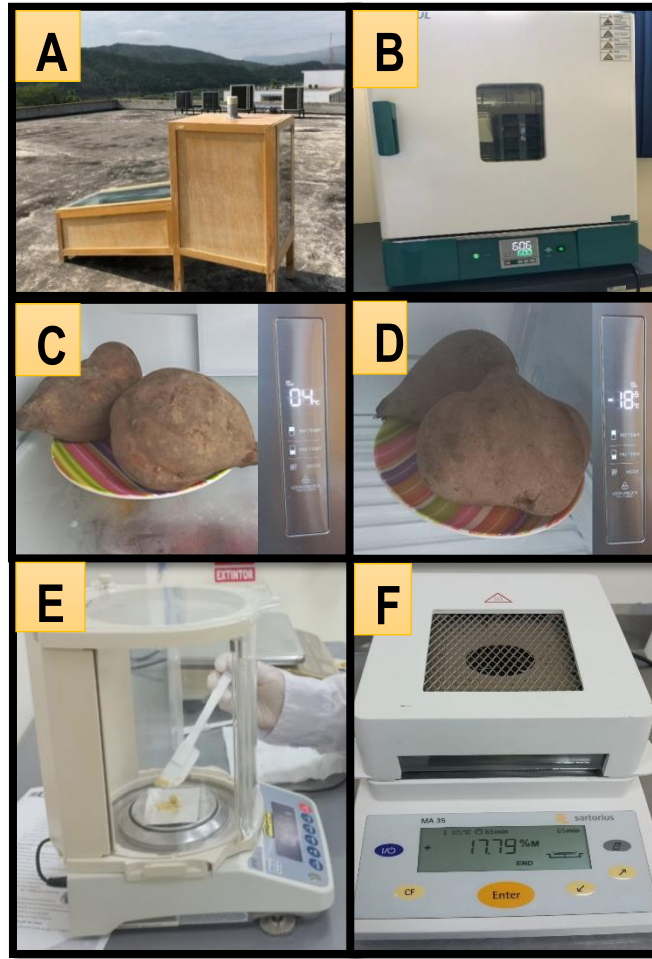
Además, se utilizaron materiales diversos, como un rallador de rebanadas de acero inoxidable cumpliendo con el espesor de 5 mm, un molde cortador cuadrado de acero inoxidable para dar forma a la rebanada con las medidas de 4 cm de largo y 5 cm de ancho. Estas rebanadas secas fueron almacenadas en bolsas plásticas de polipropileno y guardadas en desecadores, con el fin de que no ganen humedad del ambiente.



Se emplearon vasos precipitados (250 mL), probeta (100 mL), agua destilada, fuentes de acero inoxidable, balanza analítica (Marca A&D y serie 6A7702492) y papel aluminio, para el proceso de rehidratación en los cuatro tratamientos.

Figura 1

Materiales y equipos



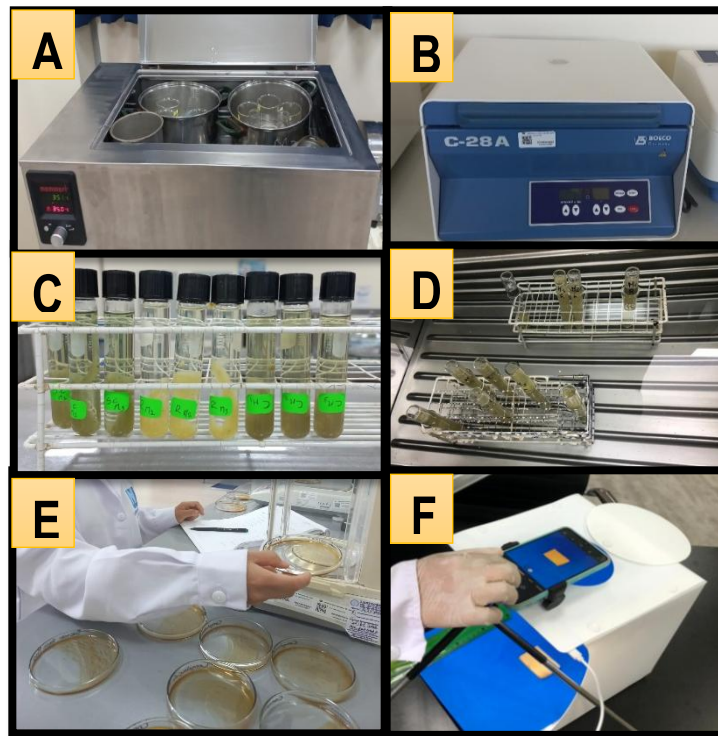
Nota. (A) secador solar; (B) secado en estufa; (C) refrigeración de las raíces; (D) congelación de las raíces; (E) balanza analítica; (F) balanza de humedad

Para las muestras secas se utilizó un mortero para moltarlas y una licuadora para la elaboración de harina, luego se controlaba los pesos. También se utilizó un Baño María (figura 2A) (Marca Memmert, serie WNE-45) y una centrifuga (figura 2B) (Marca Boeco , modelo C-28A) del laboratorio de Tecnología Médica 1 – Anatomía Patológica de la Universidad Nacional de Jaén y materiales como tubos de ensayos

(figura 2C) (15 mL - 25 mL), pipetas de plástico (10 mL – 15 mL), rejillas (figura 2D), agua destilada, placas Petri de vidrio (figura 2E) para evaluar la solubilidad, por último, se empleó una caja de luz (figura 2F) para tomar fotografías a las muestras, utilizando un fondo uniforme; las imágenes se obtuvieron perpendicularmente desde 15 cm con respecto a la base de la caja, donde se colocaron las muestras, se utilizó un Smartphone Samsung Galaxy A32, con una cámara principal de 64 megapíxeles.

Figura 2

Materiales y equipos



Nota. (A) baño maría aplicado durante la prueba de solubilidad; (B) centrifuga; (C) tubos de ensayo; (D) rejillas; (E) placas petri; (F) obtención de las imágenes para el estudio de la morfología, mediante una caja de luz

3.2. Población, muestra y muestreo

Población

Las raíces de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) fueron cultivadas en dos diferentes zonas del Perú, la provincia de Gran Chimú, en el departamento de la Libertad y la provincia de Otuzco, en el departamento de la Libertad.

Muestra

Se utilizó dos kilogramos de raíces de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) para cada tratamiento, estas cultivadas en dos diferentes zonas del Perú, la provincia de Gran Chimú (origen 1) y la provincia de Otuzco (origen 2), en el departamento de la Libertad.

Muestreo

Fue llevado a cabo un muestreo por conveniencia del tipo no probabilístico, donde se seleccionó el yacón (*Smallanthus sonchifolius*).

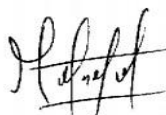
3.3. Variables de estudio

Variables independientes:

- Tipo de secado, con los niveles: solar (S1 y S2), convectivo sin pretratamiento (C1 y C2), convectivo con refrigeración previa (R1 y R2), convectivo con congelación previa (F1 y F2).
- Origen de la materia prima fue asumido en dos grupos (origen 1 y origen 2) para facilitar el análisis del proceso de secado, con la finalidad de disminuir la fuente de variación de la muestra.

Variables dependientes:

- Materia seca, humedad en base seca y humedad adimensional.
- Constantes cinéticas del modelamiento matemático en los procesos de secado (Page para humedad adimensional) y rehidratación (Peleg para humedad en base seca).
- Solubilidad de yacón deshidratado y pulverizado en proporción porcentual.
- Morfología de las rebanadas en función de la intensidad de escala de grises, contracción del perímetro y el área proyectada; obtenidas mediante el análisis de imágenes.
- Constantes cinéticas del modelamiento matemático (Weibull) en los cambios morfológicos (intensidad de escala de grises, perímetro y área proyectada).



3.4. Métodos, técnicas, procedimientos e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Proceso de secado

Se llevó a cabo la obtención de rebanadas de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) mediante tres métodos de secado: secado solar indirecto (en la Universidad Nacional de Jaén), secado convectivo a 60 °C (en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos de la UNJ), y secado convectivo a 60 °C con pretratamiento de refrigeración y congelación (10 días en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos de la UNJ).

Las raíces frescas de yacón fueron acondicionadas para su deshidratación. Primero se lavaron y desinfectaron, y luego se procesaron directamente o se almacenaron según el pretratamiento (refrigeración o congelación). Posteriormente, se pelaron y se cortaron en rebanadas de 5 x 4 cm y 5 mm de espesor, utilizando un molde rectangular de acero inoxidable. Se realizaron controles de peso, humedad y se tomaron imágenes para obtener los datos cinéticos y morfológicos de cada tratamiento.

Proceso del secado solar

Las muestras frescas del yacón fueron sometidas a secado en un secador solar indirecto hasta alcanzar la humedad de equilibrio (peso contante). Este secador solar su estructura principal es de madera de cedro, su recubrimiento de madera triplay, tiene un colector que presenta una cubierta de vidrio en la parte superior con el fin que pueda ingresar los rayos solares al cajón de secado, su cajón de secado está dividido por dos rejillas (40 x 45 cm) una chimenea con un diámetro de dos pulgadas la cual cumple la función de eliminar el vapor caliente generado por la humedad, las medidas de este secador son 100 cm de alto, con 15 cm de alto de la chimenea y las medidas del colector es de 100 cm de largo, 50 cm de ancho y 40 cm de fondo. La temperatura ambiental durante el proceso del grupo 1 (origen 1) fluctuó entre 24°C – 30°C; la temperatura ambiental durante el proceso del grupo 2 (origen 2) fluctuó 25°C – 31°C.



Proceso de secado a 60 °C

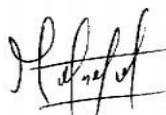
En esta operación, se obtuvo las rebanadas en el primer día, las cuales fueron sometidas al proceso de secado sin ningún almacenamiento ni tratamiento previo, con el fin que no sean modificadas por la forma como son almacenadas. Las raíces fueron sometidas al secado en la estufa a una temperatura de 60 °C, sobre las bandejas metálicas de la estufa (secado por ambos lados, donde el aire caliente convectivo fluye simultáneamente sobre ambas caras de las rebanadas).

Proceso de refrigeración (4 °C) más secado a 60 °C

Antes de iniciar con el rebanado y secado, las raíces fueron almacenadas en refrigeración (4 °C), durante 10 días (tiempo exploratorio comparativo), posteriormente se obtuvieron las rebanadas, las cuales fueron sometidas al secado en la estufa a una temperatura de 60 °C en bandejas metálicas de la estufa (secado por ambos lados, donde el aire caliente convectivo fluye simultáneamente sobre ambas caras de las rebanadas).

Proceso de congelación (-18 °C) más secado a 60 °C

Antes de iniciar con el rebanado y secado, las raíces fueron almacenadas en congelación (-18 °C), durante 10 días (tiempo exploratorio comparativo), pasado el tiempo, las raíces fueron descongeladas en contacto indirecto con agua (raíces recubiertas dentro de un baño maría) a temperatura ambiente (~30 °C) por siete minutos aproximadamente (descongelamiento completo), luego se obtuvo las rebanadas, las cuales fueron colocadas en la estufa a una temperatura de 60 °C en bandejas metálicas de la estufa (secado por ambos lados, donde el aire caliente convectivo fluye simultáneamente sobre ambas caras de las rebanadas).



Controles de las muestras secas

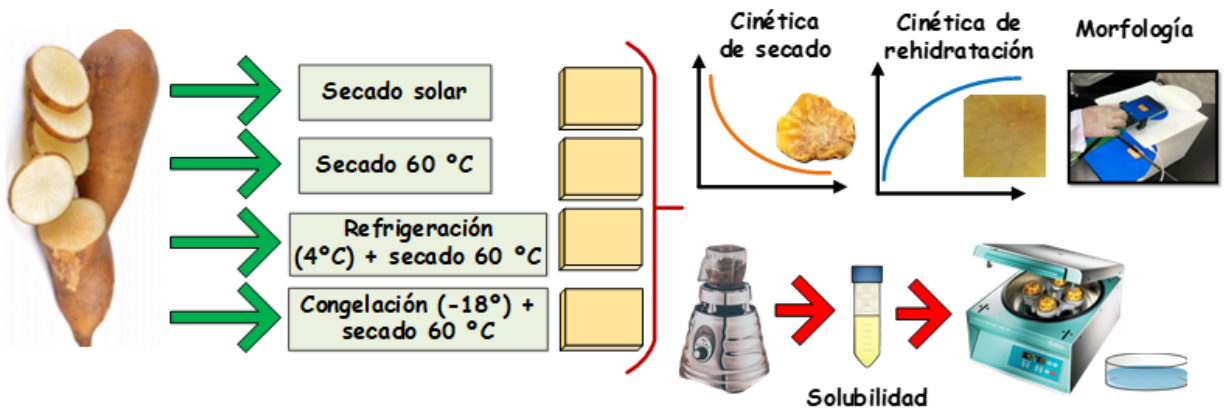
Por cada tratamiento se llevó el control de peso en función al tiempo de secado (hasta obtener peso constante, 510 minutos para los procesos convectivos en la estufa a 60 °C y 660 minutos en el secado solar), al finalizar el proceso se llevó el control de la humedad en cada tratamiento. Las mismas rebanadas secas fueron rehidratadas (cinética de rehidratación), también durante el proceso de secado y rehidratación, se obtuvo imágenes de las rebanadas. Parte de las muestras deshidratadas bajo los diversos tratamientos, fueron molturadas mediante el mortero y seguidamente con una licuadora para obtener una harina. Luego se realizó los ensayos de solubilidad para cada harina obtenida.

3.4.2. Métodos de análisis

Las rebanadas de yacón, según cada tratamiento fueron evaluadas con respecto a las constantes cinéticas de secado y rehidratación, morfología, así también con respecto a la solubilidad de la harina obtenida, tal como es mostrado de forma resumida en la figura 3.

Figura 3

Diseño del experimento, incluyendo procesos de secado, rehidratación y solubilidad de yacón



Evaluación de la humedad

Se empleó el método con balanza de humedad (infrarrojo cercano), donde las muestras fueron molturadas para luego ser colocadas en bandejas de aluminio para analizar la humedad, con una temperatura de 105 °C y un tiempo de 65 minutos (Rojas y Augusto, 2018).

Curvas de secado

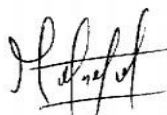
Las curvas de secado fueron ploteadas en función del contenido de humedad ($M_t\%$) (Ec.1) y de la relación de humedad adimensional (MR) (Ec.2) sobre el tiempo del proceso de secado. Donde M es el contenido de humedad en base seca (m.s.) (es decir, kg de agua/kg de materia seca) en un momento determinado (t) del proceso de secado, M_e es la humedad de equilibrio y M_0 es la humedad inicial (m.s.) de la muestra natural.

$$M_t\% = \frac{W_t}{W_{ms}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \cdot 100 \quad (2)$$

Curvas de rehidratación

Cada rebanada de yacón seca (posterior a cada tratamiento de secado) se rehidrato a 25 °C por inmersión en 100 mL de agua destilada. Se registró la ganancia de agua durante el proceso. Para ello, se retiró el exceso de agua de la superficie con un papel toalla, se pesó las rebanadas cada 30 minutos y se devolvió a la misma agua (Rojas et al., 2019). El proceso se realizó en un tiempo de cinco horas hasta que la absorción de agua se estabilice. A partir de los datos de ganancia de masa y la humedad inicial de la muestra, fue realizado mediante balance de masa, donde se determinó el contenido de humedad durante el tiempo de rehidratación.



Modelamiento matemático: Cinética de secado y rehidratación

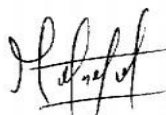
Los datos de humedad adimensional (MR) frente al tiempo de secado (t) durante el secado se ajustaron utilizando el modelo de Page (Ec. 3) (Page, 1949), donde "k" es la tasa de secado constante y "n" es la constante adimensional de secado.

$$MR(t) = \exp(-k \cdot t^n) \quad (3)$$

Page es un modelo empírico que se ha aplicado con éxito en diversos procesos de secado durante muchos años. Simpson, Ramírez, Nuñez, Jaques y Almonacid (2017) proporcionaron una interpretación fenomenológica del modelo, utilizando el concepto de difusión anómala a través del enfoque de cálculo fraccionario. Atribuyendo significados fenomenológicos al Modelo de Page: la constante de velocidad de secado (k) asociada al coeficiente de difusión y a la geometría de la muestra, mientras que la constante adimensional de secado (n) está relacionada con el tipo de difusión y la microestructura del alimento ($n > 1$ super-difusión y $n < 1$ sub-difusión).

En la cinética de rehidratación se modeló ajustando los datos experimentales de rehidratación al modelo de Peleg (Ec. 4) (Peleg, 1979), donde M(t) es el contenido de humedad en base seca (kg de agua / kg dm) en el tiempo t (min), M_0 es el contenido de humedad inicial (kg de agua / kg dm), k_1 es la constante de velocidad (min - kg de materia seca / kg de agua) y k_2 es la constante del nivel asintótico (kg de materia seca / kg de agua).

$$M(t) = M_0 \left(\frac{t}{k_1 + k_2 \cdot t} \right) \quad (4)$$



El modelo de Peleg es un modelo empírico, fue aplicado con éxito en la descripción del proceso de hidratación a lo largo de los años (Doymaz, 2005; Miano y Augusto, 2018; Simal et al., 2005). El recíproco de k_1 representa la tasa de absorción de agua y el recíproco de k_2 representa la capacidad de retención de agua.

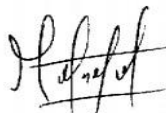
Los parámetros de cada modelo (Ec. 3 y 4) se ajustaron iterativamente a los datos experimentales, minimizando la suma de los errores al cuadrado (SSE en la Ec. 5) entre los valores experimentales y los predichos. Las soluciones óptimas de cada parámetro de regresión en cada réplica, fue realizado mediante el algoritmo generalizado de gradiente reducido (método GRG Nonlinear Solving) implementado en la herramienta "Solver" del software Excel 2016 (Microsoft, USA), mediante una convergencia establecida de 0,000001 (Rojas et al., 2019; Rojas, Silveira, et al., 2020).

$$SSE = \sum_{i=1}^x ((\text{predicho}) - (\text{experimental}))_i^2 \quad (5)$$

Evaluación de la morfología

Las rebanadas de yacón durante cada proceso de secado fueron monitoreadas mediante análisis de imágenes cada 30 minutos. Donde las fotografías obtenidas de cada repetición fueron procesadas con el software libre ImageJ desarrollado por Wayne Rasband (1997).

Dimensiones proyectadas (contracción): La contracción con su efecto de deformación se estimó a partir de la proyección bidimensional del perímetro y el área. Las muestras fueron colocadas en el mismo lugar y posición utilizando un fondo uniforme, las imágenes fueron obtenidas perpendicularmente desde 15 cm con respecto a las muestras utilizando un Smartphone Samsung Galaxy A32, con una cámara principal de 64 megapíxeles. La proyección del área y perímetro, así como la intensidad de



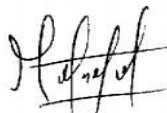
escala de grises se obtuvieron utilizando el proyecto ImageJ (software ImageJ-win64, EE.UU.). La contracción fue calculada en base al porcentaje de cambio de área y perímetro durante el secado (Rojas, Augusto, et al., 2020). Los pasos que se siguieron fueron (a) pegar la imagen de la muestra; (b) dar clic en *Analyze* y *Set Scale* para establecer la escala en píxeles / cm; (c) dar clic en la herramienta línea recta para seleccionar la escala de 1 cm; (d) seleccionamos el polígono para medir el área ocupada y el perímetro; (e) ingresamos a *Analyze* y *Set Measurements*, luego seleccionamos *Area*, *Perimeter* y *Mean gray value*; (f) dar clic en *Image Type* y seleccionamos 8 bit para convertir la imagen a blanco y negro; (g) Por último, dar clic en “*Analyze*” y “*Measure*”.

Intensidad de escala de grises como indicador de pardeamiento: se determinó en función de la selección de un área específica de la rebanada, seguido de la selección de “*Analyze*”, seleccionar “*Set Measurements*”, seleccionando “*Area, Mean gray value, Perimeter y Integrated density*” para luego tomar la medida de cada muestra con “*Analyze*” seguido de “*Measure*” (León-Roque et al., 2019).

Modelamiento matemático: Dimensiones proyectadas e intensidad de escala de grises

Modelo de Weibull (parámetros)

El modelo de Weibull es probalístico similar al modelo de Peleg, donde advierte de un fenómeno de fallo el cual disminuye con el tiempo. Es por ello, que las curvas cinéticas de los alimentos se describen por este modelo, donde “ C/C_0 ” es la fracción de alteración del componente respecto al valor inicial y “ k ” es un parámetro de velocidad; cuando k es positivo, la ecuación describe el crecimiento exponencial isotérmico, y cuando es negativo, describe el



decaimiento isotérmico exponencial. El valor “n” es un parámetro denominado factor de forma; se expresa mediante la ecuación 6 (Quevedo et al., 2018):

$$\frac{C}{C_0} = e^{k \cdot t^n} \quad (6)$$

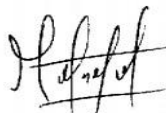
Evaluación de la solubilidad

En la solubilidad se colocó 0,5 g muestras (base seca) de cada tratamiento en 12 mL de agua destilada en un tubo de ensayo, luego se agitó la suspensión y se llevó a baño maría a una temperatura de 30 °C por una hora y cada cinco minutos se agitaba la suspensión de cada muestra, luego se centrifugó a 4000 rpm por 15 minutos. Luego se tomó 5 mL del líquido sobrenadante de cada muestra y se transfirió a las placas Petri esterilizadas y secas (105 °C por 16 horas), pesadas y rotuladas, se llevó a la estufa de secado a una temperatura de 110 °C por 16 horas. Los sólidos que se recuperaron se pesaron y para calcular el porcentaje de solubilidad se empleó la siguiente ecuación:

$$\text{WSI (\%)} = \frac{\text{DS}}{\text{MS}} \cdot 100 \quad (7)$$

Análisis de datos estadísticos

Las características en el secado, rehidratación y morfología, fueron medidas por triplicado y los resultados fueron evaluados mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial (tipo de secado, y diferente origen), se realizaron comparaciones entre cada nivel (tipo de secado). Los resultados (variables dependientes como la humedad, los indicadores cinéticos, e indicadores de morfología) también fueron analizados para verificar la normalidad. Los datos obtenidos como indicadores de cada respuesta fueron analizados para verificar su normalidad y la homogeneidad de varianza. Cumpliendo la normalidad, cada respuesta fue evaluada mediante un ANOVA y se determinó la diferencia de medias con Tukey. Los análisis fueron realizados mediante el software Statistica 14.0.1.



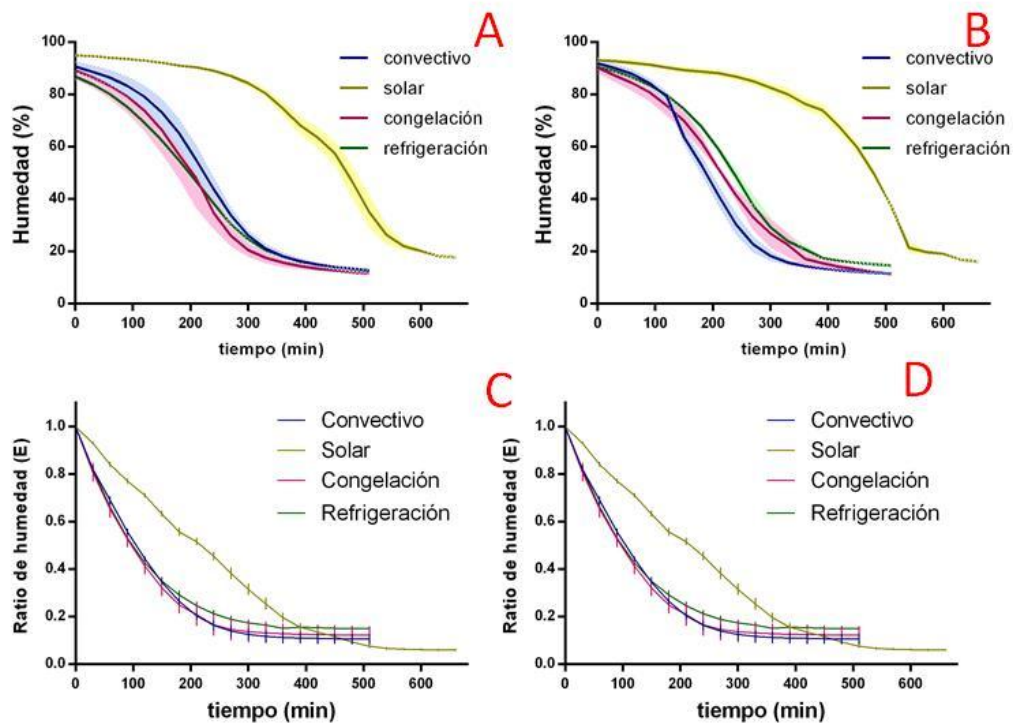
III. RESULTADOS

4.1. Cinética de secado

La cinética de los cambios del contenido de humedad durante el secado, se muestra en la figura 4, donde se muestra separadamente los grupos que implican el origen de las raíces, donde 4A y 4C corresponden al origen 1 (Gran Chimú), 4B y 4D corresponden al origen 2 (Otuzco). Se plantea esta comparación con el fin de tener un mejor análisis y claridad en las respuestas. Los cambios respecto al porcentaje de humedad facilitaron la comprensión de los cambios cinéticos encontrados entre los diferentes tratamientos evaluados.

Figura 4

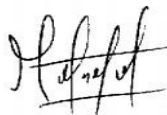
Cambios en el contenido de humedad porcentual y humedad adimensional durante el proceso de secado



Nota. Resultados de la cinética de secado (4A y 4B) porcentaje de humedad, sombras junto a las líneas denotan la desviación estándar. 4C y 4D muestran el contraste obtenido de la humedad adimensional, líneas verticales representan la desviación estándar. A y C para origen 1, B y D para origen 2

En la figura 4A y 4B se observa que el cambio en el porcentaje de humedad, siguió un perfil similar durante el proceso de secado, excepto en el secado convectivo (C1 y C2), donde se aprecian diferencias al comparar ambos orígenes. Esto se debe a un incremento en la velocidad de secado alrededor de los 150 minutos. En el mismo grupo (origen 2), también se encontraron diferencias en las muestras con congelación previa, acelerando la pérdida de humedad a partir de los 200 minutos. En las figuras 4C y 4D, se muestra el ratio de humedad (humedad adimensional). A diferencia de los porcentajes de humedad, el ratio de humedad mantuvo perfiles de cambio similares independientemente del origen de las raíces de yacón. Los perfiles de cambio del ratio de humedad dependieron del tipo de proceso. En el secado solar, la pérdida de humedad se desaceleró después de los 500 minutos. Los cambios en el secado convectivo y el secado con congelación previa fueron bastante similares, mientras que en el secado con refrigeración previa se mantuvo una ratio de humedad ligeramente superior (humedad de equilibrio) en comparación con el secado convectivo y el secado con congelación previa.

En la tabla 1 se muestran los parámetros cinéticos del secado junto a las comparaciones individuales Tukey, entre los diferentes procesos ($p < 0,05$). Estas comparaciones del análisis de varianza permitieron realizar una mejor comparación entre los parámetros de cada proceso de secado. A partir de la humedad adimensional se realizó un modelamiento matemático basado en modelo de Page (Page, 1949), que, de acuerdo con Simpson et al. (2017), es adecuado para comparar de manera robusta la velocidad de secado (k) y la constante adimensional interpretada como indicador de difusividad (n). El análisis de varianza (ANOVA) evidenció que tanto el tipo de secado, el origen de las raíces y la interacción entre estas variables resultaron significativas en la constante velocidad de secado (k) y el indicador de difusividad (n). Así también, la comparación de medias Tukey (anexo 1) permitió ver qué la velocidad de secado (k), entre cada nivel evaluado (tipo de secado) se observaron diferencias. La mayor velocidad (k) se obtuvo en los tratamientos con congelación previa, seguido de los tratamientos con refrigeración previa, luego el proceso convectivo, y finalmente el secado solar. Respecto al coeficiente difusividad (n), también hubo diferencias



significativas entre los tipos de secado, según la prueba de Tukey (tabla 1). El valor máximo de “n” se obtuvo en el secado solar (S1 y S2), seguido del secado convectivo, luego el secado con refrigeración previa y el valor más bajo se observó en el secado con congelación previa.

Tabla 1

Parámetros cinéticos “k” y “n” (modelo de page) del secado

Tt	k (min⁻¹) (velocidad de secado)	n (indicador de difusividad)	R²
C1	0,0071 ± 0,0003 ^{cC}	0,992 ± 0,012 ^{cB}	≥0,98
F1	0,0265 ± 0,0008 ^{aA}	0,731 ± 0,013 ^{dD}	≥0,97
R1	0,0215 ± 0,0012 ^{bB}	0,772 ± 0,022 ^{dC}	≥0,98
S1	0,0005 ± 0,0000 ^{dD}	1,357 ± 0,010 ^{aA}	≥0,99
C2	0,0055 ± 0,0003 ^{cC}	1,083 ± 0,008 ^{bB}	≥0,98
F2	0,0220 ± 0,0012 ^{bA}	0,770 ± 0,003 ^{dD}	≥0,98
R2	0,0079 ± 0,0004 ^{cB}	0,958 ± 0,007 ^{cC}	≥0,98
S2	0,0005 ± 0,0000 ^{dD}	1,333 ± 0,012 ^{aA}	≥0,99

Nota. Media ± desviación estándar. Las diferencias entre letras indican defensas significativas Tukey entre las muestras procesadas (p < 0.05). C1 (convectivo sin pretratamiento), F1 (convectivo con congelación previa), R1 (convectivo con refrigeración previa), S1(solar) para origen 1; C2 (convectivo sin pretratamiento), F2 (convectivo con congelación previa), R2 (convectivo con refrigeración previa), S2 (solar) para origen 2. Las diferencias significativas (p < 0,05) entre tratamientos se indican con letras minúsculas diferentes. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas (p < 0,05) entre los tratamientos con el mismo origen

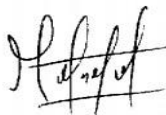
De acuerdo con las comparaciones presentadas en la tabla 1, los valores significativos más altos y más bajos de la velocidad de secado (k) y del parámetro "n", asociado a la difusividad, coinciden con lo reportado en la prueba de Tukey para los tratamientos con el mismo origen. Según Simpson et al. (2017), el parámetro “k” está asociado con

el coeficiente de difusión y la geometría de la muestra, mientras que “n” se asocia al tipo de difusión y a la microestructura de los alimentos ($n > 1$ super-difusión and $n < 1$ sub-difusión). Las interpretaciones de los parámetros del modelo de Page pueden ayudar a explicar los efectos del secado en cambios físicos como la contracción de las rebanadas, que resultan de alteraciones en las características micro y macroestructurales (Aguilera y Stanley, 1999).

De acuerdo con la tabla 1 y la comparación Tukey entre los tipos de secado y origen, se puede deducir que, en promedio, el almacenamiento de las raíces bajo congelación y refrigeración aumentó la velocidad del secado “k”, mientras que en el secado solar esta disminuyó, como era de esperar. Por otro lado, el indicador de coeficiente de difusividad “n” disminuyó cuando las raíces fueron almacenadas bajo refrigeración y congelación, bajando los valores hasta $n < 1$, lo que indica subdifusión. En contraste, el secado solar acrecentó este parámetro, conduciendo hacia una superdifusión. Los parámetros “n” y “k” son recíprocos entre sí: una velocidad mínima de “k” incrementa el valor de “n”. También se observan algunas divergencias entre el origen de las muestras, pero en general, la tendencia indica que la congelación y refrigeración influyen acelerando la velocidad de secado. El origen de las raíces de yacón influyó significativamente en la velocidad de secado. Las de origen 2 presentaron, en algunos casos, una velocidad ligeramente inferior respecto a las de origen 1, especialmente en tratamientos convectivos, con congelación y refrigeración. Esta diferencia puede deberse a variaciones en la microestructura del tejido de las raíces, posiblemente asociadas a condiciones agroclimáticas locales.

4.2. Cinética de rehidratación de las rebanadas

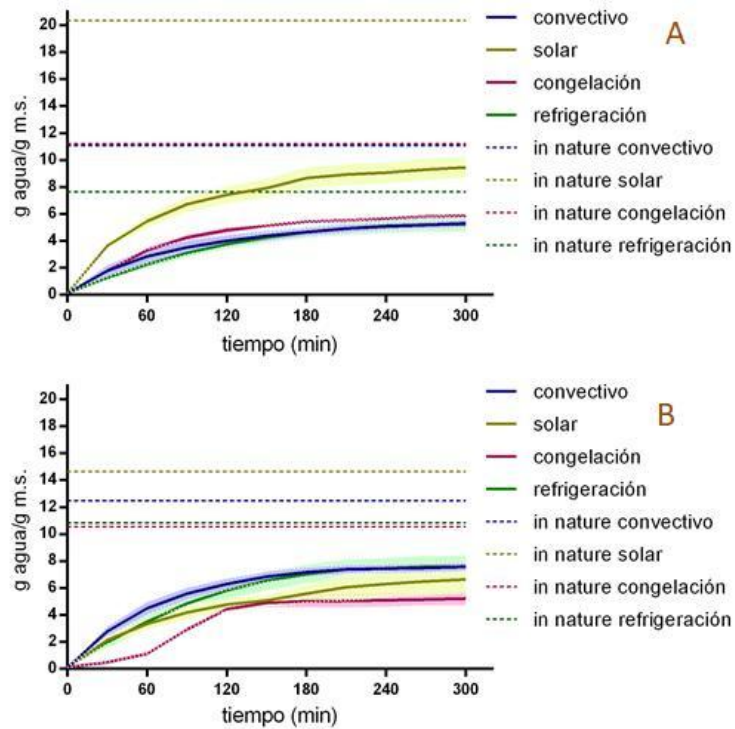
La cinética de los cambios en la absorción de agua en medio de la matriz de las rebanadas secas de yacón se presenta en la figura 5, que diferencia los orígenes de las raíces: la figura 5A corresponde al origen 1 (Gran Chimú), y la figura 5B al origen 2 (Otuzco). Las proporciones de agua absorbida, en función de la materia seca, fueron modeladas matemáticamente usando el modelo de Peleg, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 2. Estos parámetros ayudan a explicar las diferentes modificaciones, que podrían influir en el comportamiento de rehidratación, ya que,



durante el secado, tanto la cantidad y la forma en que se elimina el agua impactan significativamente en la integridad estructural del producto seco, así como en su contracción y deformación (Carvalho et al., 2020). En la figura 5 se puede observar la absorción de agua en función del origen (5A para origen 1, 5B para origen 2), para lo cual se trazaron dos tipos líneas, las líneas continuas de ganancia de humedad en función del tipo de secado, y las líneas de puntos que muestran la humedad “*in nature*”, que indica la cantidad de humedad inicial de las raíces de las cuales se obtuvieron las rebanadas.

Figura 5

Ganancia de humedad durante la rehidratación



Nota. Resultados de los cambios durante la rehidratación. Líneas punteadas representan a la humedad in nature. Las sombras junto a las líneas representan desviación estándar de cada tratamiento

[Handwritten signature]

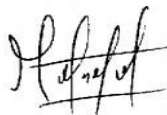
[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

La primera observación destacada en la figura 5, es la diferencia en el contenido de agua inicial (además del origen) de la materia prima antes del proceso de secado, denominado “humedad *in nature*”, que representa la proporción de agua por gramo de materia seca. En la figura 5, se muestra que la muestra de origen 1, destinada al secado solar, tenía una humedad inicial superior a 20 g de agua por gramo de materia seca, mientras que las otras muestras del mismo origen presentaban valores cercanos a 10 g agua / g m.s. (la mitad). Estos valores iniciales pueden explicar, en parte, el perfil de hidratación de las rebanadas obtenidas del secado solar, donde el secado solar de origen 2 (S2) alcanzó casi la mitad de la humedad en comparación con el tratamiento paralelo con origen 1 (S1). Otra divergencia que se encontró fue en las rebanadas sometidas a congelación previa. Las rebanadas con origen 1 lograron rehidratarse hasta la mitad de su contenido de humedad *in nature*, mientras que las de origen 2 alcanzaron aproximadamente un tercio, mostrando una menor capacidad de hidratación. En los tratamientos con secado convectivo y refrigeración previa, el perfil de hidratación fue similar en ambos casos, alcanzando aproximadamente la mitad del contenido de humedad *in nature*.

Estas comparaciones permiten analizar la recuperación de la humedad tras el secado, lo que también indica el impacto del proceso de secado. Para tener una visión más clara, se aplicó el modelo matemático con el modelo de Peleg, donde k_1 se interpreta como la constante de velocidad de Peleg (inversa de la velocidad de absorción de agua) y k_2 como la constante de capacidad de Peleg (inversa de la humedad de equilibrio) (Peleg, 1988). Cuanto menor es el valor de k_1 , mayor es la tasa de rehidratación inicial, y cuanto menor es el valor de k_2 , mayor es el contenido de humedad de equilibrio (Rojas y Augusto, 2018; Santos et al., 2021). El ajuste del modelo de Peleg permitió establecer dos parámetros cinéticos comparativos, que, según los valores recíprocos de k_1 y k_2 (tabla 2), describen el comportamiento de rehidratación de las rebanadas deshidratadas de yacón.

En la tabla 2 se muestran los parámetros cinéticos de rehidratación (k_1 y k_2), junto con las comparaciones de Tukey ($p < 0,05$) entre los distintos tratamientos. También se



muestran los coeficientes de correlación. El análisis de varianza (ANOVA) evidenció que tanto el tipo de secado, el origen de las raíces y la interacción entre estas, resultaron significativas en la constante de velocidad de Peleg (k_1) (Anexo 2). Sin embargo, la comparación de medias Tukey reveló diferencias significativas entre los distintos tipos de secado y origen para tener una categorización entre estos, en promedio los tratamientos de secado convectivo, con congelación y refrigeración previa aumentaron esta constante, mientras que el secado solar la disminuyó. Al analizar los tratamientos de forma individual, se observaron algunas particularidades. En el secado solar, las rebanadas con origen 1 (S1) presentaron la mayor tasa máxima de absorción de agua al inicio de la rehidratación, mientras que las del origen 2 (S2) duplicaron el valor de la constante k_1 de S1. Este valor en S1 no mostró diferencias significativas respecto al secado convectivo C2, que también obtuvo una alta tasa de absorción de agua, aunque numéricamente fue inferior a C1. En el secado con congelación previa, no se observó la misma tendencia, ya que las muestras de origen 1 (F1) mostró la mayor tasa de absorción de agua ($\downarrow k_1$), con valores bastante menores en comparación con F2.

Respecto a k_2 , la constante de capacidad de Peleg, relacionada con la inversa de la humedad de equilibrio, el análisis de varianza evidenció que tanto el tipo de secado, el origen de las raíces y la interacción entre estas, resultaron significativas (Anexo 2). La prueba de Tukey indicó que se encontraron diferencias significativas entre los tipos de secado y origen. En el secado solar, las rebanadas con origen 1 (S1) presentaron mayor humedad de equilibrio, seguido de la refrigeración y congelación previa, por último, el secado convectivo con un alto valor numérico pero menor humedad de equilibrio. Al comparar los tratamientos individualmente, los tratamientos con refrigeración (R2) y congelación (F2) alcanzaron los valores más bajos de k_2 , lo que sugiere una mayor humedad de equilibrio. En el secado solar, las rebanadas de origen 1 (S1) tuvieron valores menores de k_2 que los tratamientos R2 y F2, mientras que en el origen 2 (S2) los valores fueron superiores a todos los tratamientos del mismo origen. El secado convectivo obtuvo el valor máximo de k_2 en la muestra C1 (origen 1).

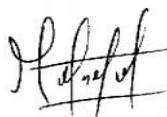
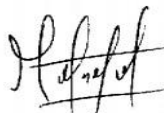


Tabla 2*Parámetros de Peleg durante el proceso de rehidratación*

Tt	k₁ (min·g b.s. /g agua)	k₂ (g b.s./g agua)	R²
C1	12,06 ± 0,22 ^{cdB}	0,159 ± 0,007 ^{aA}	≥0,97
F1	11,89 ± 0,28 ^{cdB}	0,128 ± 0,002 ^{bB}	≥0,98
R1	18,89 ± 1,27 ^{bA}	0,120 ± 0,006 ^{b,cB}	≥0,99
S1	6,02 ± 0,45 ^{dC}	0,087 ± 0,008 ^{eC}	≥0,99
C2	7,62 ± 0,75 ^{dD}	0,106 ± 0,002 ^{c,dAB}	≥0,99
F2	21,48 ± 0,56 ^{aA}	0,098 ± 0,004 ^{deBC}	≥0,89
R2	10,87 ± 0,53 ^{eC}	0,089 ± 0,003 ^{eC}	≥0,98
S2	13,40 ± 0,49 ^{cB}	0,122 ± 0,011 ^{b,cA}	≥0,98

Nota. Resultados de los parámetros del proceso de rehidratación, donde C1 (convectivo sin pretratamiento), F1 (convectivo con congelación previa), R1 (convectivo con refrigeración previa), S1(solar) son de un origen; C2 (convectivo sin pretratamiento), F2 (convectivo con congelación previa), R2 (convectivo con refrigeración previa), S2 (solar) para el otro origen. Letras representan la comparación de medias Tukey. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican con letras minúsculas diferentes. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos con el mismo origen. La constante k_1 es la tasa de absorción de agua, y k_2 es el contenido de humedad de equilibrio.

De acuerdo con la tabla 2 y la comparación Tukey entre los tipos de secado y origen, se puede deducir que, las rebanadas secas en secado solar (S1) y convectivo (C2) mostraron mayor rehidratación (k_1). Por otro lado, las rebanadas secas en secado solar (S1), con congelación y refrigeración previa (F2 y R2) mostraron mayor humedad de equilibrio. En relación con el origen de las raíces, se observaron diferencias notables. Las raíces de Otuzco mostraron mejores tasas de reabsorción de agua, lo que podría deberse a una mejor preservación estructural. Por el contrario, las raíces de Gran


Chimú, aunque con una rehidratación inicial rápida, alcanzaron menores valores de equilibrio de humedad, lo que sugiere una mayor afectación en su estructura interna durante el secado.

4.3. Cambios morfológicos durante el secado: intensidad de escala de grises, contracción del área y perímetro

En la figura 6 se muestran los cambios morfológicos ocurridos durante el proceso de secado, agrupados según la intensidad de escala de grises como indicador del pardeamiento de las rebanadas (figura 6A y 6B), junto con el área proyectada (figura 6C y 6D) y perímetro proyectado (figura 6E y 6F). Las figuras 6A, 6C y 6E corresponden al origen 1, y las figuras 6B, 6D y 6F al origen 2. Estas comparaciones permiten un mejor análisis de las respuestas obtenidas. La intensidad de escala de grises se expresa entre 0 y 250, donde “0” representa la ausencia de blanco, o negro total; y 250 blanco máximo (Mendoza y Lu, 2015). En cuanto a la contracción, se consideraron el área y el perímetro proyectado en dos dimensiones, como unos indicadores de la contracción y deformación durante el proceso de secado (Rojas et al., 2020).

En relación con los cambios observados en la intensidad de escala de grises de las figuras 6A y 6B, se encontró que las rebanadas de yacón mostraron diferentes grados de pardeamiento (anexo 8) según el tipo de tratamiento de secado y el origen. Además, es relevante señalar que los cambios fueron más pronunciados en las raíces de “origen 1” y en el proceso de secado con congelación previa. En general, estas muestras tendieron a oscurecerse, alterando su color y apariencia, lo que podría estar relacionado con el pardeamiento de las rebanadas durante el secado. Por otro lado, el secado con refrigeración previa resultó ser el tratamiento menos afectado por el pardeamiento, mostrando los valores más altos en la intensidad de escala de grises, sin importar el origen de las raíces. En cuanto al secado solar, se observó un oscurecimiento gradual de las rebanadas, alcanzando incluso niveles de pardeamiento superiores a los del secado con congelación previa, lo que reflejó en una menor puntuación en la intensidad de escala de grises.

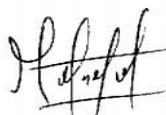
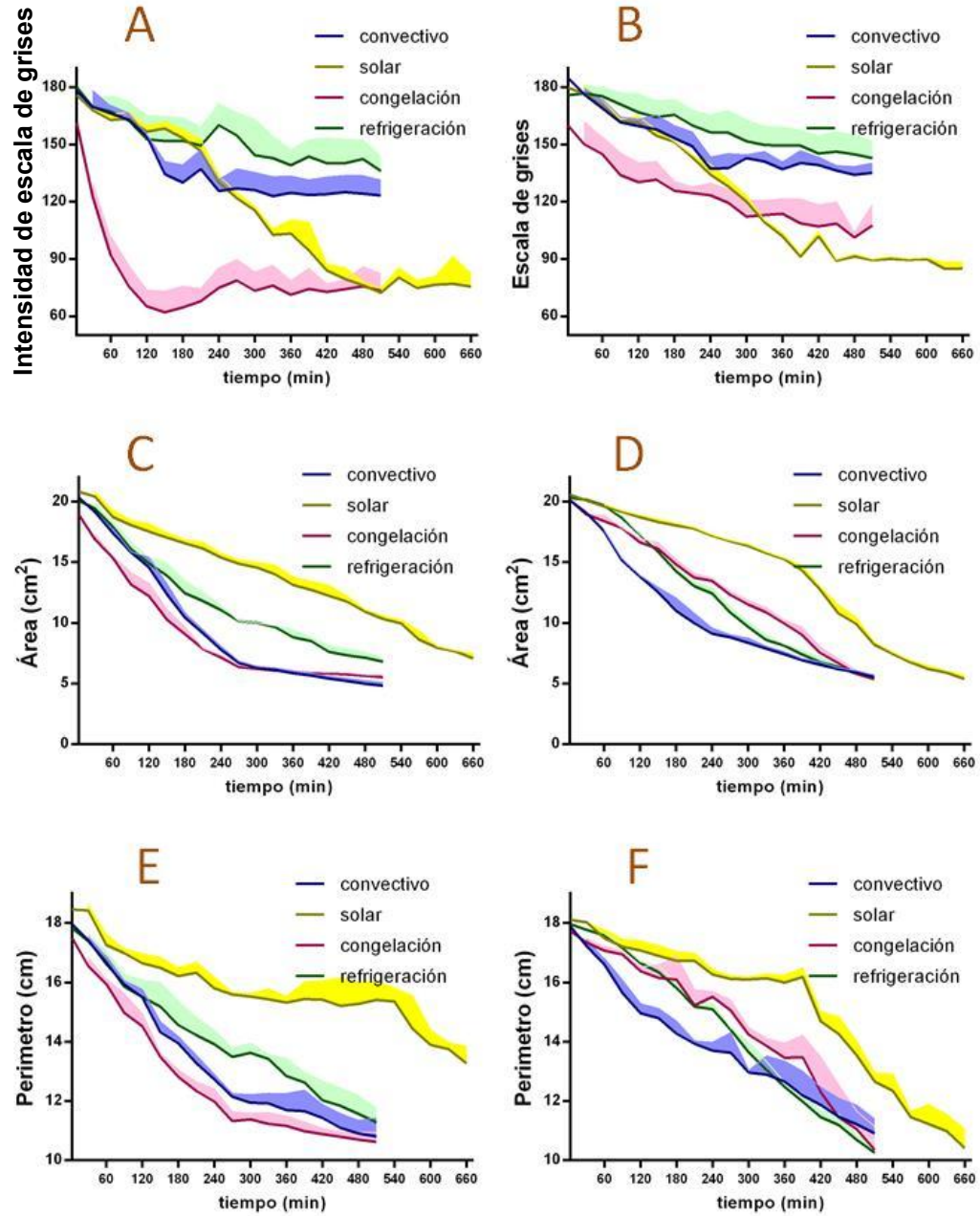


Figura 6

Cambios morfológicos durante el secado



Nota. (6A, 6C y 6E) para un origen, (6B, 6D y 6F) para el otro origen; además (6A y 6B) indican la intensidad de escala de grises, (6C y 6D) representan el área proyectada, (6E y 6F) muestran el perímetro proyectado de las rebanadas. Las sombras de color junto a las líneas representan la desviación estándar

[Handwritten signatures]

Los cambios ocurridos durante el proceso de secado, que afectaron el tamaño de las rebanadas procesadas, están principalmente relacionados con la contracción de las raíces. En este estudio dicha contracción se evaluó mediante el análisis de imágenes, expresada como área proyectada (figura 6C y 6D) y perímetro proyectado (figura 6E y 6F). Los resultados muestran que el origen de las raíces influye de manera diferente en las muestras que fueron congeladas previamente. En particular, las raíces del origen 1 presentaron una mayor contracción (tanto en área como en perímetro) en comparación con otros procesos de secado, mientras que las del origen 2 mostraron un comportamiento similar al de las rebanadas refrigeradas previamente. Por otro lado, las rebanadas con refrigeración previa mostraron variaciones en su perfil dependiendo de su origen. En el caso del secado solar, no se observaron cambios significativos relacionados con el origen de las raíces. Estos resultados sugieren que el almacenamiento en frío podría afectar de manera distinta a los cultivares de yacón según su origen. En cuanto al secado convectivo sin almacenamiento previo, considerado el proceso convencional, también se observó una variabilidad según el origen de las raíces. En ambos casos se produjo una contracción rápida, aunque las raíces del origen 2 mostraron una contracción final ligeramente menor.

Para entender los cambios descritos anteriormente y realizar comparaciones basadas en parámetros cinéticos relacionados con los cambios morfológicos durante el secado, se consideraron tanto el color (en intensidad de escala de grises) como la contracción. Para ello, se utilizó el modelo de Weibull, en el que el parámetro “k” representa la velocidad y “n” el factor de forma (Quevedo et al., 2018).

4.3.1. Parámetros cinéticos respecto a la intensidad de escala de grises durante el secado

Los parámetros cinéticos de los cambios morfológicos relacionados con la intensidad de escala de grises, el área proyectada y perímetro proyectado durante el secado se presentan en la tabla 3. En ella se muestran los valores obtenidos para velocidad “k” y factor de forma “n” durante el proceso de deshidratación.

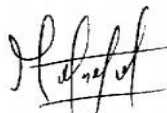
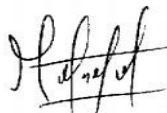


Tabla 3*Parámetros morfológicos (modelo de weibull) de la intensidad de escala de grises*

Trat	k (min-1) (velocidad de cambio)	n (factor de forma)	R²
C1	-8,64E ⁻⁰³ ± 2,43E ⁻⁰⁴ bcA	6,23E ⁻⁰¹ ± 2,34E ⁻⁰² dB	≥0,92
F1	-4,35E ⁻⁰¹ ± 1,62E ⁻⁰² aB	1,35E ⁻⁰¹ ± 2,43E ⁻⁰⁴ gD	≥0,55
R1	-8,98E ⁻⁰³ ± 1,57E ⁻⁰⁴ bcA	5,65E ⁻⁰¹ ± 1,58E ⁻⁰² eC	≥0,75
S1	-9,64E ⁻⁰⁴ ± 1,14E ⁻⁰⁴ cdA	1,07E ⁺⁰⁰ ± 1,18E ⁻⁰² bA	≥0,85
C2	-1,79E ⁻⁰² ± 9,64E ⁻⁰⁴ bD	4,92E ⁻⁰¹ ± 8,99E ⁻⁰³ fD	≥0,90
F2	-1,16E ⁻⁰² ± 9,82E ⁻⁰⁵ bcC	5,83E ⁻⁰¹ ± 1,02E ⁻⁰³ d,eC	≥0,87
R2	-1,06E ⁻⁰⁶ ± 1,31E ⁻⁰⁸ dA	1,89E ⁺⁰⁰ ± 2,19E ⁻⁰² aA	≥0,82
S2	-1,54E ⁻⁰³ ± 2,84E ⁻⁰⁵ cB	9,82E ⁻⁰¹ ± 4,16E ⁻⁰³ cB	≥0,91

Nota. Resultados de los parámetros morfológicos de la intensidad de escala de grises, donde C1 (convectivo sin pretratamiento), F1 (convectivo con congelación previa), R1 (convectivo con refrigeración previa), S1(solar) son de un origen; C2 (convectivo sin pretratamiento), F2 (convectivo con congelación previa), R2 (convectivo con refrigeración previa), S2 (solar) para el otro origen. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican con letras minúsculas diferentes. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos con el mismo origen

Respecto a la intensidad de escala de grises, el análisis de varianza (Anexo 3) reveló que tanto el origen de las raíces como el tipo de proceso y la interacción fueron significativos, lo que motivó la comparación de medias para identificar el sentido de los cambios. En cuanto a la velocidad de cambio “k”, se observó que, en promedio, las rebanadas deshidratadas con congelación previa también mostraron una velocidad de cambio significativamente inferior. Las comparaciones individuales de cada tratamiento indicaron que todos los valores presentaron una caída exponencial en la isoterma (Quevedo et al., 2016).

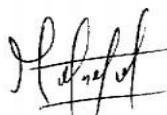




Específicamente, el tratamiento con congelación previa y origen 1 (F1) obtuvo el valor más bajo que los demás tratamientos. En cuanto al factor de forma “n”, la comparación de medias Tukey (Anexo 3) mostró que, el secado con congelación previa (F1) presentó los valores más bajos de “n”, aunque sin diferencias significativas en comparación con el secado con refrigeración y convectivo. Este último, a su vez, no presentó diferencias con el secado solar (S1). El secado con refrigeración previa (R2) mostró el mayor valor de “n”. En el modelo de Weibull, un valor de $n > 1$ indica una curva cinética con concavidad hacia abajo, mientras que un valor de $n < 1$ implica una concavidad hacia arriba (Quevedo et al., 2016). En el caso de los tratamientos de secado solar (S1) y refrigeración previa (R²), los valores de $n > 1$, lo que sugieren una concavidad hacia abajo. En los demás tratamientos, los valores de $n < 1$, indicando una concavidad hacia arriba. Además, el tratamiento F1 presentó un valor de “n” significativamente menor que los demás tratamientos. Por último, se destacó el coeficiente de correlación, que en la mayoría de los tratamientos superó el valor de 0,8. Sin embargo, en el tratamiento F1, el coeficiente de correlación fue más bajo, alcanzando un valor de 0,55. Se observó que las raíces de origen 2 mostraron mayor estabilidad de pardeamiento, lo que podría estar relacionado con diferencias en el contenido de compuestos fenólicos o enzimáticos entre zonas.

4.3.2. Cinética del área proyectada y perímetro proyectado durante el secado

La cinética de los cambios morfológicos durante el secado, tanto en el área proyectada como en el perímetro proyectado, se expresaron mediante los indicadores de contracción “k” y “n” de las rebanadas, con el objetivo de comparar las variaciones en el área proyectada entre los diferentes tratamientos de secado realizados.

Los indicadores de contracción analizados en este estudio, basado en el análisis de varianza, son la velocidad “k” y el factor de forma “n”, tanto para el área proyectada como para el perímetro proyectado. Los resultados fueron significativos ($p < 0,05$) tanto en relación al origen de las raíces como a los tipos



de secado aplicados (Anexo 4 y 5). En ambos casos (área y perímetro proyectado), los parámetros correspondientes a cada tratamiento, junto con las diferencias de medias obtenidas mediante la prueba Tukey, se presentan en las tablas 4 y 5.

En cuanto al área proyectada, el parámetro “k” (velocidad de cambio) resultó más alto en el tratamiento convectivo (C1 y C2), lo que indica una mayor velocidad de contracción del área. Le siguió el tratamiento con congelación previa (F1), que también mostró una velocidad relativamente elevada, aunque menor que la del convectivo. Por el contrario, los tratamientos con secado solar (S1 y S2) presentaron los valores más bajos de k, lo que indica que fueron los menos agresivos en términos de contracción del área. El tratamiento con refrigeración previa (R1 y R2) tuvo una velocidad intermedia. Respecto al parámetro “n” (factor de forma), el valor más alto se observó en el secado convectivo (C1), seguido por el secado solar (S1). Esto sugiere que estos tratamientos generaron una contracción con una forma más marcada o acelerada en el tiempo. El tratamiento con congelación previa (F2) presentó un valor de n superior al de varios otros tratamientos, pero no el más alto. En cambio, los valores más bajos de n se encontraron en los tratamientos solares (S2) y con refrigeración previa (R2), lo que indica una contracción más gradual.

En cuanto a la contracción del área, las raíces de origen 1 experimentaron mayores reducciones morfológicas en comparación con las del origen 2. Esto sugiere una diferencia estructural que podría deberse a factores agronómicos asociados al origen, tales como la densidad celular o el contenido de humedad inicial.

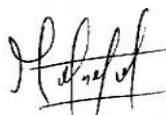
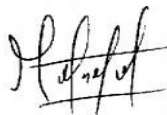


Tabla 4*Parámetros morfológicos (modelo de weibull) del área proyectada*

Tt	k (min-1) (velocidad de cambio)	n (factor de forma)	R²
C1	$-4,96E^{-03} \pm 2,14E^{-04}$ bB	$6,74E^{-01} \pm 1,73E^{-02}$ eB	$\geq 0,97$
F1	$-2,73E^{-04} \pm 9,64E^{-06}$ aC	$2,43E^{+00} \pm 1,44E^{-02}$ gC	$\geq 0,95$
R1	$-2,54E^{-04} \pm 6,88E^{-06}$ cB	$1,46E^{+00} \pm 1,69E^{-02}$ eB	$\geq 0,98$
S1	$-7,37E^{-07} \pm 20,00E^{+00}$ dA	$2,01E^{+00} \pm 1,65E^{-04}$ dA	$\geq 0,96$
C2	$-4,96E^{-03} \pm 2,14E^{-04}$ bB	$6,74E^{-01} \pm 1,73E^{-02}$ fB	$\geq 0,98$
F2	$-2,73E^{-04} \pm 9,64E^{-06}$ dA	$2,43E^{+00} \pm 1,44E^{-02}$ cA	$\geq 0,98$
R2	$-2,54E^{-04} \pm 6,88E^{-06}$ dA	$1,46E^{+00} \pm 1,69E^{-02}$ bA	$\geq 0,99$
S2	$-7,37E^{-07} \pm 0,00E^{+00}$ dA	$2,01E^{+00} \pm 1,65E^{-04}$ aA	$\geq 0,98$

Nota. Resultados de los parámetros morfológicos del área proyectada, donde C1 (convectivo sin pretratamiento), F1 (convectivo con congelación previa), R1 (convectivo con refrigeración previa), S1 (solar) son de un origen; C2 (convectivo sin pretratamiento), F2 (convectivo con congelación previa), R2 (convectivo con refrigeración previa), S2 (solar) para el otro origen. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican con letras minúsculas diferentes. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos con el mismo origen

En la tabla 5, en cuanto al perímetro proyectado, las comparaciones Tukey del parámetro “k” (velocidad de cambio) mostraron que el proceso de secado con congelación previa (F1) presentó, en promedio, valores significativamente más bajos que los tratamientos de secado convectivo (C1) y secado solar (S1), sin diferencias significativas entre estos dos últimos. Por otro lado, el secado con refrigeración previa (R1) presentó los valores más altos, significativamente mayores que los de los otros tratamientos. Por otro lado, el secado convectivo (C2) presentó, valores significativamente más bajos que los tratamientos con


refrigeración (R2), seguido del secado solar (S2), este último no mostro mucha diferencia significativa con la congelación previa (F1) la cual presentó los valores más altos que los de los otros tratamientos. Los resultados de las comparaciones Tukey ($p < 0,05$) entre cada tratamiento y origen se presentan en la tabla 5.

En relación con el parámetro “n” (factor de forma) del perímetro proyectado, las comparaciones Tukey indicaron que el secado con congelación previa (F1) obtuvo, en promedio los valores significativamente más altos, sin diferencias respecto al secado solar (S1), seguido del secado convectivo (C1) y con refrigeración previa (R1). La tabla 5 presenta las comparaciones Tukey ($p < 0,05$) para cada tratamiento y origen en relación con los parámetros morfológicos del perímetro proyectado. Al comparar los distintos los procesos de secado, las rebanadas sometidas a secado solar (S1) y a congelación previa (F1) presentaron los valores más bajos de “n”, seguidas de C2, C1, R1, R2, S2, y con el valor más alto para F2. En todos los casos, se observó un coeficiente de correlación superior a 0,9.

En cuanto a la contracción del perímetro, las raíces de origen 1 experimentaron mayores reducciones morfológicas en comparación con las del origen 2. Esto sugiere una diferencia estructural que podría deberse a factores agronómicos asociados al origen, tales como la densidad celular o el contenido de humedad inicial.

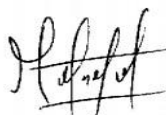


Tabla 5*Parámetros morfológicos (modelo de weibull) del perímetro*

Trat	k (min ⁻¹) (velocidad de cambio)	n (factor de forma)	R ²
C1	-5,76E ⁻⁰³ ± 3,54E ⁻⁰⁴ cB	7,29E ⁻⁰¹ ± 5,88E ⁻⁰³ eB	≥0,96
F1	-1,69E ⁻⁰² ± 4,08E ⁻⁰⁴ aC	5,58E ⁻⁰¹ ± 1,25E ⁻⁰² gC	≥0,94
R1	-2,32E ⁻⁰³ ± 2,35E ⁻⁰⁴ dA	8,47E ⁻⁰¹ ± 1,05E ⁻⁰² dA	≥0,97
S1	-6,49E ⁻⁰³ ± 1,05E ⁻⁰⁴ bB	5,68E ⁻⁰¹ ± 2,46E ⁻⁰² gC	≥0,89
C2	-6,70E ⁻⁰³ ± 1,33E ⁻⁰⁴ bD	6,74E ⁻⁰¹ ± 1,73E ⁻⁰² fB	≥0,96
F2	-1,63E ⁻⁰⁷ ± 5,77E ⁻¹⁰ eA	2,43E ⁺⁰⁰ ± 1,44E ⁻⁰² aC	≥0,89
R2	-6,78E ⁻⁰⁵ ± 6,78E ⁻⁰⁶ eC	1,45E ⁺⁰⁰ ± 6,79E ⁻⁰³ cA	≥0,99
S2	-1,29E ⁻⁰⁶ ± 2,56E ⁻⁰⁸ eB	2,01E ⁺⁰⁰ ± 1,65E ⁻⁰⁴ bC	≥0,93

Nota. Resultados de los parámetros morfológicos del perímetro, donde C1 (convectivo sin pretratamiento), F1 (convectivo con congelación previa), R1 (convectivo con refrigeración previa), S1(solar) son de un origen; C2 (convectivo sin pretratamiento), F2 (convectivo con congelación previa), R2 (convectivo con refrigeración previa), S2 (solar) para el otro origen. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican con letras minúsculas diferentes. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos con el mismo origen

4.4. Cambios morfológicos durante la rehidratación: intensidad de escala de grises, contracción del área y perímetro

Para comparar los cambios morfológicos relacionados con el color y la hidratación de las rebanadas previamente deshidratadas, se analizaron imágenes para obtener los valores de la intensidad de escala de grises, así como la proyección del área y perímetro. Los cambios durante el proceso de deshidratación se muestran en la figura 7. La figura 7A y 7B muestran la intensidad de escala de grises, que es un indicador indirecto del índice de pardeamiento o oscurecimiento de las rebanadas deshidratadas.

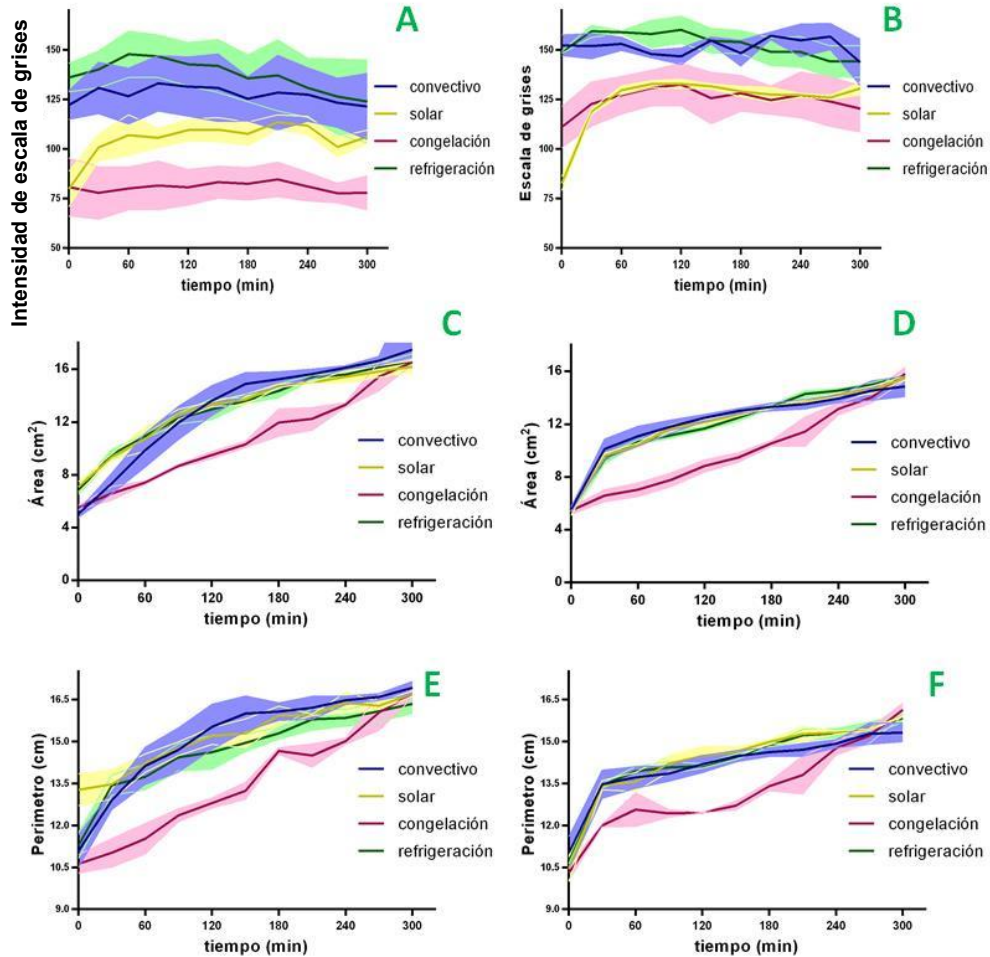




En la figura 7C y 7D, se presenta la medida del área proyectada durante la rehidratación, y en las figuras 7E y 7F se muestra la medición del perímetro proyectado.

Figura 7

Resultados morfológicos durante la rehidratación



Nota. (7A, 7C y 7E) para un origen, (7B, 7D y 7F) para el otro origen; además (7A y 7B) intensidad de escala de grises, (7C y 7D) área proyectada, (7E y 7F) perímetro proyectado de las rebanadas rehidratadas. Las sombras de color representan la desviación estándar

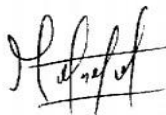
[Handwritten signatures]

En las figuras 7A y 7B se observa que los tratamientos con secado solar, especialmente el tratamiento con congelación previa (origen 1), presentan los valores más bajos en la intensidad de escala de grises, lo que sugiere una mayor tendencia al oscurecimiento de las rebanadas rehidratadas. Por otro lado, el tratamiento con secado convectivo, y en particular el proceso con refrigeración previa, muestra los valores más altos y estables en la intensidad de escala de grises, lo que indica una mejor respuesta al reducir el oscurecimiento.

En las figuras 7C y 7D, se muestra el área proyectada de las rebanadas durante su rehidratación, donde se observa que esta medida casi se triplicó en todos los tratamientos. Por otro lado, en las figuras 7E y 7F, el perímetro proyectado aumentó 1,5 veces respecto a la medida inicial durante el proceso de rehidratación. En ambos casos, tanto el área como el perímetro proyectado, el secado con congelación previa presentó un retraso en la recuperación de estas dimensiones en comparación con los otros tratamientos. En los tratamientos sin congelación previa, los valores de área y perímetro se superponen, lo que indica una mayor capacidad de retención de agua y una rápida expansión de las muestras. En cambio, el almacenamiento previo por congelación mostró una menor capacidad para retener agua, lo que resultó en una recuperación más lenta. Se evidenció que las raíces provenientes de Otuzco presentaron una mayor recuperación del color durante la rehidratación, manteniendo valores más altos de la intensidad de escala de grises. En cambio, las raíces de Gran Chimú conservaron niveles más bajos de intensidad, lo que indica un pardeamiento más persistente, posiblemente relacionado con diferencias en el contenido fenólico o la estructura celular según el origen.

4.4.1. Parámetros cinéticos de los cambios morfológicos durante la rehidratación

Para realizar comparaciones de los cambios morfológicos durante la rehidratación en función de la contracción, se utilizó el modelo de Weibull, en el que “k” representa el parámetro de velocidad y “n” el factor de forma. Sin embargo, debido a la naturaleza de los datos obtenidos para la intensidad de escala de grises, no fue posible determinar los parámetros de Weibull, ya que en la mayoría de los casos



los valores no presentaron variaciones significativas que permitieran identificar una tendencia sostenida para calcular las constantes del modelo Weibull.

En el área proyectada y perímetro proyectado, las constantes cinéticas de los cambios morfológicos durante la rehidratación se presentan en las tablas 6 y 7. Estas tablas muestran los parámetros de Weibull junto con los coeficientes de regresión para la velocidad de ganancia del área proyectada y el factor de forma, considerando el aumento en el tamaño de las rebanadas secas durante la rehidratación, bajo diferentes tratamientos. Se incluyó un análisis de varianza y una comparación de medias mediante la prueba Tukey. Según los resultados, tanto el origen de las raíces como el tipo de secado, y la interacción entre estas variables, resultaron significativos en la variación del área proyectada y el perímetro proyectado, así como en la constante de la velocidad “k” y el factor de forma “n”. En cuanto al área proyectada, las comparaciones Tukey (Anexo 6) indicaron que, el secado con congelación previa mostró los valores menores de “k”, en comparación con los otros tratamientos. En la tabla 6 se muestran las comparaciones de los procesos individuales, donde la mayor velocidad de cambio (incremento de área) se obtuvo en el secado convectivo C2, seguido del proceso solar S2, el secado convectivo C1, el secado solar S1, el tratamiento con refrigeración previa R1, y el secado con congelación previa F1, que presentó una menor velocidad. Respecto al factor de forma “n”, las comparaciones Tukey revelaron que, en promedio, a los métodos de secado y origen, el secado convectivo (C1 y C2) presentó los valores más bajos, sin diferencias significativas respecto al secado solar (S1 y S2), pero significativamente menores que el secado con refrigeración previa, que mostró el valor máximo para “n”. En las comparaciones individuales, el secado con congelación previa F2 tuvo el valor más alto de “n”, seguido de F1, luego R1, S1, C1, y R2, que no difirió significativamente de S2, con el valor mínimo encontrado en C2. En cuanto a la contracción del área durante la rehidratación, las raíces de Otuzco mostraron una mayor recuperación morfológica, con menores diferencias en área y perímetro respecto al estado inicial.

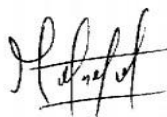


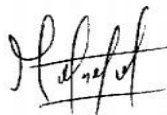
Tabla 6

Parámetros del Análisis de Imágenes del Área Proyectada durante la rehidratación

Trat	k (min⁻¹) (velocidad de cambio)	n (factor de forma)	R²
C1	2,23E ⁻⁰¹ ± 6,61E ⁻⁰³ bA	2,92E ⁻⁰¹ ± 2,14E ⁻⁰² dD	≥0,97
F1	1,31E ⁻⁰² ± 5,04E ⁻⁰⁵ dD	7,84E ⁻⁰¹ ± 1,13E ⁻⁰² aA	≥0,98
R1	7,27E ⁻⁰² ± 1,96E ⁻⁰³ cC	4,40E ⁻⁰¹ ± 9,44E ⁻⁰³ bB	≥0,99
S1	9,98E ⁻⁰² ± 1,06E ⁻⁰³ cB	3,68E ⁻⁰¹ ± 7,63E ⁻⁰³ cC	≥0,99
C2	3,05E ⁻⁰¹ ± 1,12E ⁻⁰² aA	2,02E ⁻⁰¹ ± 4,00E ⁻⁰³ eD	≥0,97
F2	1,00E ⁻⁰² ± 1,24E ⁻⁰⁴ dC	8,19E ⁻⁰¹ ± 5,45E ⁻⁰³ aA	≥0,99
R2	2,21E ⁻⁰¹ ± 5,13E ⁻⁰³ bB	2,72E ⁻⁰¹ ± 1,07E ⁻⁰² dB	≥0,99
S2	2,39E ⁻⁰¹ ± 8,12E ⁻⁰³ bB	2,51E ⁻⁰¹ ± 6,90E ⁻⁰³ dC	≥0,98

Nota. Resultados de los parámetros del análisis de imágenes del área proyectada durante la rehidratación, C1 (convectivo sin pretratamiento), F1 (convectivo con congelación previa), R1 (convectivo con refrigeración previa), S1(solar) son de un origen; C2 (convectivo sin pretratamiento), F2 (convectivo con congelación previa), R2 (convectivo con refrigeración previa), S2 (solar) para el otro origen. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican con letras minúsculas diferentes. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos con el mismo origen

En la tabla 7 se presentan los valores de las constantes “k” y “n”, para cada proceso específico, junto con sus respectivas comparaciones Tukey (Anexo 7). Según los resultados de medias Tukey, el secado con congelación previa (F1) mostró los valores más bajos de “k”, sin diferencias significativas respecto a los tratamientos de secado convectivo (C1) y solar (S1). Por otro lado, el secado con refrigeración previa (R1) mostró un valor significativamente mayor de “k”.


En cuanto a la constante de velocidad (k), en el secado convectivo se obtuvo el valor más alto, seguido por el secado con refrigeración previa R2, el secado solar S2, valores similares entre C1 y R1, y finalmente mismos valores entre los tratamientos F1, S1 y F2. En relación con la constante “n”, se observó que, en promedio, los valores fueron más bajos para las muestras de origen 2. En las comparaciones entre tratamientos, el secado convectivo (C2) presentó los valores más bajos de “n” seguido por un valor cercano entre el secado con refrigeración previa (R2) y secado solar (S2), mientras que la muestra con congelación previa (F2) mostró el valor más alto. En las comparaciones Tukey entre procesos, el valor máximo de “n” se obtuvo para los valores similares entre las muestras F1 y F2, seguido por el secado solar S1. A continuación, hubo un mismo valor entre el secado convectivo C1 y secado con refrigeración previa R1, seguido del secado solar S2, el secado con refrigeración previa R2, y finalmente, el secado convectivo C2 presentó el valor más bajo. En cuanto a la contracción del perímetro durante la rehidratación, las raíces de Otuzco mostraron una mayor recuperación morfológica, con menores diferencias en área y perímetro respecto al estado inicial.

Tabla 7

Parámetros del Análisis de Imágenes del Perímetro durante la rehidratación

Perímetro			
Trat	k (velocidad de cambio)	n (factor de forma)	R²
C1	3,01E ⁻⁰² ± 6,29E ⁻⁰⁴ dB	4,52E ⁻⁰¹ ± 1,42E ⁻⁰² cC	≥0,98
F1	1,36E ⁻⁰³ ± 5,76E ⁻⁰⁵ eD	1,02E ⁺⁰⁰ ± 2,65E ⁻⁰³ aA	≥0,98
R1	3,26E ⁻⁰² ± 4,08E ⁻⁰⁴ dA	4,37E ⁻⁰¹ ± 8,23E ⁻⁰³ cC	≥0,98
S1	3,14E ⁻⁰³ ± 1,72E ⁻⁰⁴ eC	7,72E ⁻⁰¹ ± 1,37E ⁻⁰² bB	≥0,97
C2	1,06E ⁻⁰¹ ± 5,59E ⁻⁰³ aA	1,95E ⁻⁰¹ ± 2,54E ⁻⁰³ dD	≥0,98
F2	1,21E ⁻⁰³ ± 1,95E ⁻⁰⁴ eD	1,02E ⁺⁰⁰ ± 5,67E ⁻⁰³ aA	≥0,93
R2	8,81E ⁻⁰² ± 1,18E ⁻⁰³ bB	2,52E ⁻⁰¹ ± 2,69E ⁻⁰³ eC	≥0,99
S2	6,89E ⁻⁰² ± 2,14E ⁻⁰³ cC	3,11E ⁻⁰¹ ± 1,01E ⁻⁰² dB	≥0,97

Nota. Resultados de los parámetros del análisis de imágenes del perímetro durante la rehidratación, donde C1 (convectivo sin pretratamiento), F1 (convectivo con congelación previa), R1 (convectivo con refrigeración previa), S1(solar) son de un origen; C2 (convectivo sin pretratamiento), F2 (convectivo con congelación previa), R2 (convectivo con refrigeración previa), S2 (solar) para el otro origen. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos se indican con letras minúsculas diferentes. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos con el mismo origen

4.5. Efecto del secado en propiedades funcionales: solubilidad

La solubilidad se define como una propiedad funcional que, en términos tecnológicos, implica la cuantificación de la cantidad de matriz alimenticia que se disolverá en agua a una temperatura determinada (Rodríguez Alzamora, 2017). En este estudio, se analizaron mediante ANOVA los efectos del origen y el tipo de tratamiento de cada proceso de secado. Los resultados mostraron que el origen no fue un factor significativo, pero sí lo fue el tipo de secado. Las comparaciones de medias Tukey (Anexo 7) indicaron que el secado por convección presentó la menor solubilidad, el secado convectivo, con congelación y refrigeración previa no presentan diferencias significativas. La mayor solubilidad se observó en el secado solar.

En la figura 8 se muestran las comparaciones individuales Tukey para cada proceso de secado. Se observó que el secado solar (S1, S2) presentaron mayor solubilidad principalmente el origen 1. Por otro lado, el secado convectivo (C1, C2) muestran una menor solubilidad. El secado con refrigeración previa (R1, R2) y congelación previa (F1, F2) presentaron solubilidades intermedias, sin diferencias marcadas entre sí.

En el análisis de solubilidad, no se identificaron diferencias marcadas entre ambos orígenes. Sin embargo, las muestras de origen 2 mostraron una ligera tendencia a una mayor capacidad de solubilidad en tratamientos con pretratamiento térmico y secado solar. Esto podría estar relacionado con una estructura celular con menor alteración de compuestos solubles durante el secado.

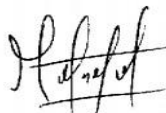
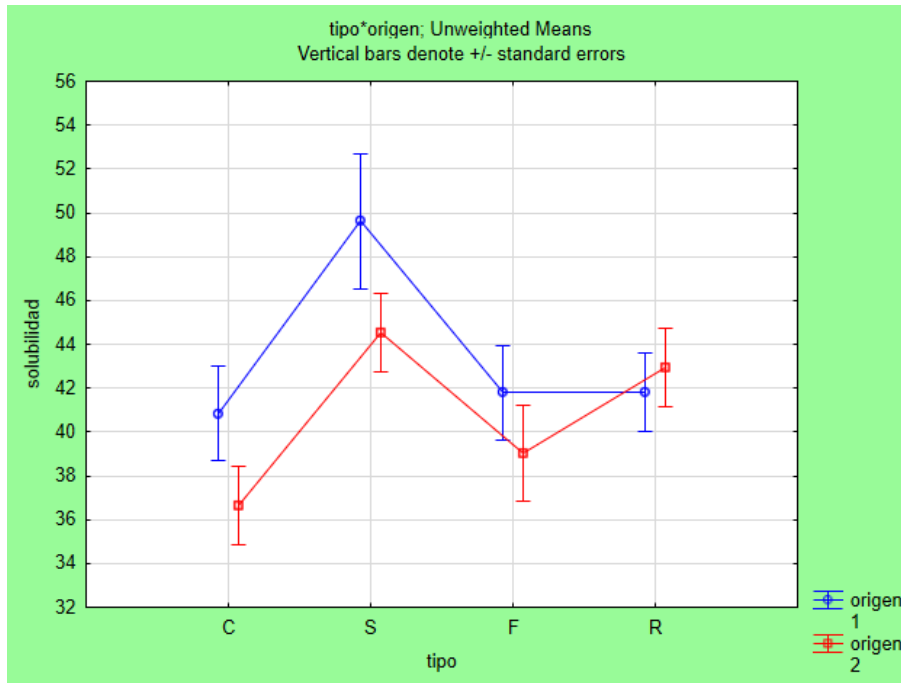


Figura 8

Resultados de la solubilidad en los diferentes tratamientos de secado



Nota. Resultados de la solubilidad en los diferentes tratamientos de secado, donde C (secado convectivo), F (convectivo con congelación previa), R (convectivo con refrigeración previa), S (secado solar).

IV. DISCUSIÓN

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar el proceso de secado de yacón para su conservación. En particular se compara el secado convectivo con pretratamientos de bajas temperaturas (refrigeración y congelación), y también el secado solar, debido a la naturaleza perecedera del yacón, cuya vida útil es especialmente corta en términos del contenido de FOS (Lock et al., 2016). Los FOS del yacón pueden despolimerizarse y aumentar la concentración de azúcares reductores, como la fructosa, durante el almacenamiento (Maldonado et al., 2008). Estudios previos sobre el yacón hasta la actualidad, han abarcado la obtención de rebanadas y harinas por el método de secado por aire caliente, obteniendo productos con pérdidas significativas en el color, tamaño, y otras propiedades fisicoquímicas. Como alternativa, el uso de métodos de secado con o sin

pretratamientos busca conservar las propiedades físicas y químicas y funcionales del yacón para su aplicación industrial.

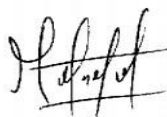
Las operaciones unitarias como refrigeración y congelación vienen siendo aplicadas inclusive a escala piloto e industrial, para prolongar la vida útil de las raíces (Maldonado et al., 2008). A pesar de ser métodos generalizados de conservación, la información sobre la forma óptima de conservar el yacón es limitada para su aplicación industrial. La refrigeración ofrece ventajas frente al almacenamiento a temperatura ambiente, aunque puede comprometer algunas propiedades funcionales (Lock et al., 2016). La congelación ha demostrado ser más eficaz que la refrigeración para preservar los compuestos bioactivos y las características sensoriales (Velasco et al., 2008). Por su parte, en el caso del secado solar, también ampliamente utilizado, se basa en la exposición directa del producto a la radiación solar, lo que promueve la evaporación del agua en la superficie del producto (Jiménez-Guzmán et al., 2016). El cual ha sido un método bastante considerado para el secado de otros productos a nivel de producción primaria (Perussello et al., 2014).

La variación de peso durante cada tipo de secado resumida mediante el ratio de humedad (humedad adimensional), facilita la observación de las curvas de secado. Las curvas de secado pueden ser modeladas bajo diferentes modelos matemáticos, como el modelo de Lewis, o la aproximación a la difusión, que permiten predecir el comportamiento del producto durante el secado (Perussello et al., 2014). El modelo de Page ha sido ampliamente utilizado en el secado de productos agrícolas como rebanadas de manzana, banano, zanahoria, entre otros (Arias et al., 2017) (López-Mata et al., 2016). Según Simpson et al. (2017), el parámetro “n” está relacionado al tipo de difusión en la microestructura de los alimentos ($n > 1$ super-difusión, $n < 1$ sub-difusión), mientras que “k” está relacionado con la velocidad de secado, generalmente influenciada por la temperatura. En el caso del yacón, el modelo de Page se ha aplicado para estudiar la cinética de secado en diferentes cortes y condiciones de temperatura y concentración (Gamonal Castillo y Olivares Muñoz, 2020).



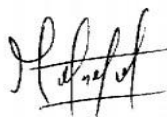
Los resultados obtenidos muestran una interdependencia entre los parámetros de Page en el secado solar, con los valores similares estadísticos para los dos parámetros (k y n), confirmando la utilidad del modelo de Page (Simpson et al., 2017). El secado almacenando con congelación previa (F1 y F2) presentó una mayor velocidad de secado (k), seguido del almacenado con refrigeración previa (R1 y R2), ambos superando el secado convencional sin almacenamiento previo. El parámetro de difusividad (n) fue menor en los tratamientos con congelación (F1 y F2), seguido de refrigeración (R2), siendo más alto en el secado convectivo (C1 y C2). Estos resultados son consistentes con los reportados por De Los Santos Pazos (2021), donde se observó que un aumento en “ k ” se acompaña de una disminución de “ n ”, corroborando la relación conjunta de estos parámetros en la curva del modelo de Page (Simpson et al., 2017). El modelo de Page ha demostrado su eficacia para describir la cinética de secado de alimentos, influidos por bajas temperaturas, como en el caso de ajustarse a la microestructura porosa del tomate liofilizado (Lopez-Quiroga et al., 2020); también en el caso de uva congelada previamente antes de ser secada, reduciendo la contracción, el tiempo de secado y la rehidratación después del secado con aire caliente. Donde el modelo de Page proporcionó el mejor ajuste para este proceso, permitiendo una predicción precisa de la cinética de secado y la retención de la calidad (Noshad y Ghasemi, 2020).

En la rehidratación, se estableció que el modelo ajustado de Peleg, permitió establecer dos parámetros cinéticos comparativos (k_1 y k_2). Las rebanadas de origen 1, en el caso con secado solar (S1) presentaron diferencias significativas respecto a la velocidad de rehidratación y capacidad de retención de agua final en comparación con otras muestras, mientras que el secado convectivo (C1) y con congelación (F1) se tuvo perfiles similares en la absorción de humedad. En contraste, el secado con pretratamiento de refrigeración (R1) mostró un comportamiento divergente, con una menor absorción de agua para origen 1 y mayor en origen 2. Las rebanadas de origen 2, el secado convectivo (C2) presento una mayor velocidad de rehidratación, por otro lado, el secado con congelación (F2) y con refrigeración (R2) presentaron valores similares en la absorción de humedad. Finalmente, el secado con congelación (F2) mostró menor absorción de agua. Los valores cinéticos “ k_1 y k_2 ” revelan que la menor tasa de absorción de agua inicial (k_1) se dio en la muestra



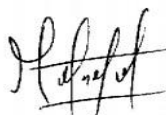
F2, mientras que las muestras C2 y S1 mostraron la tasa máxima. La absorción de agua en equilibrio fue mayor en las muestras S1, F2 y R2, lo que sugiere similitudes entre secado convectivo y el secado con refrigeración previa, y diferencias claras entre las muestras. Estos resultados indican que los distintos tipos de secado influyen en la facilidad de rehidratación, que es menor en las muestras congeladas, posiblemente debido a un daño en la microestructura causado por el proceso de deshidratación. En el trabajo de De Los Santos Pazos (2021), se encontró valores más bajos para k_1 (mayor velocidad de ganancia de humedad) y mayores valores para k_2 , indicando una menor capacidad de retención de agua final, lo cual podría estar relacionado con tiempos de proceso más cortos. En otros trabajos, se reportó que la temperatura de congelación y los tratamientos previos, como el escaldado pueden influir, rehidratándose más rápidamente, debido a una mayor porosidad; por otro lado, se menciona que la congelación a temperaturas más bajas, ayudaría a una mejor rehidratación (Vergeldt et al., 2014). Esto último es contrastante con los resultados obtenidos, pero que podría deberse a las condiciones de la velocidad y la formación de cristales de hielo en la matriz. En el pretratamiento de congelación en uvas antes del secado, se obtuvo la mejora en la capacidad de rehidratación y la difusión de la humedad en las pasas, dando lugar a un proceso de rehidratación más rápido. Esto se atribuye a los cambios microestructurales inducidos por la congelación que preservan la capilaridad y las redes porosas en el producto desecado (Noshad y Ghasemi, 2020).

Este trabajo estudió los cambios morfológicos provocados por el secado convectivo en rebanadas del yacón durante el proceso de secado y rehidratación. Los distintos métodos de secado afectan la morfología del yacón, influyendo en su contracción, y una mayor contracción puede resultar en un pardeamiento indeseado o en una menor aceptación visual, como ocurre en el secado solar (Marques et al., 2022). La contracción se evaluó a través del área y el perímetro proyectados en dos dimensiones, como indicadores de contracción y deformación durante el proceso de secado. Como indicador de pardeamiento se utilizó la intensidad de escala de grises, en la que los polifenoles presentes en el yacón podrían ser los sustratos responsables, ya que estos pueden reaccionar con aminoácidos o polimerizarse, causando un color verdoso o negro a la matriz (Choque Delgado et al., 2013). Además, Mondragón (2013) destaca que los cambios de humedad durante el secado



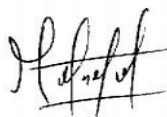
inducen transformaciones que afectan las características morfológicas en alimentos.

La velocidad de cambio de color y contracción de las rebanadas de (k), fueron parametrizados por medio del modelo de Weibull, donde se observó, que, tanto en el caso del secado con congelación previa F1, obtuvo menores valores significativos de velocidad (k) tanto con respecto a la intensidad de escala de grises, al área y perímetro proyectado, no siendo el caso de F2. El parámetro “k”, cuando es negativo, se interpreta como una disminución de su valor en el tiempo (Jiang y Murthy, 2011), por lo tanto, se puede interpretar que la velocidad de pardeamiento u oscurecimiento, de disminución de área y de perímetro fue mayor en F1, teniendo un posible efecto negativo en el proceso de secado, en el caso de F2 se obtuvo diferencias significativas en los parámetro “k y n”, y sin obtener diferencias respecto a las demás muestras; sin embargo se observó, que al menos en las rebanadas del origen 1, se tuvo una tendencia al pardeamiento en F2, donde se alcanzó valores similares obtenidos para el secado solar (S1 y S2). En caso del secado solar, los cambios de morfología fueron más lentos, sin obtener cambios en “k”, donde apenas S2 obtuvo una alta velocidad respecto al perímetro. Pero el secado solar produjo los mayores valores en el parámetro “n” (factor de forma), donde, en casos que “n” sea mayor, más largo es el proceso de cambio, es decir la velocidad de cambio es menor, en el presente trabajo se puede corroborar que efectivamente el secado solar obtuvo cambios más lentos, especialmente en los tratamientos como S1 en la intensidad de escala de grises, S2 para el área proyectada y perímetro proyectado, denotando diferencias con respecto al origen de las muestras. En el caso de la refrigeración como pretratamiento, “n” también obtuvo valores altos, en especial para R2 en la intensidad de escala de grises, S2 para área y perímetro proyectado, encontrando también divergencia con R1, a pesar de esto, los valores de la intensidad de escala de grises fueron mayores para R1, lo que podría deberse a menores valores de coeficiente de correlación en la intensidad de escala de grises. En caso de la contracción los valores de “n” para R2 fueron mayores, debido a un atraso con respecto a las muestras de R1.



El uso de imágenes en intensidad de escala de grises (grayscale) para analizar el pardeamiento y cambios de color en productos alimentarios se presenta como oportunidad de mejora e incluso para control de procesos. En el caso de una aplicación en los hongos, las imágenes en la intensidad de escala de grises permitieron segmentar y analizar los niveles de pardeamiento al identificar la disminución de la reflectancia en las áreas afectadas por el cambio de color (Mollazade, 2017). La intensidad de escala de grises también se ha utilizado para detectar el pardeamiento mediante sistemas de visión por computadora, identificando cambios en los valores de color e índices de pardeamiento utilizando imágenes digitales analizadas en escalas de grises. Estas métricas se correlacionan directamente con procesos químicos como la oxidación de compuestos fenólicos catalizada por polifenoloxidasas (Gonzalez et al., 2001; Pathak et al., 2021). La intensidad de escala de grises potencialmente podría permitir implementar sistemas de control de calidad en línea para identificar productos con niveles inaceptables de pardeamiento, lo cual es de suma importancia en la industria alimentaria.

Con respecto a la contracción del yacón, se ha reportado anteriormente que el secado con aire caliente obtuvo una contracción significativa, de hasta el 89%, durante el secado, debido a la pérdida de humedad y al colapso del tejido. Este efecto se confirmó mediante microscopía electrónica de barrido, que mostró una grave distorsión estructural durante el secado (Bernstein y Noreña, 2014). Sin embargo, se tiene referencia que, los pretratamientos como la deshidratación osmótica por vacío pulsado reducen el tiempo de secado y mejoran la retención de FOS y color. Debido a que minimizan la distorsión del tejido y mejoran la calidad del producto final (Oliveira et al., 2021). Mulet et al. (2000), investigaron la contracción de la papa y coliflor durante el secado, mediante análisis de imágenes, concluyendo que las dimensiones físicas de los alimentos se alteran en función del tipo de secado y la forma de las muestras, lo que influye en el índice de contracción. En este estudio, el índice de contracción del área y perímetro de las rebanadas de yacón disminuyó a medida que avanzaba el proceso de secado, probablemente debido a la pérdida del contenido de agua y a la intervención de otros factores, como el colapso celular y el incremento de la rigidez debido a la deshidratación. En el presente estudio se corroboró que al menos la refrigeración previa obtuvo una menor contracción comparativamente.

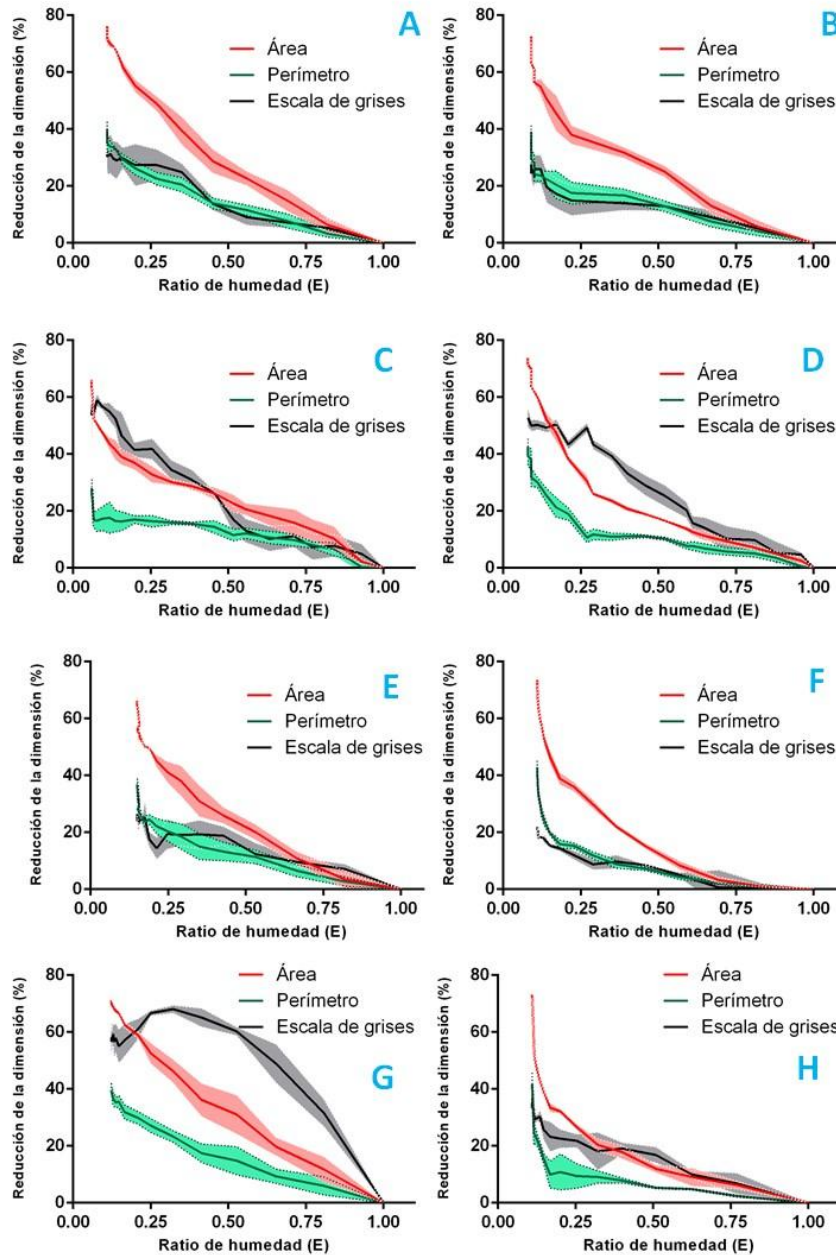


Para obtener una mejor visión del proceso de secado, la figura 9, compara la intensidad de escala de grises junto con la contracción del área y perímetro versus la etapa de secado en función al ratio de humedad adimensional. Donde en el caso del secado convectivo (figuras 9A y 9B), se obtuvo una mayor tendencia al pardeamiento y contracción del área y perímetro, para las muestras de origen 1. En el caso del secado solar (figuras 9C y 9D), se obtuvo tendencias similares con excepción de la contracción del área de S2, en general el secado solar obtuvo un mayor pardeamiento (intensidad de escala de grises). En caso del secado con pretratamiento con refrigeración (figuras 9E y 9F), se resalta que obtuvo un mínimo de cambios, denotando una disminución más leve y por tanto una mínima disminución de la intensidad de escala de grises, lo que se puede considerar como un pretratamiento eficaz para evitar el pardeamiento de las rebanadas, y se debe considerar que la contracción fue bastante leve en comparación con los otros tratamientos. En el caso de la congelación como pretratamiento (figuras 9G y 9H), se evidencia que el origen 1 fue altamente afectado por la congelación, maximizando la intensidad de escala de grises y la contracción del área y perímetro.



Figura 9

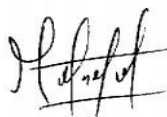
Contraste de las dimensiones en el secado convectivo y solar, secado convectivo con refrigeración y congelación previa.



Nota. (9A, 9C, 9E y 9G) para el origen 1, (9B, 9D, 9F y 9H) para el origen 2; además (A y B) secado convectivo, (C y D) secado solar, (E y F) refrigeración + secado convectivo, (G y H) congelación + secado convectivo

Estos resultados favorables para el pretratamiento con refrigeración, se corresponde con lo mencionada por Quaresma et al. (2020), quienes mencionan que la refrigeración de los rizóforos de yacón a 8-10 °C durante 21-35 días mejoró las tasas de germinación y redujo la mortalidad, lo que dio lugar a un crecimiento y unas cosechas más uniformes. Además, la refrigeración a 4 °C conservó los compuestos antioxidantes de los tubérculos de yacón mejor que el almacenamiento a 0 °C o 10 °C, hasta por 14 días (Castro et al., 2012). En general se esperaría que la congelación mantuviera mejor la integridad y preservar las propiedades físicas del yacón; sin embargo, al tratarse de una congelación lenta, podría causar importantes daños estructurales en el yacón, debido al mayor tamaño de los cristales de hielo en comparación con la congelación rápida, lo que, se traduce en una mayor pérdida de fluidos durante la descongelación, lo que provoca texturas más blandas y una menor firmeza. Técnicas como la criomicroscopía electrónica de barrido revelan un mayor daño celular y desintegración en las verduras congeladas lentamente en comparación con las congeladas rápidamente (Fuchigami et al., 1995). Con respecto al secado solar, a pesar de sus beneficios, se tiene limitaciones como, el caso de una exposición solar desigual, que, puede provocar inconsistencias en el contenido de humedad, comprometiendo potencialmente la calidad del yacón seco (Ong, 1999). Así como, la exposición prolongada a la luz solar puede causar pardeamiento y pérdida de FOS, que son fundamentales para los beneficios para la salud del yacón (Scher et al., 2009).

Con respecto a la rehidratación, se evidencia que el secado con refrigeración previa obtuvo mayores valores de la intensidad de escala de grises, manteniendo su color sin oscurecerse, a diferencia del secado solar y congelación previa. Por otro lado, los parámetros cinéticos del modelo weillulliano para la velocidad “k” fueron menores y mayores para el factor de forma “n”, para la contracción del área y perímetro, lo que se correspondió con el comportamiento de mantener una expansión más lenta en comparación con los demás tratamientos. A pesar que, la congelación preserva la integridad celular, lo que permite una acción capilar más eficaz y una absorción de agua más rápida durante la rehidratación, como en el caso de la liofilización (Hernando et al., 2008). La congelación lenta pudo haber perjudicado la estructura celular, vaciando el contenido celular, lo que resultó en una menor ganancia de agua. En otro trabajo de una raíz, se reportó que mediante un análisis

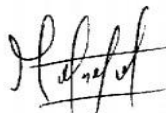


microscópico muestra que las láminas rehidratadas de ñame, presentan estructuras porosas irregulares, donde los poros más pequeños y numerosos fueron formados durante los métodos de secado suave, que favorecen una mejor absorción de agua durante la rehidratación (Zhang et al., 2023).

La solubilidad, una propiedad tecnológica sumamente importante para aplicaciones industriales, mostró ser mayor en el secado solar y pretratamiento con congelación, seguido de refrigeración y secado convectivo, lo que podría relacionarse con una menor debilidad en la estructura física en el momento de solubilizarse en agua. La bibliografía tiene pocas referencias sobre yacón, como el caso de espuma de yacón, los productos conservan su solubilidad a pesar de los cambios en el contenido de humedad y la higroscopicidad. Las condiciones de secado, como temperaturas más altas, pueden reducir el contenido de humedad sin afectar significativamente los índices de solubilidad (Franco et al., 2016). Sin embargo, se esperaría una alta solubilidad en agua de los FOS, que, son altamente solubles en agua. Esta propiedad hace del yacón una excelente fuente de compuestos prebióticos (Scher et al., 2015).

Choi y Lee (2018) mencionan que la harina de yacón presenta una isoterma de sorción de agua de tipo III, lo que indica una baja afinidad por el agua a baja humedad, pero una rápida absorción a medida que aumenta la humedad. Esto podría explicar el porqué de su gran capacidad de solubilizar. Por otro lado, se sabe que en el caso de las partículas más pequeñas de harinas (arroz, por ejemplo), estas tienen mayor capacidad de retención de agua y solubilidad (Lapčiková et al., 2021), lo cual podría influir en los resultados, que, en nuestro caso no se llevó un control del tamaño, debido a su naturaleza amorfa y al tamaño de muestra.

La comparación entre ambos orígenes evidenció que las raíces de yacón responden de manera diferente a los procesos de secado y rehidratación. Las raíces de Otuzco mostraron mayor estabilidad estructural y de color, mientras que las de Gran Chimú fueron más susceptibles a daños morfológicos. Esto nos indica que el origen influye significativamente en el comportamiento del yacón durante el procesamiento.

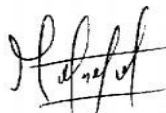


V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio evaluó el proceso de secado del yacón, una raíz perecedera, comparando métodos como el secado convectivo, solar y convectivo con pretratamientos de refrigeración y congelación. Se encontró que la congelación acelera el secado, pero genera mayor contracción y oscurecimiento, mientras que la refrigeración conserva mejor la estructura y el color de las rebanadas, además de mejorar la eficiencia del proceso de rehidratación. Morfológicamente, las muestras con refrigeración mostraron menor deformación y oscurecimiento, lo que favoreció una mejor rehidratación y mayor solubilidad, especialmente por la preservación de fructooligosacáridos. Finalmente, se observó que el origen del yacón influye en su comportamiento durante el secado: las raíces de Otuzco mantuvieron mejor su estructura y color que las de Gran Chimú, que presentaron mayor contracción y pardeamiento, sobre todo con congelación. Por tanto, el tipo de secado, el pretratamiento y el origen del yacón afectan significativamente su calidad final.

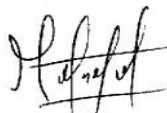
RECOMENDACIÓN

- Futuras investigaciones podrían profundizar en la caracterización físico-química de las raíces de yacón según su procedencia, para identificar con mayor precisión los atributos que explican las diferencias observadas en los tratamientos de secado.
- Estudiar la influencia de la velocidad del aire en secado convectivo
- Estudiar el impacto del secado en el contenido de FOS, para garantizar que las propiedades funcionales se mantengan tras la deshidratación.
- Estudiar si la solubilidad está condicionada al contenido de FOS
- Mejorar el análisis de solubilidad aplicando técnicas avanzadas, como la molturación con nitrógeno líquido.



VI. REFERENCIAS

- Aguilera, J. M., & Stanley, D. W. (1999). *Microstructural principles of food processing and engineering*. Springer Science & Business Media (Second).
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nIeJiL_dLeQC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Aguilera,+J.+M.,+%26+Stanley,+D.+W.+\(1999\).+Microstructural+principles+of+food+processing+and+engineering.+Springer+Science+%26+Business+Media.&ots=q0QiHLA8Rb&sig=b7dR_fN9y0tWY9AqyXRVUUpGtFc#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nIeJiL_dLeQC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Aguilera,+J.+M.,+%26+Stanley,+D.+W.+(1999).+Microstructural+principles+of+food+processing+and+engineering.+Springer+Science+%26+Business+Media.&ots=q0QiHLA8Rb&sig=b7dR_fN9y0tWY9AqyXRVUUpGtFc#v=onepage&q&f=false)
- Arias, L., Perea, Y., & Zapata, J. E. (2017). Cinética de la Transferencia de Masa en la Deshidratación Osmótica de Mango (*Mangifera indica* L.) var. Tommy Atkins en Función de la Temperatura. *Información Tecnológica*, 28(3), 47–58.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300006>
- Bernstein, A., & Noreña, C. P. Z. (2014). Study of Thermodynamic, Structural, and Quality Properties of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) During Drying. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 148–160. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1027-y>
- Carvalho, G. R., Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2020). Drying Accelerators to Enhance Processing and Properties: Ethanol, Isopropanol, Acetone and Acetic Acid as Pre-treatments to Convective Drying of Pumpkin. *Food and Bioprocess Technology*, 13(11), 1984–1996. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02542-6>
- Castro, A., Caballero, M., Herbas, A., & Carballo, S. (2012). Antioxidants in yacon products and effect of long term storage. *Food Science and Technology*, 32(3), 432–435. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612012005000064>
- Chirinos Gallardo, R. S. (1999). Obtención y caracterización de los Oligofructanos a partir de la raíz del Yacón (*Smallanthus sonchifolia* Poepp. & Endl.). [Tesis para optar el grado de Magister]. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).
- Choi, J. E., & Lee, J. H. (2018). Moisture sorption isotherms of fresh and blanched yacon tuber flours. *Korean Journal of Food Preservation*, 25(6), 627–633.
<https://doi.org/10.11002/kjfp.2018.25.6.627>
- Choque Delgado, G. T., da Silva Cunha Tamashiro, W. M., Maróstica Junior, M. R., & Pastore, G. M. (2013). Yacon (*Smallanthus sonchifolius*): A Functional Food. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68(3), 222–228. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0362-0>
- De Los Santos Pazos, L. G., Chávez Novoa, D., Vega Anticona, A., Linares, G., Sánchez-González, J., Miano, A. C., & Rojas, M. L. (2021). Cut Orientation And Drying Temperature Effect On Drying And Rehydration Kinetics Of Yacon (*Smallanthus Sonchifolius*). *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Prospective and Trends in Technology and Skills for Sustainable Social Development” “Leveraging Emerging Technologies to Construct the Future.”*
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.48>



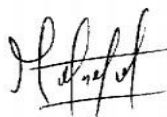
- Doymaz, I. (2005). Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 275–279. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.08.019>
- Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. N., & Masson, M. L. (2016). Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.009>
- Fuchigami, M., Hyakumoto, N., & Miyazaki, K. (1995). Programmed Freezing Affects Texture, Pectic Composition and Electron Microscopic Structures of Carrots. *Journal of Food Science*, 60(1), 137–141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb05623.x>
- Gamonal Castillo, Z., & Olivares Muñoz, S. V. (2020). Obtención de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) en almíbar a diferentes formas de troceado y concentraciones de esteviosido. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2(2), 21. <https://doi.org/10.25127/ucni.v2i2.512>
- Gonzalez, J. J., Valle, R. C., Bobroff, S., Biasi, W. V., Mitcham, E. J., & McCarthy, M. J. (2001). Detection and monitoring of internal browning development in ‘Fuji’ apples using MRI. *Postharvest Biology and Technology*, 22(2), 179–188. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00183-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00183-6)
- Graefe, S., Hermann, M., Manrique, I., Golombek, S., & Buerkert, A. (2004). Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. *Field Crops Research*, 86(2–3), 157–165. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2003.08.003>
- Grau, A. (1997). Ahipa, la legumbre tuberosa de los Andes. *Ciencia Hoy*, 7(42), 31–38. <https://cienciahoy.org.ar/ch/hoy42/ahipa1.htm>
- Hernando, I., Sanjuán, N., Pérez-Munuera, I., & Mulet, A. (2008). Rehydration of Freeze-Dried and Convective Dried *Boletus edulis* Mushrooms: Effect on Some Quality Parameters. *Journal of Food Science*, 73(8). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00913.x>
- Jiang, R., & Murthy, D. N. P. (2011). A study of Weibull shape parameter: Properties and significance. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(12), 1619–1626. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.09.003>
- Jiménez-Guzmán, J., Leyva-Daniel, D. E., Camacho-Díaz, B. H., Jimenez-Aparicio, A. R., & Alamilla-Beltrán, L. (2016). Spray Drying of Xoconostle Juice: Interaction of Microstructure, Function, and Drying Operation Conditions. In *Sustainable Drying Technologies*. InTech. <https://doi.org/10.5772/63723>
- Lapčíková, B., Lapčík, L., Valenta, T., Majar, P., & Ondroušková, K. (2021). Effect of the rice flour particle size and variety type on water holding capacity and water diffusivity in aqueous dispersions. *LWT*, 142, 111082. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111082>
- León-Roque, N., Aguilar-Tuesta, S., Quispe-Neyra, J., Mamani-Navarro, W., Alfaro-





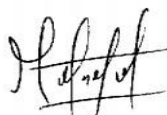
- Cruz, S., & Condezo-Hoyos, L. (2019). A green analytical assay for the quantitation of the total saponins in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) based on macro lens-coupled smartphone. *Talanta*, 204, 576–585.
<https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2019.06.014>
- Lock, O., Perez, E., Villar, M., Flores, D., & Rojas, R. (2016). Bioactive Compounds from Plants Used in Peruvian Traditional Medicine.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27169179/>
- López-Mata, F. A., Valencia-López, J. J., & Medina-Torres, L. (2016). Modelado de la Transferencia de Calor en el Tratamiento Térmico de Productos Enlatados. *Información Tecnológica*, 27(6), 85–94. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000600009>
- Lopez-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P. J., Norton, I. T., & Bakalis, S. (2020). Model discrimination for drying and rehydration kinetics of freeze-dried tomatoes. *Journal of Food Process Engineering*, 43(5). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13192>
- Maldonado, S., Santapaola, J. E., Singh, J., Torrez, M., & Garay, A. (2008). Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(1), 251–256.
<https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000100036>
- Marques, B. C., Plana-Fattori, A., Flick, D., & Tadini, C. C. (2022). Convective drying of yacón (*Smallanthus sonchifolius*) slices: A simple physical model including shrinkage. *LWT*, 159, 113151. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113151>
- Mendoza, F., & Lu, R. (2015). Basics of Image Analysis. In *Food Engineering Series* (pp. 9–56). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2836-1_2
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2018). The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 352–370. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12328>
- Mollazade, K. (2017). Non-destructive Identifying Level of Browning Development in Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Using Hyperspectral Imaging Associated with Chemometrics. *Food Analytical Methods*, 10(8), 2743–2754.
<https://doi.org/10.1007/s12161-017-0845-y>
- Mondragón, R., Julia, J. E., Barba, A., & Jarque, J. C. (2013). El proceso de secado por atomización: Formación de gránulos y cinética de secado de gotas. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(4), 159–168.
<https://doi.org/10.3989/cyv.212013>
- Mulet, A., Garcia-Reverter, J., Bon, J., & Berna, A. (2000). Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*, 18(6), 1201–1219.
<https://doi.org/10.1080/07373930008917772>
- Noshad, M., & Ghasemi, P. (2020). Influence of freezing pretreatments on kinetics of convective air-drying and quality of grapes. *Food Bioscience*, 38, 100763.

- <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100763>
- Oliveira, L. F., Corrêa, J. L. G., Silveira, P. G., Vilela, M. B., & Junqueira, J. R. de J. (2021). Drying of 'yacon' pretreated by pulsed vacuum osmotic dehydration. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(8), 560–565. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p560-565>
- Ong, K. S. (1999). Solar dryers in the Asia-Pacific region. *Renewable Energy*, 16(1–4), 779–784. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00279-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00279-1)
- Page, G. E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers. Purdue University.
- Pathak, S. S., Sonawane, A., Srinivas, A., & Pradhan, R. C. (2021). Application of Image Analysis for Detecting the Browning of Unripe Banana Slices. *ACS Food Science & Technology*, 1(9), 1507–1513. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00193>
- Pedreschi, R., Campos, D., Noratto, G., Chirinos, R., & Cisneros-Zevallos, L. (2003). Andean Yacon Root (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. Endl) Fructooligosaccharides as a Potential Novel Source of Prebiotics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(18), 5278–5284. <https://doi.org/10.1021/jf0344744>
- Peleg, M. (1979). Characterization of the stress relaxation curves of solid foods. *Journal of Food Science*, 44(1), 277–281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1979.tb10062.x>
- Perussello, C., Kumar Chandan, F. D. C., & Karim, M. A. (2014). Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.020>
- Quaresma, M. A. L., Oliveira, Fabio. L. D., Parajara, M. D. C., Silva, D. M. N. D., Dalvi, L. P., & Teixeira, A. D. G. (2020). Refrigerated storage period of Rhizophores for Yacon propagation. *Bioscience Journal*, 36, 301–306. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1357531>
- Quevedo, R., Díaz, O., Valencia, E., Pedreschi, F., Bastias, J. M., & Siche, R. (2016). Differences Between the Order Model and the Weibull Model in the Modeling of the Enzymatic Browning. *Food and Bioprocess Technology*, 9(11), 1961–1967. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1775-1>
- Quevedo, R., Pedreschi, F., Valencia, E., Díaz, O., Bastías, J., & Muñoz, O. (2018). Kinetic modeling of deterioration of frozen industrial burgers based on oxidative rancidity and color. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(7), e13655. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13655>
- Reis, F. R. (2011). Secagem a vácuo de yacon: influência das condições de processo sobre parâmetros de qualidade e cinética de secagem . <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/26840>
- Reis, F. R., Marques, C., Moraes, A. C. S. de, & Masson, M. L. (2021). Effect of processing methods on yacon roots health-promoting compounds and related



- properties. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 346–354.
<https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.05.010>
- Rodríguez Alzamora, R. J. (2017). *Fundamentos de Química General*.
https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/4271/1/Fundamentos%20de%20Química%20General_Disoluciones%2C%20propiedades%20coligativas%20y%20gases%20ideales.pdf
- Rojas, M. L., & Augusto, P. E. D. (2018). Microstructure elements affect the mass transfer in foods: The case of convective drying and rehydration of pumpkin. *LWT*, 93, 102–108. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.03.031>
- Rojas, M. L., Augusto, P. E. D., & Cárcel, J. A. (2020). Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 61, 102328. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102328>
- Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2019). Improving the infrared drying and rehydration of potato slices using simple approaches: Perforations and ethanol. *Journal of Food Process Engineering*, 42(5). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13089>
- Salinas, J. G., Alvarado, J. A., Bergenstahl, B., & Tornberg, E. (2018). The influence of convection drying on the physicochemical properties of yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Heat and Mass Transfer*, 54(10), 2951–2961.
<https://doi.org/10.1007/s00231-018-2334-2>
- Santos, K. C., Guedes, J. S., Rojas, M. L., Carvalho, G. R., & Augusto, P. E. D. (2021). Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105304.
<https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2020.105304>
- Scher, C. F., Brandelli, A., & Noreña, C. Z. (2015). Yacon inulin leaching during hot water blanching. *Ciência e Agrotecnologia*, 39(5), 523–529.
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542015000500011>
- Scher, C. F., de Oliveira Rios, A., & Noreña, C. P. Z. (2009). Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(11), 2169–2175.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02056.x>
- Silva, M. de F. G. da, Dionísio, A. P., Abreu, F. A. P. de, Pinto, C. O., Silva, L. M. A. e, de Brito, E. S., Wurlitzer, N. J., Lima, A. C. V. de, Rodrigues, S., Gomes, W. F., & Pontes, D. F. (2018). Optimization of enzymatic treatment to produce yacon juice clarified by microfiltration with high levels of chlorogenic acid and fructooligosaccharides. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(6), e13641.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.13641>
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 323–328. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.03.025>

- Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., & Almonacid, S. (2017). Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 194–201. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2017.01.003>
- Vallejos, C., & Rojas, M. (2021). Evaluación morfológica de yacón procedente de dos zonas agroecológicas de La Libertad. *Revista de Investigación Agraria*, 22(2), 32–42.
- Velasco, R. J., Luna, W. A., Mera, J. A., & Villada, H. S. (2008). Producción de Dextrinas a partir de Almidón Nativo de Yuca por Ruta Seca en una Agroindustria Rural. *Información Tecnológica*, 19(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642008000200003>
- Vergeldt, F. J., van Dalen, G., Duijster, A. J., Voda, A., Khalloufi, S., van Vliet, L. J., Van As, H., van Duynhoven, J. P. M., & van der Sman, R. G. M. (2014). Rehydration kinetics of freeze-dried carrots. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 24, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.12.002>
- Zhang, J., Zheng, X., Xiao, H., Li, Y., & Yang, T. (2023). Effect of Combined Infrared Hot Air Drying on Yam Slices: Drying Kinetics, Energy Consumption, Microstructure, and Nutrient Composition. *Foods*, 12(16), 3048. <https://doi.org/10.3390/foods12163048>



AGRADECIMIENTO

En primer lugar, queremos expresar nuestra gratitud a Dios, quien nos ha iluminado y fortalecido en cada etapa de este proyecto. Su guía ha sido fundamental para superar los desafíos y alcanzar este logro, que dedicamos con humildad y agradecimiento a su infinita bondad.

A nuestras familias, gracias por ser nuestro refugio y pilar durante este proceso. Sus palabras de aliento, amor incondicional y apoyo constante fueron fundamentales para mantenernos enfocados y motivados. Este logro es también de ustedes, por haber estado siempre a nuestro lado, en los momentos de alegría y en los más desafiantes.

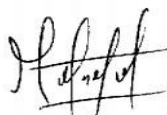
A nuestro asesor, el Dr. (c) James Euler Villar Estrada, le extendemos nuestro más sincero agradecimiento por su paciencia, orientación y dedicación. Su orientación no solo enriqueció este trabajo, sino que también marcó un impacto significativo en nuestro crecimiento académico y personal. Su confianza en nosotros y su incansable apoyo fueron clave para culminar este proyecto con éxito.

Al Dr. Dario Rios, muchas gracias por brindarnos su colaboración y apoyo en momentos clave del desarrollo de esta tesis.

A la Ing. Juanita, gracias por su ayuda en el laboratorio. Su conocimiento, disposición y apoyo fueron fundamentales para el desarrollo experimental de nuestra tesis. Gracias por su paciencia y por siempre estar dispuesta a colaborar.

Finalmente, queremos agradecer a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de esta tesis. A nuestros amigos, compañeros de estudio y colaboradores, su ayuda, ideas y ánimos fueron un valioso aporte para este resultado. Cada gesto, por pequeño que pareciera, marcó una gran diferencia.

Gracias a todos por ser parte de este importante capítulo en nuestras vidas.



DEDICATORIA

A Dios, por guiarme y fortalecerme en cada etapa de esta travesía académica, gracias por darme la fuerza para perseverar y obtener este logro académico.

A mis amados padres Doris y Julio, gracias por cada sacrificio que han hecho, los días de trabajo duro, dedicación y esfuerzo constante para asegurarme una buena educación son la base de mi éxito, es imposible de expresar completamente la gratitud y admiración que tengo por ustedes. Les dedico esta tesis con todo mi amor, porque más que un trabajo académico, esto es el reflejo de las enseñanzas y valores que me han inculcado. Me llena de orgullo honrarlos de esta manera, siento una gran admiración por ustedes. Gracias por ser los mejores padres, los amo profundamente. A mi hermana mayor Milena y a mi pequeña hermanita Valentina, gracias por ayudarme a sobrellevar esta travesía de la mejor manera, gracias por su alegría y por su amor constante, las amo mucho. A mis queridos abuelitos Floriza y demetrio, gracias por siempre alentarme y darme los mejores ánimos para seguir adelante con mis estudios, agradecida por su amor, por su compañía diaria en mi vida, los amo mucho amada familia.

Lucia de los Angeles Vargas Alarcón

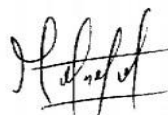
A Dios, mi roca eterna, quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy.

A mis queridos padres, por ser los pilares fundamentales en mi crecimiento, mi ejemplo a seguir, por siempre regalarme su amor, paciencia, confianza y apoyo incondicional en cada uno de los proyectos en mi vida. Este logro es un testimonio de su inmenso amor y dedicación, quienes a lo largo de sus vidas me han inculcado la cultura del trabajo y valentía. Su dedicación y esfuerzo constante para asegurarme una educación son un regalo que valoro más allá de las palabras. Esta tesis es un tributo a su legado y a la eterna admiración que siento por ustedes los amo. Para mis tres increíbles hermanas: Ros, Samy y Valentina gracias por enseñarme que la vida es más divertida cuando hay compañía, son el pilar de mi vida y un gran motor para poder cumplir mis metas trazadas. A las iniciales D,I,,R,E,R,C gracias por siempre estar en cada paso que doy, sin sus consejos, su amor, su confianza nada hubiera sido posible. ¡Este logro es de ustedes también!

IN MEMORIAM

En honor a mi abuela Valentina, mi fuente de inspiración y sabiduría. Aunque ya no estes físicamente conmigo, tu espíritu y amor continúan guiándome en cada paso de este camino.

Milagros Guadalupe Gutiérrez Cervantes



ANEXOS

Anexo 01: Coeficientes del modelo de Page en el secado

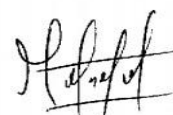
Análisis de varianza para k - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	0,002189	1	0,002189	3139,728	0,000000
Tipo	0,001194	3	0,000398	570,535	0,000000
Origen	0,000103	1	0,000103	148,160	0,000000
Tipo*origen	0,000137	3	0,000046	65,483	0,000000
Error	0,000008	11	0,000001		
Total	0,001646	18			

Pruebas de múltiple rangos para k por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable k (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00000, df = 11,000						
	tipo	origen	k	1	2	3	4
			Mean				
4	S	2	0,000485	****			
3	S	1	0,000535	****			
2	C	2	0,005531		****		
1	C	1	0,007157		****		
8	R	2	0,007914		****		
7	R	1	0,021474			****	
6	F	2	0,021926			****	
5	F	1	0,026591				****


Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

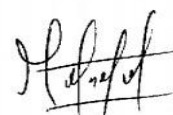
trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
S1	3	0,000544082	X
C1	3	0,0071153	X
R1	3	0,0214738	X
F1	3	0,0265116	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
S2	3	0,000484658	X
C2	3	0,00553074	X
R2	3	0,00791445	X
F2	3	0,0219614	X

Análisis de varianza para n - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	16,68290	1	16,68290	100154,9	0,000000
Tipo	0,68763	3	0,22921	1376,1	0,000000
Origen	0,02243	1	0,02243	134,6	0,000000
Tipo*origen	0,02555	3	0,00852	51,1	0,000001
Error	0,00183	11	0,00017		
Total	0,87843	18			


Pruebas de múltiple rangos para n por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

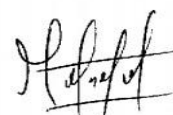
Cell No.	Tukey HSD test; variable n (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00017, df = 11,000						
	tipo	origen	n	1	2	3	4
			Mean				
5	F	1	0,736726	****			
6	F	2	0,771256	****			
7	R	1	0,772153	****			
8	R	2	0,958444		****		
1	C	1	0,993425		****		
2	C	2	1,082770			****	
4	S	2	1,332607				****
3	S	1	1,349563				****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	3	0,730518	X
R1	3	0,772153	X
C1	3	0,991802	X
S1	3	1,35714	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F2	3	0,769797	X
R2	3	0,958444	X
C2	3	1,08277	X
S2	3	1,33261	X


Anexo 02: Coeficientes del modelo de Peleg en la rehidratación

Análisis de varianza para k1 - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	2706,837	1	2706,837	5151,776	0,000000
Tipo	159,101	3	53,034	100,936	0,000000
Origen	6,224	1	6,224	11,845	0,005508
tipo*origen	259,193	3	86,398	164,436	0,000000
Error	5,780	11	0,525		
Total	414,205	18			

Pruebas de múltiple rangos para k1 por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

**Tukey HSD test; variable k1 (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups,
Cell alpha = ,05000 Error: Between MS = ,52542, df = 11,000**

No.

	Tipo	Origen	k1	1	2	3	4	5
			Mean					
3	S	1	5,52793	****				
2	C	2	7,62158	****				
8	R	2	10,86569		****			
5	F	1	11,89017		****	****		
1	C	1	12,18038		****	****		
4	S	2	13,40326			****		
7	R	1	18,89114				****	
6	F	2	21,48354					****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

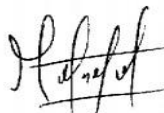
Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
S1	3	6,02171	X
F1	2	11,8902	X
C1	3	12,0643	X
R1	3	18,8911	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	7,62158	X
R2	3	10,8657	X
S2	3	13,4033	X
F2	2	21,4835	X

Análisis de varianza para k2 - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	0,213919	1	0,213919	6707,730	0,000000
Tipo	0,003168	3	0,001056	33,107	0,000008
Origen	0,001449	1	0,001449	45,435	0,000032
tipo*origen	0,004932	3	0,001644	51,551	0,000001
Error	0,000351	11	0,000032		
Total	0,009831	18			


Pruebas de múltiple rangos para k2 por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable k2 (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00003, df = 11,000							
	Tipo	Origen	k2	1	2	3	4	5
			Mean					
3	S	1	0,078214	****				
8	R	2	0,088819	****				
6	F	2	0,098253	****	****			
2	C	2	0,106016		****	****		
7	R	1	0,120034			****	****	
4	S	2	0,122422			****	****	
5	F	1	0,128430				****	
1	C	1	0,163361					****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
S1	3	0,0871745	X
R1	3	0,120034	X
F1	2	0,12843	X
C1	3	0,159184	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
R2	3	0,088819	X
F2	2	0,0982533	XX
C2	3	0,106016	XX
S2	3	0,122422	X

Anexo 03: Coeficientes del modelo de Weibull en la “intensidad de escala de grises” durante el secado

Análisis de varianza para k_GS - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	0,061285	1	0,061285	2552,729	0,000000
Tipo	0,145842	3	0,048614	2024,922	0,000000
Origen	0,046614	1	0,046614	1941,622	0,000000
tipo*origen	0,139027	3	0,046342	1930,304	0,000000
Error	0,000264	11	0,000024		
Total	0,328490	18			

Pruebas de múltiple rangos para k_GS por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable k-ws-g (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00002, df = 11,000						
	Tipo	Origen	k-ws-g Mean	1	2	3	4
5	F	1	-0,435262				****
2	C	2	-0,017851			****	
6	F	2	-0,011601		****	****	
7	R	1	-0,008979		****	****	
1	C	1	-0,008561		****	****	
4	S	2	-0,001536		****		
3	S	1	-0,000902	****	****		
8	R	2	-0,000001	****			

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

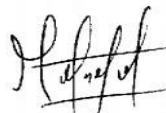
Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	2	-0,435262	X
R1	3	-0,00897851	X
C1	3	-0,00864375	X
S1	2	-0,000898123	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	-0,017851	X
F2	3	-0,0115948	X
S2	3	-0,00153615	X
R2	3	-0,00000105777	X

Análisis de varianza para n_GS - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	10,43746	1	10,43746	47978,23	0,000000
Tipo	2,29844	3	0,76615	3521,77	0,000000
Origen	0,63577	1	0,63577	2922,47	0,000000
tipo*origen	1,73363	3	0,57788	2656,35	0,000000
Error	0,00239	11	0,00022		
Total	5,19638	18			


Pruebas de múltiple rangos para n_GS por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable n-ws-g (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00022, df = 11,000									
	Tipo	Origen	n-ws-g	1	2	3	4	5	6	7
			Mean							
5	F	1	0,135169	****						
2	C	2	0,492311		****					
7	R	1	0,565186			****				
6	F	2	0,583690			****	****			
1	C	1	0,615464				****			
4	S	2	0,981936					****		
3	S	1	1,066301						****	
8	R	2	1,885309							****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	2	0,135169	X
R1	3	0,565186	X
C1	3	0,623193	X
S1	2	1,0755	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	0,492311	X
F2	3	0,583449	X
S2	3	0,981936	X
R2	3	1,88531	X

Anexo 04: Coeficientes del modelo de Weibull en el “área proyectada” durante el secado

Análisis de varianza para k_A - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	0,000344	1	0,000344	6375,437	0,000000
Tipo	0,000304	3	0,000101	1879,624	0,000000
Origen	0,000167	1	0,000167	3105,284	0,000000
tipo*origen	0,000369	3	0,000123	2281,612	0,000000
Error	0,000001	11	0,000000		
Total	0,000852	18			

Pruebas de múltiple rangos para k_A por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable k-ws-a (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00000, df = 11,000						
	Tipo	origen	k-ws-a	1	2	3	4
			Mean				
5	F	1	-0,022938				****
2	C	2	-0,004961			****	
1	C	1	-0,004282			****	
7	R	1	-0,003034		****		
3	S	1	-0,000567	****			
6	F	2	-0,000267	****			
8	R	2	-0,000254	****			
4	S	2	-0,000001	****			

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

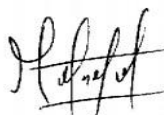
Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	3	-0,023612	X
C1	2	-0,00428171	X
R1	3	-0,0030339	X
S1	3	-0,000545438	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	-0,00496139	X
F2	3	-0,000272562	X
R2	3	-0,000254098	X
S2	3	-7,37E-7	X

Análisis de varianza para n_A - suma de cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	24,07333	1	24,07333	348739,1	0,000000
Tipo	1,20186	3	0,40062	5803,6	0,000000
Origen	1,21223	1	1,21223	17561,1	0,000000
tipo*origen	0,67675	3	0,22558	3267,9	0,000000
Error	0,00076	11	0,00007		
Total	4,49400	18			



Pruebas de múltiple rangos para n_A por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable n-ws-a (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00007, df = 11,000									
	Tipo	origen	n-ws-a	1	2	3	4	5	6	7
			Mean							
5	F	1	0,647994	****						
2	C	2	0,902068		****					
7	R	1	0,955778			****				
1	C	1	0,965427			****				
3	S	1	1,156120				****			
6	F	2	1,357740					****		
8	R	2	1,388606						****	
4	S	2	2,232572							****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	3	0,649725	X
R1	3	0,955778	X
C1	2	0,965427	X
S1	3	1,15836	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	-0,00670024	X
R2	3	-0,0000638275	X
S2	3	-0,00000128805	X
F2	3	-1,62667E-7	X

Anexo 05: Coeficientes del modelo de Weibull en el “perímetro proyectado” durante el secado

Análisis de varianza para k_P - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	0,000376	1	0,000376	10574,55	0,000000
Tipo	0,000142	3	0,000047	1332,14	0,000000
Origen	0,000156	1	0,000156	4380,06	0,000000
tipo*origen	0,000193	3	0,000064	1813,73	0,000000
Error	0,000000	11	0,000000		
Total	0,000490	18			

Pruebas de múltiple rangos para k_P por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable k-ws-p (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00000, df = 11,000							
	Tipo	Origen	k-ws-p Mean	1	2	3	4	5
5	F	1	-0,016673					****
2	C	2	-0,006700				****	
3	S	1	-0,006597				****	
1	C	1	-0,005613			****		
7	R	1	-0,002317		****			
8	R	2	-0,000064	****				
4	S	2	-0,000001	****				
6	F	2	-0,000000	****				

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

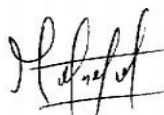
Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	3	-0,0168588	X
S1	3	-0,00649234	X
C1	3	-0,00576085	X
R1	3	-0,00231672	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	0,674275	X
R2	3	1,45546	X
S2	3	2,00646	X
F2	3	2,42656	X

Análisis de varianza para n_P - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	22,44962	1	22,44962	138120,6	0,000000
Tipo	1,47388	3	0,49129	3022,7	0,000000
Origen	3,83320	1	3,83320	23583,7	0,000000
tipo*origen	2,34300	3	0,78100	4805,1	0,000000
Error	0,00179	11	0,00016		
Total	7,96446	18			


Pruebas de múltiple rangos para n_P por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable n-ws-p (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00016, df = 11,000										
	Tipo	Origen	n-ws-p	Mean	1	2	3	4	5	6	7
5	F	1	0,556514	****							
3	S	1	0,586595	****							
2	C	2	0,674275			****					
1	C	1	0,731181				****				
7	R	1	0,847419					****			
8	R	2	1,455461						****		
4	S	2	2,006464							****	
6	F	2	2,418777								****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	3	0,557962	X
S1	3	0,568206	X
C1	3	0,729293	X
R1	3	0,847419	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F2	3	0,557962	X
S2	3	0,568206	X
C2	3	0,729293	X
R2	3	0,847419	X

Anexo 06: Coeficientes del modelo de Weibull en el “área proyectada” durante la rehidratación

Análisis de varianza para k_A - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	0,367208	1	0,367208	8966,423	0,000000
Tipo	0,142014	3	0,047338	1155,893	0,000000
Origen	0,034458	1	0,034458	841,390	0,000000
tipo*origen	0,015744	3	0,005248	128,148	0,000000
Error	0,000450	11	0,000041		
Total	0,216610	18			

Pruebas de múltiple rangos para k_A por trat

Cell No.	Tukey HSD test; variable k-wr-a (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00004, df = 11,000						
	Tipo	Origen	k-wr-a Mean	1	2	3	4
6	F	2	0,010047	****			
5	F	1	0,013152	****			
7	R	1	0,072721		****		
3	S	1	0,099010		****		
8	R	2	0,221245			****	
1	C	1	0,226615			****	
4	S	2	0,238656			****	
2	C	2	0,304991				****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

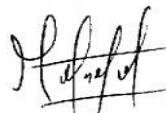
Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	3	0,0131235	X
R1	3	0,0727207	X
S1	2	0,0997587	X
C1	3	0,222934	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F2	3	0,0100111	X
R2	3	0,221245	X
S2	3	0,238656	X
C2	3	0,304991	X

Análisis de varianza para n_A - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	3,060985	1	3,060985	23717,01	0,000000
Tipo	0,790626	3	0,263542	2041,97	0,000000
Origen	0,030295	1	0,030295	234,73	0,000000
tipo*origen	0,024971	3	0,008324	64,49	0,000000
Error	0,001420	11	0,000129		
Total	0,911940	18			



Pruebas de múltiple rangos para n_A por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable n-wr-a (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00013, df = 11,000							
	Tipo	Origen	n-wr-a	1	2	3	4	5
			Mean					
2	C	2	0,201860	****				
4	S	2	0,251238		****			
8	R	2	0,271668		****			
1	C	1	0,285176		****			
3	S	1	0,373138			****		
7	R	1	0,439800				****	
5	F	1	0,785007					****
6	F	2	0,817573					****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C1	3	0,292448	X
S1	2	0,367745	X
R1	3	0,4398	X
F1	3	0,783576	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	0,20186	X
S2	3	0,251238	X
R2	3	0,271668	X
F2	3	0,819146	X

Anexo 07: Coeficientes del modelo de Weibull en el “perímetro” durante la rehidratación

Análisis de varianza para k_P - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	0,028605	1	0,028605	4191,539	0,000000
Tipo	0,011865	3	0,003955	579,541	0,000000
Origen	0,010074	1	0,010074	1476,153	0,000000
tipo*origen	0,003517	3	0,001172	171,789	0,000000
Error	0,000075	11	0,000007		
Total	0,028191	18			

Pruebas de múltiple rangos para k_P por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable k-wr-p (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00001, df = 11,000							
	Tipo	Origen	k-wr-p Mean	1	2	3	4	5
6	F	2	0,001150	****				
5	F	1	0,001330	****				
3	S	1	0,002963	****				
1	C	1	0,030453		****			
7	R	1	0,032567		****			
4	S	2	0,068940			****		
8	R	2	0,088082				****	
2	C	2	0,105653					****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

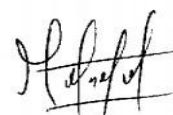
Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F1	3	0,00135629	X
S1	3	0,00314115	X
C1	3	0,0301353	X
R1	3	0,0325669	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
F2	3	0,00121145	X
S2	3	0,0689403	X
R2	3	0,0880825	X
C2	3	0,105653	X

Análisis de varianza para n_P - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	5,151402	1	5,151402	76522,48	0,000000
Tipo	1,371708	3	0,457236	6792,10	0,000000
Origen	0,205125	1	0,205125	3047,06	0,000000
tipo*origen	0,092197	3	0,030732	456,52	0,000000
Error	0,000741	11	0,000067		
Total	1,735084	18			


Pruebas de múltiple rangos para n_P por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable n-wr-p (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00007, df = 11,000								
	tipo	origen	n-wr-p	1	2	3	4	5	6
			Mean						
2	C	2	0,195048	****					
8	R	2	0,251754		****				
4	S	2	0,310743			****			
7	R	1	0,437002				****		
1	C	1	0,448617				****		
3	S	1	0,761876					****	
5	F	1	1,017758						****
6	F	2	1,020967						****

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
R1	3	0,437002	X
C1	3	0,452382	X
S1	3	0,772379	X
F1	3	1,01925	X

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Trat	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C2	3	0,195048	X
R2	3	0,251754	X
S2	3	0,310743	X
F2	3	1,02214	X

Análisis de varianza para solubilidad - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Intercept	29669,31	1	29669,31	3132,080	0,000000
Tipo	138,69	3	46,23	4,880	0,021415
Origen	31,12	1	31,12	3,285	0,097269
tipo*origen	28,22	3	9,41	0,993	0,431861
Error	104,20	11	29669,31	3132,080	0,000000
Total	289,17	18			

Pruebas de múltiple rangos para solubilidad por trat

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Cell No.	Tukey HSD test; variable solubilidad (Spreadsheet1_(Recovered)) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 9,4727, df = 11,000				
	Tipo	Solubilidad Mean	1	2	
1	C	38,31690	****		
3	F	40,40617	****		****
4	R	42,38625	****		****
2	S	45,82240			****

Anexo 8: Galería fotográfica

Figura 10

Refrigeración y congelación de yacón



Figura 11

Descongelamiento y pelado del yacón



Figura 12

Rebanado y cortado del yacón



Figura 13

Secado convectivo 60°C de las muestras de yacón (primera repetición)

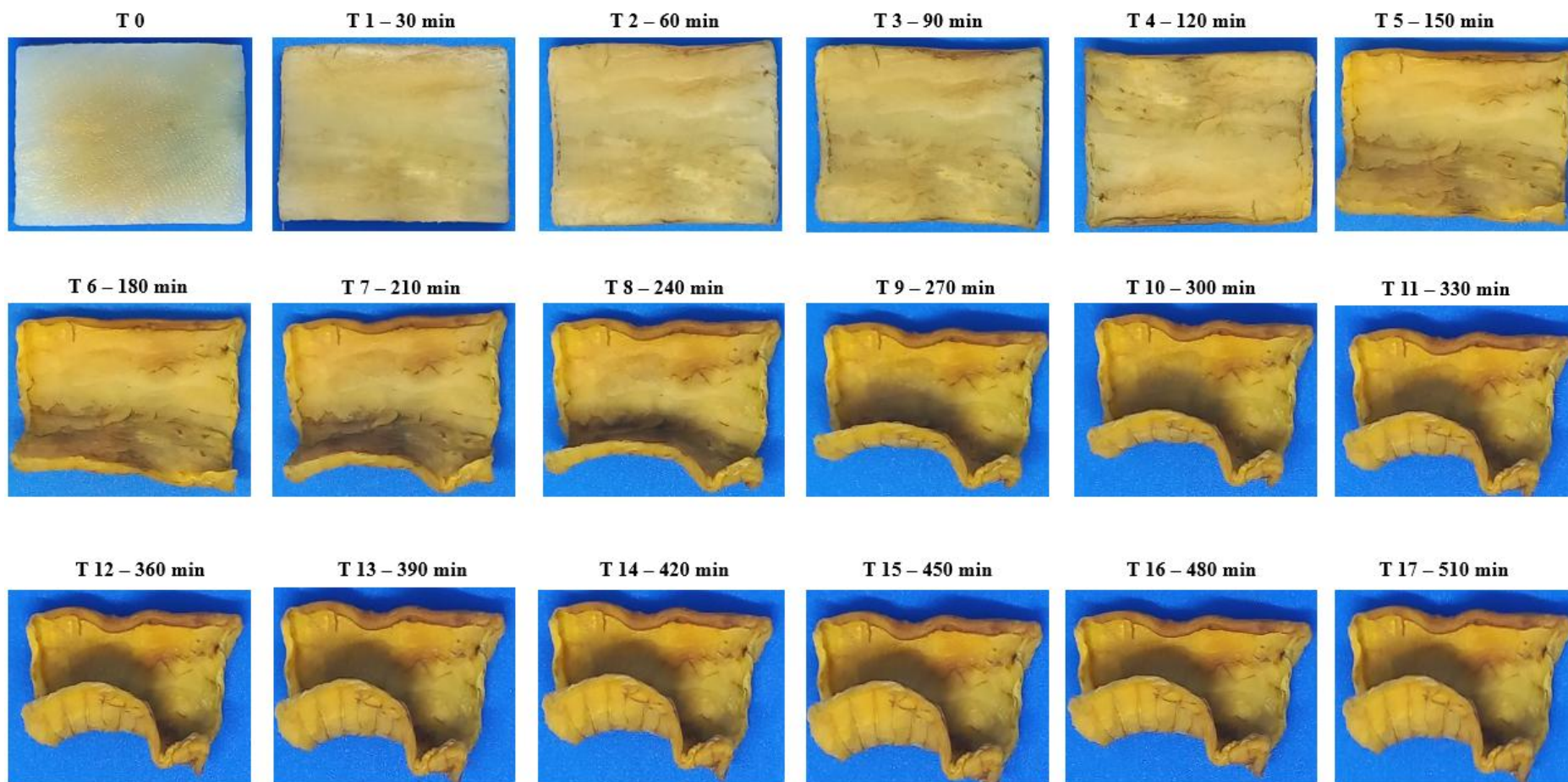


Figura 14

Rehidratación de las muestras del secado convectivo 60°C (primera repetición)

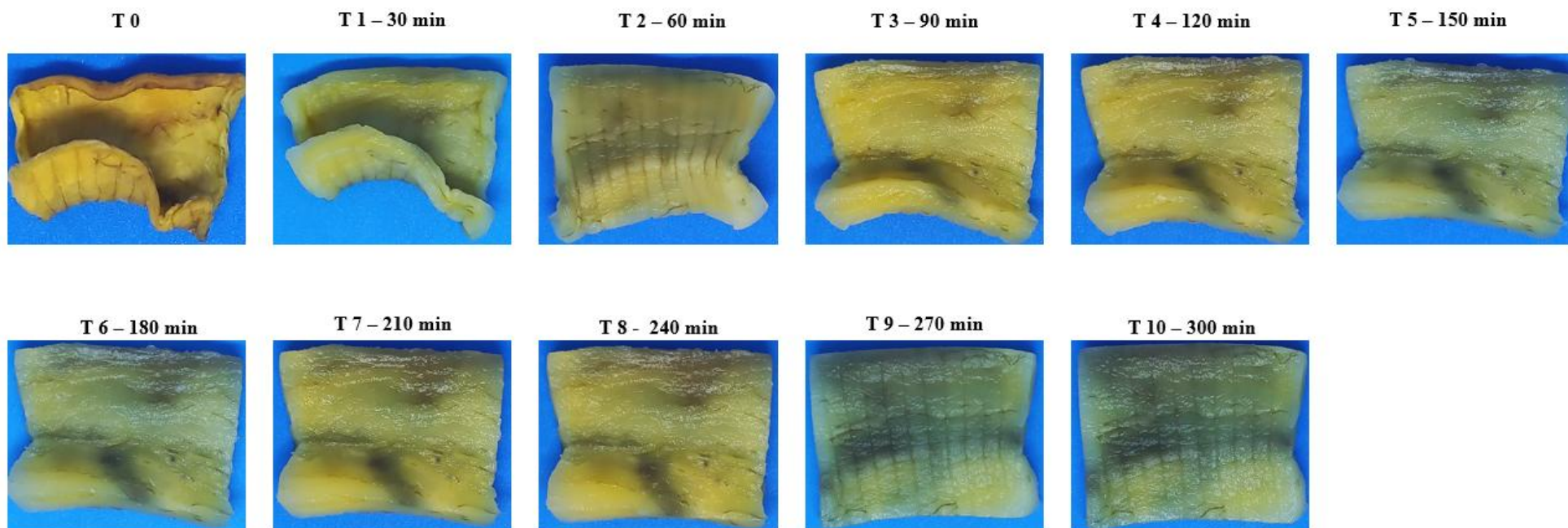


Figura 15

Secado convectivo + refrigeración de las muestras de yacón (primera repetición)

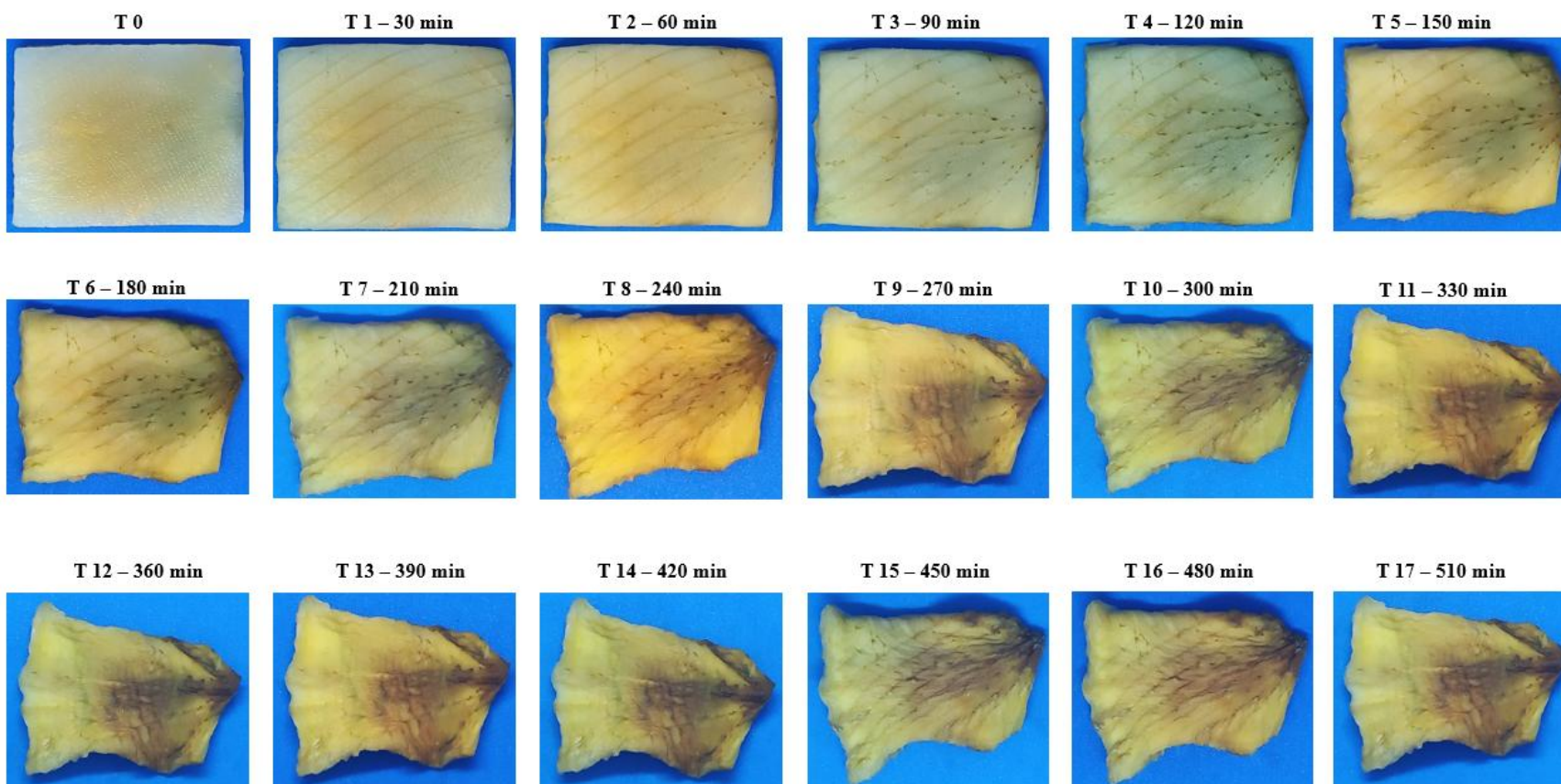


Figura 16

Rehidratación de las muestras del secado convectivo + refrigeración (primera repetición)

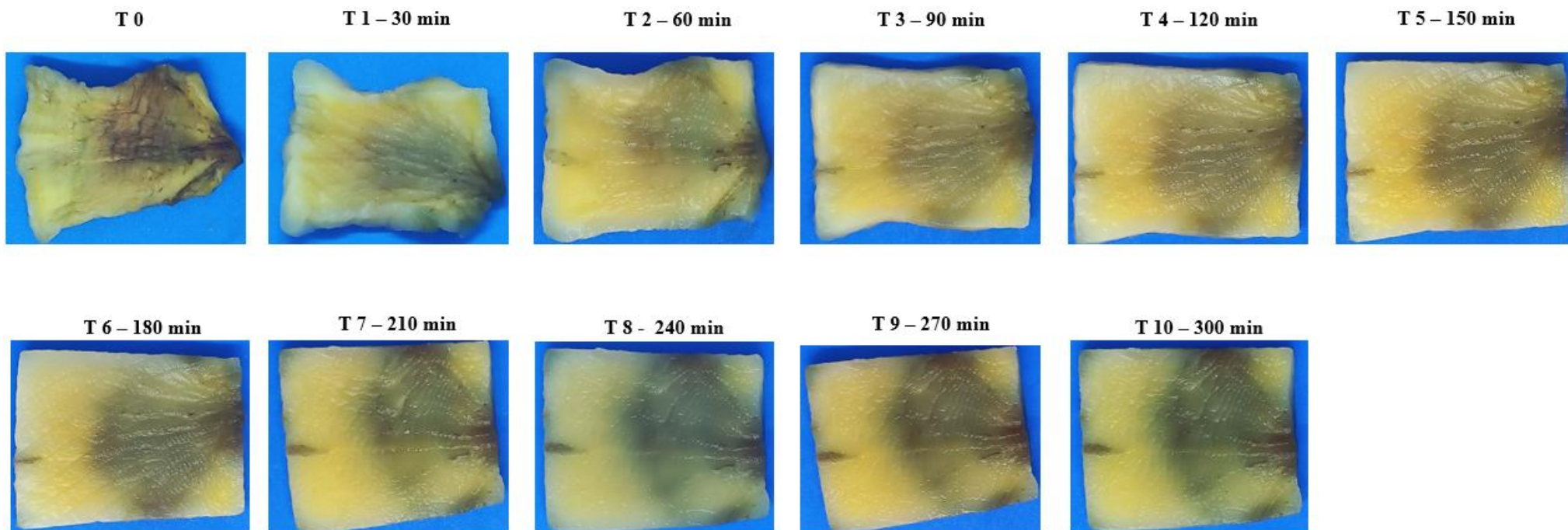


Figura 17

Secado convectivo + congelación de las muestras de yacón (primera repetición)

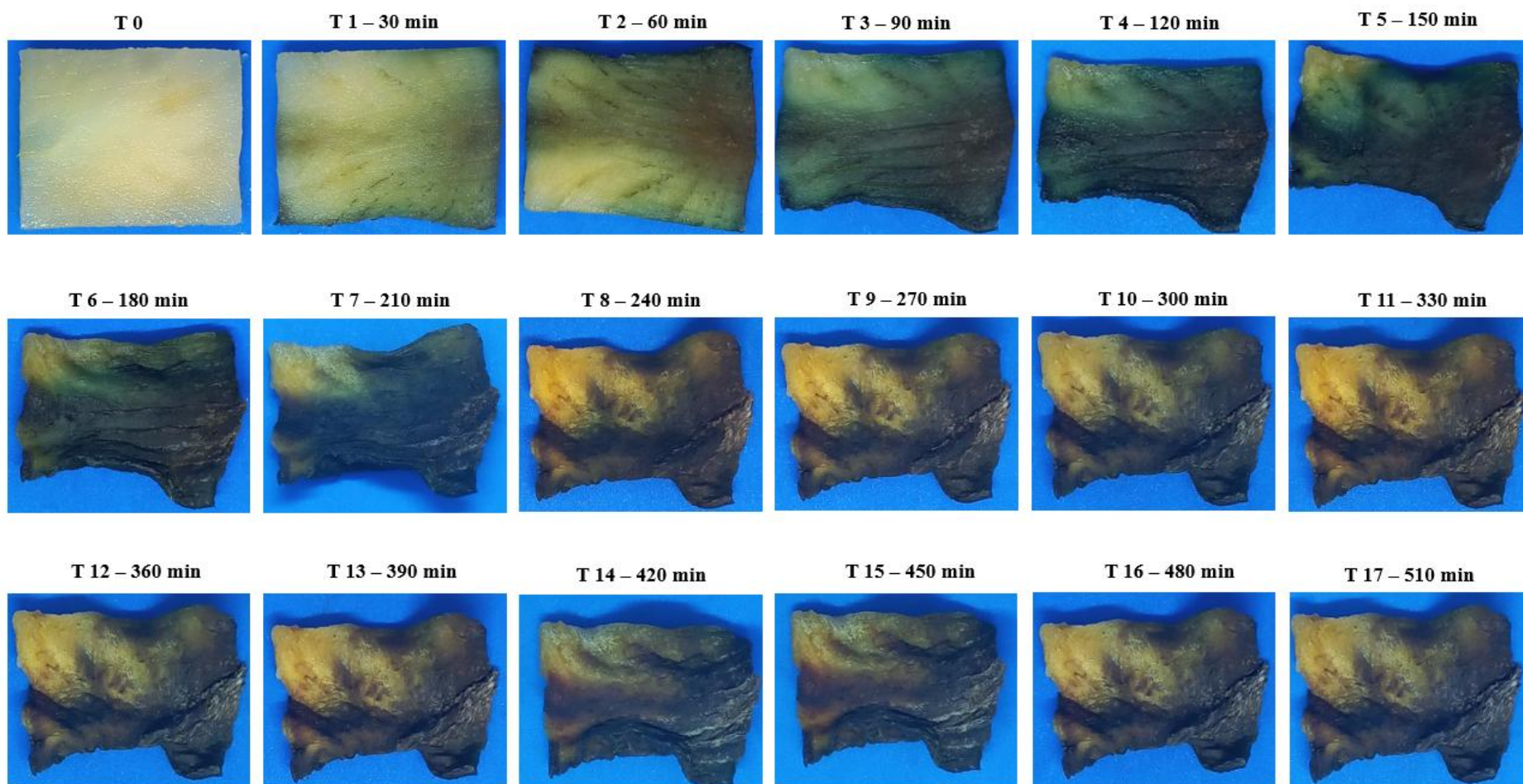


Figura 18

Rehidratación de las muestras del secado convectivo + congelación (primera repetición)

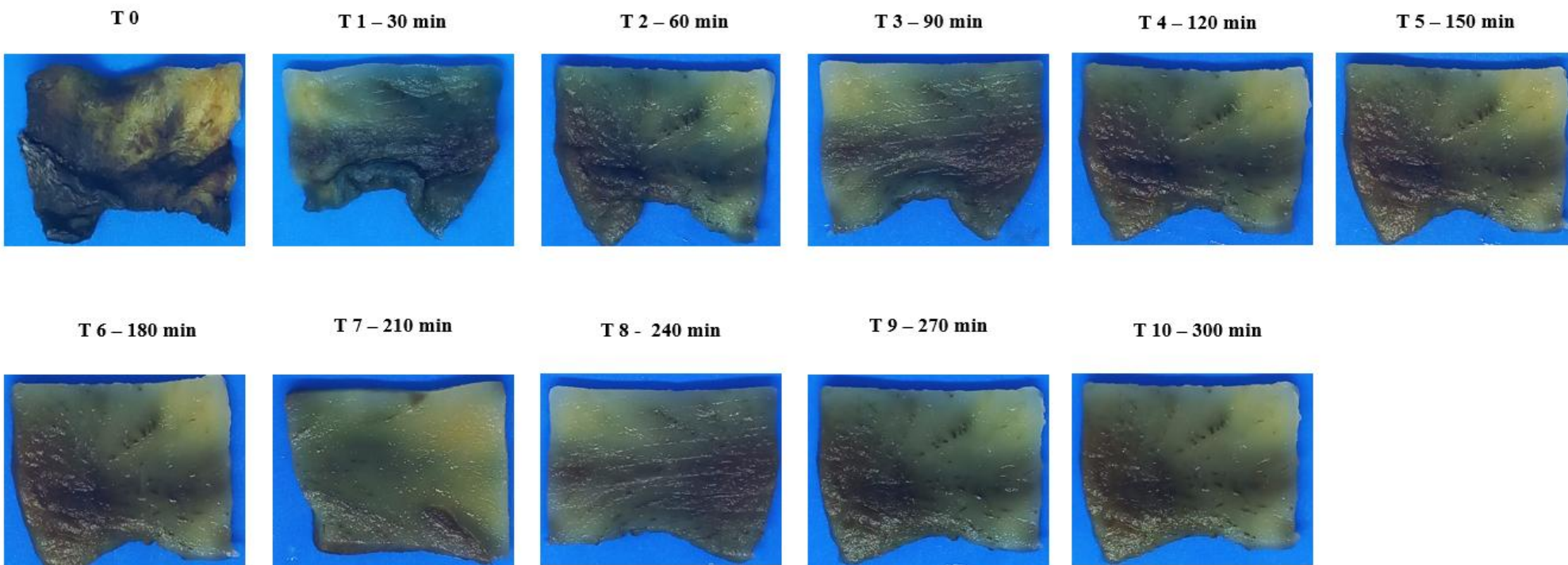


Figura 19

Secado solar de las muestras de yacón (primera repetición)

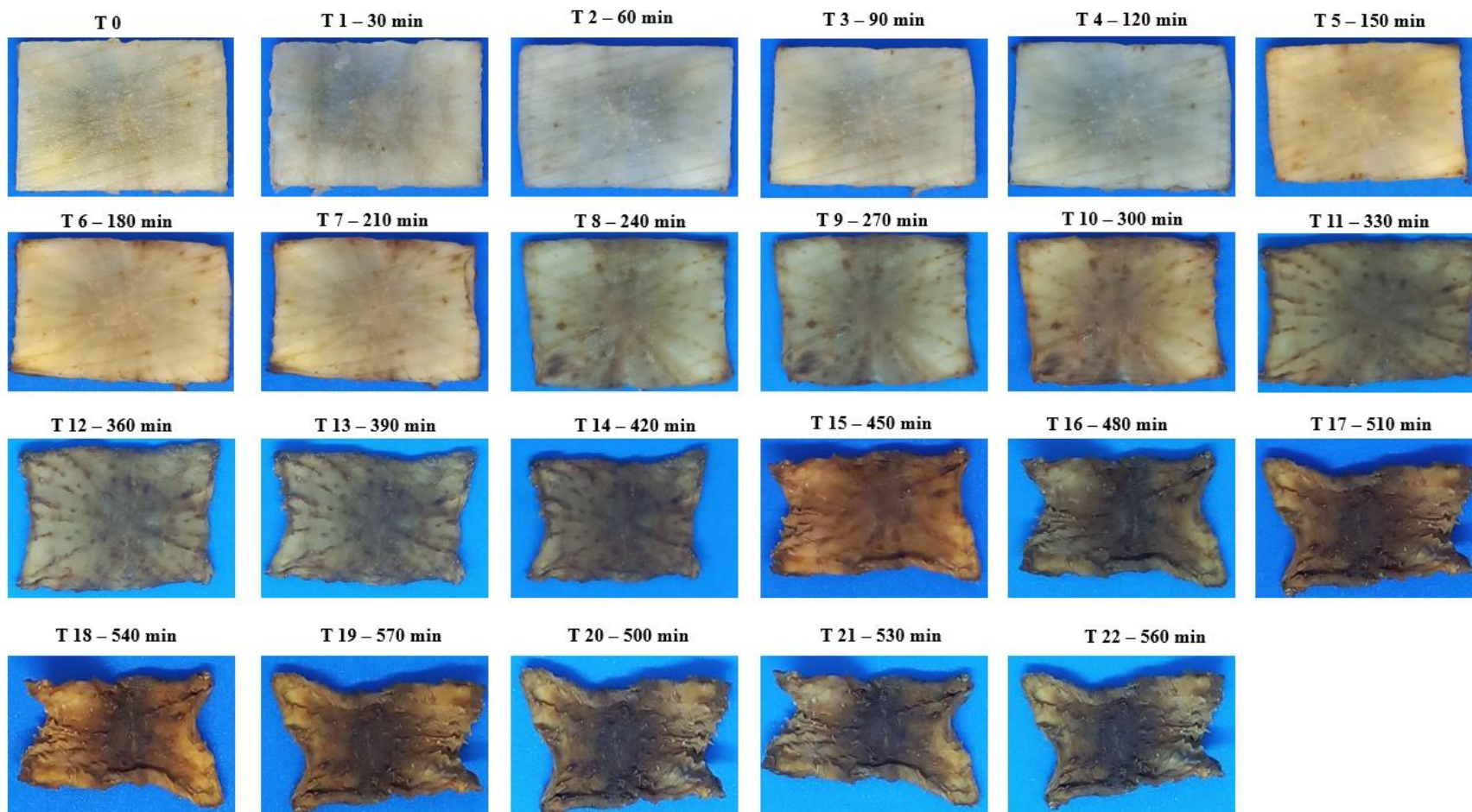


Figura 20

Rehidratación de las muestras del secado solar (primera repetición)

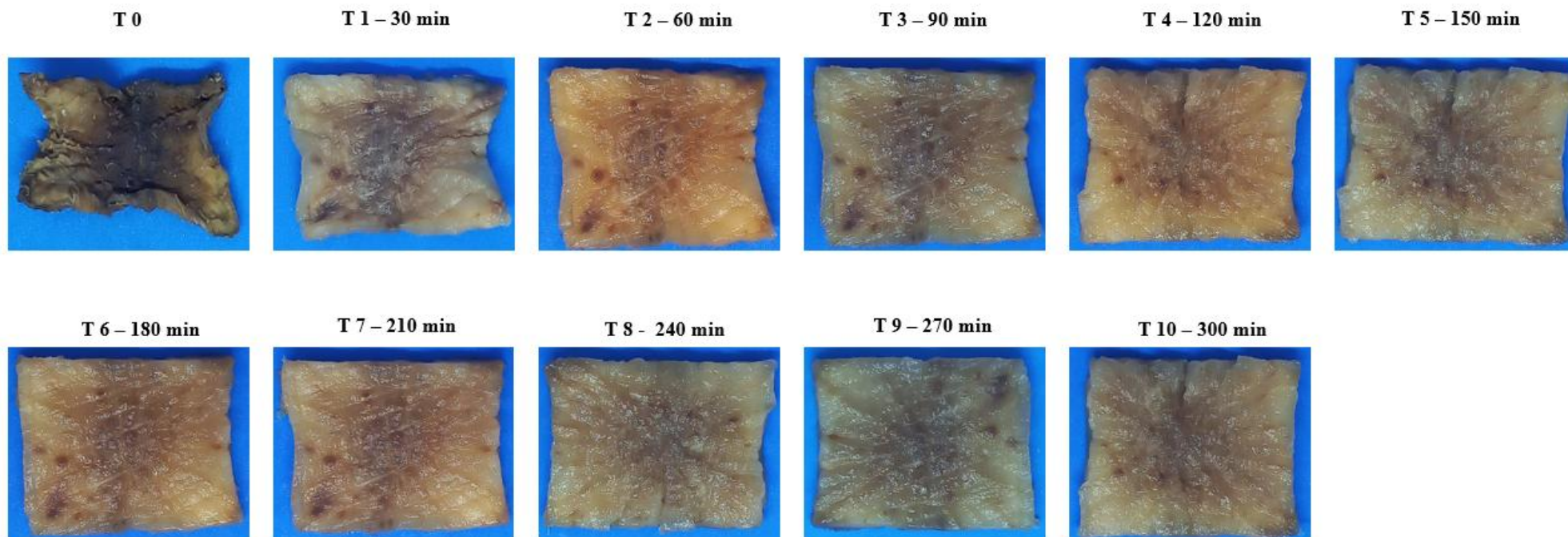


Figura 21

Secado convectivo 60°C de las muestras de yacón (segunda repetición)

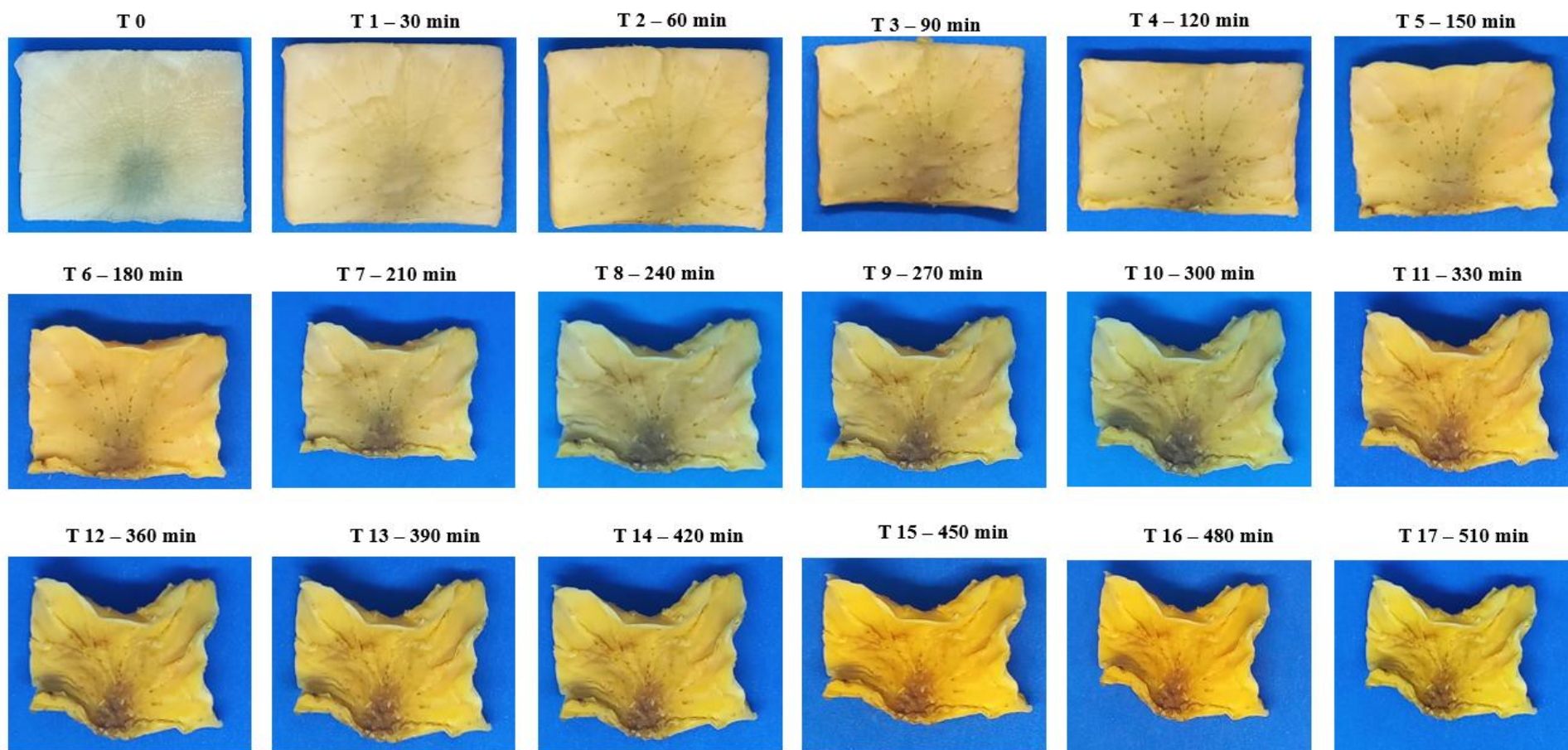


Figura 22

Rehidratación de las muestras del secado convectivo 60°C (segunda repetición)

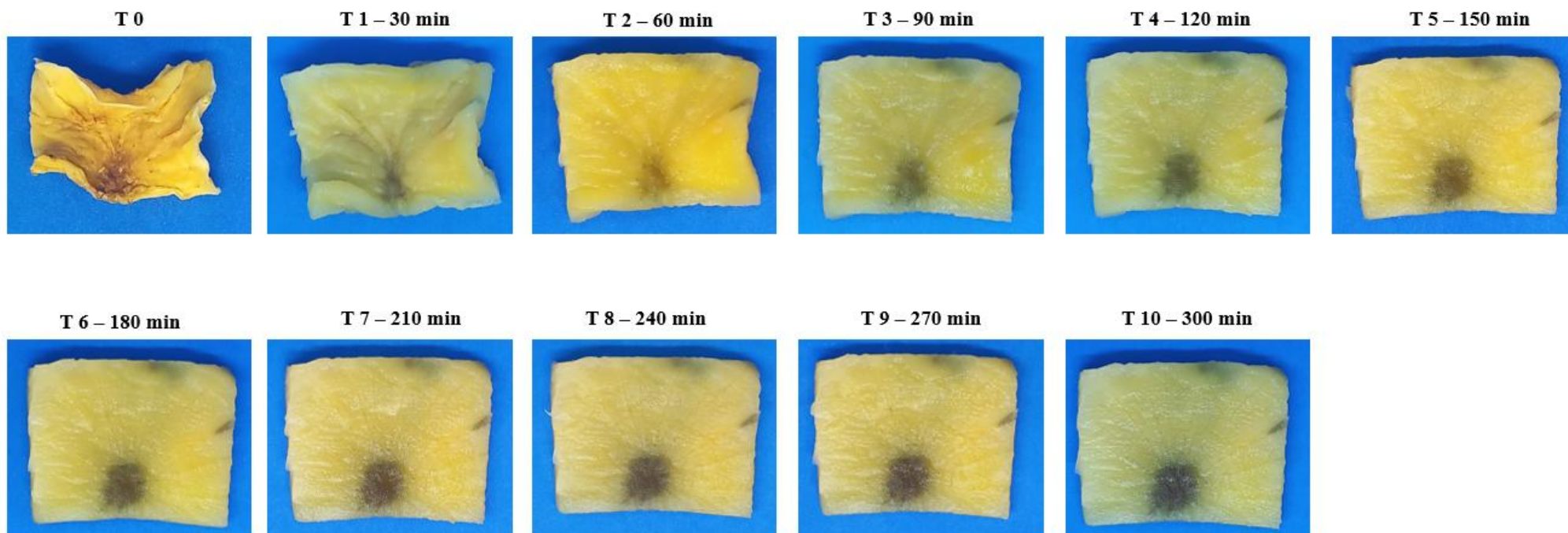


Figura 23

Secado convectivo + refrigeración de las muestras de yacón (segunda repetición)

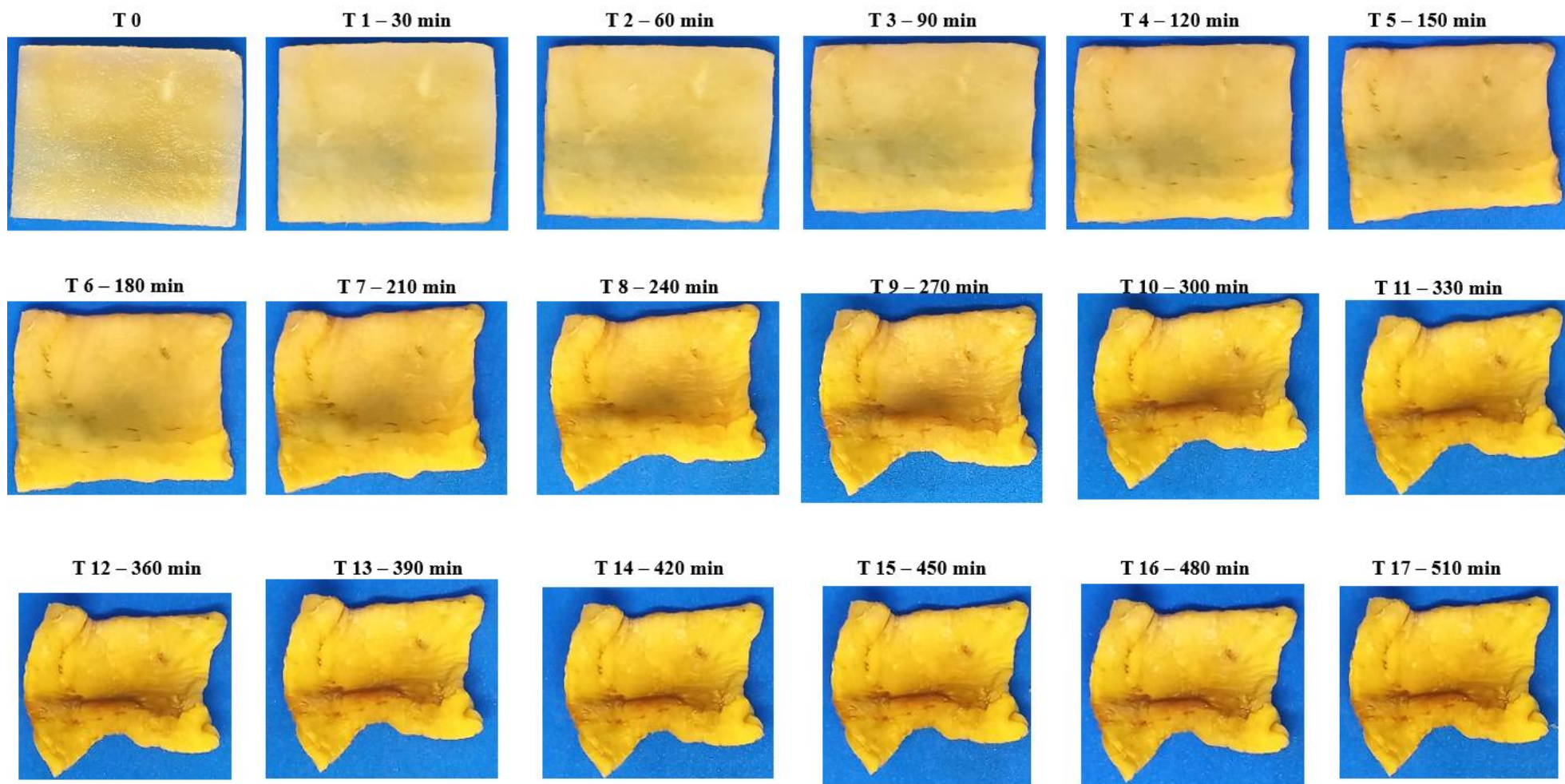


Figura 24

Rehidratación de las muestras del secado convectivo + refrigeración (segunda repetición)

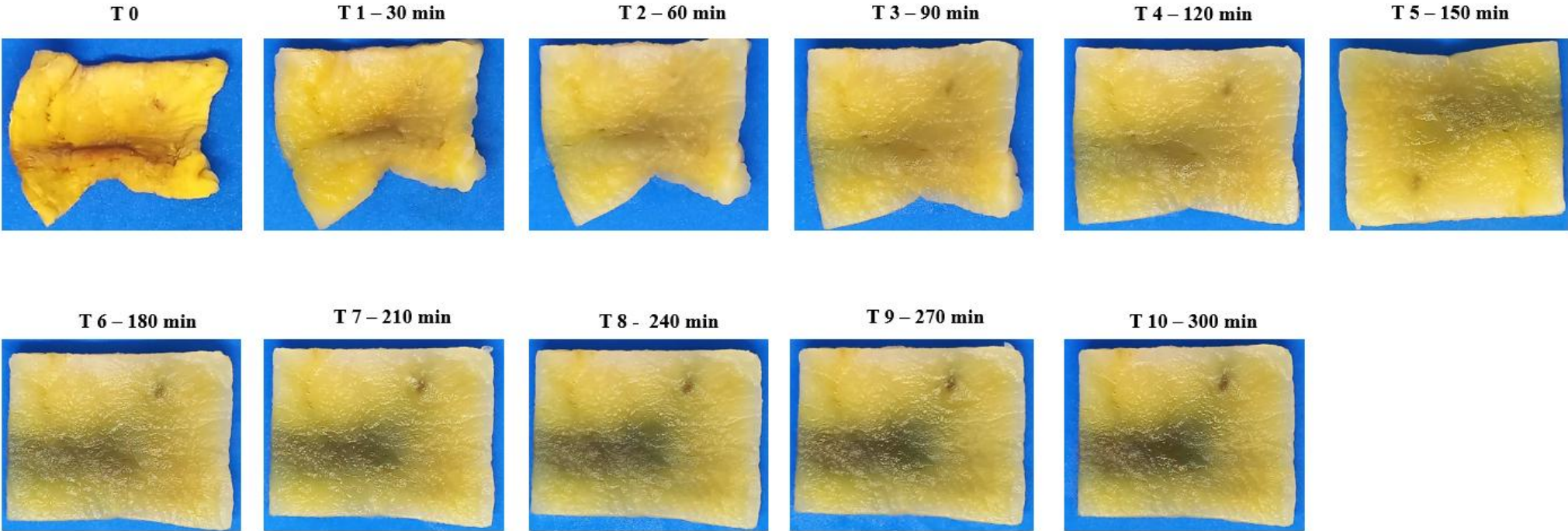


Figura 25

Secado convectivo + congelación de las muestras de yacón (segunda repetición)

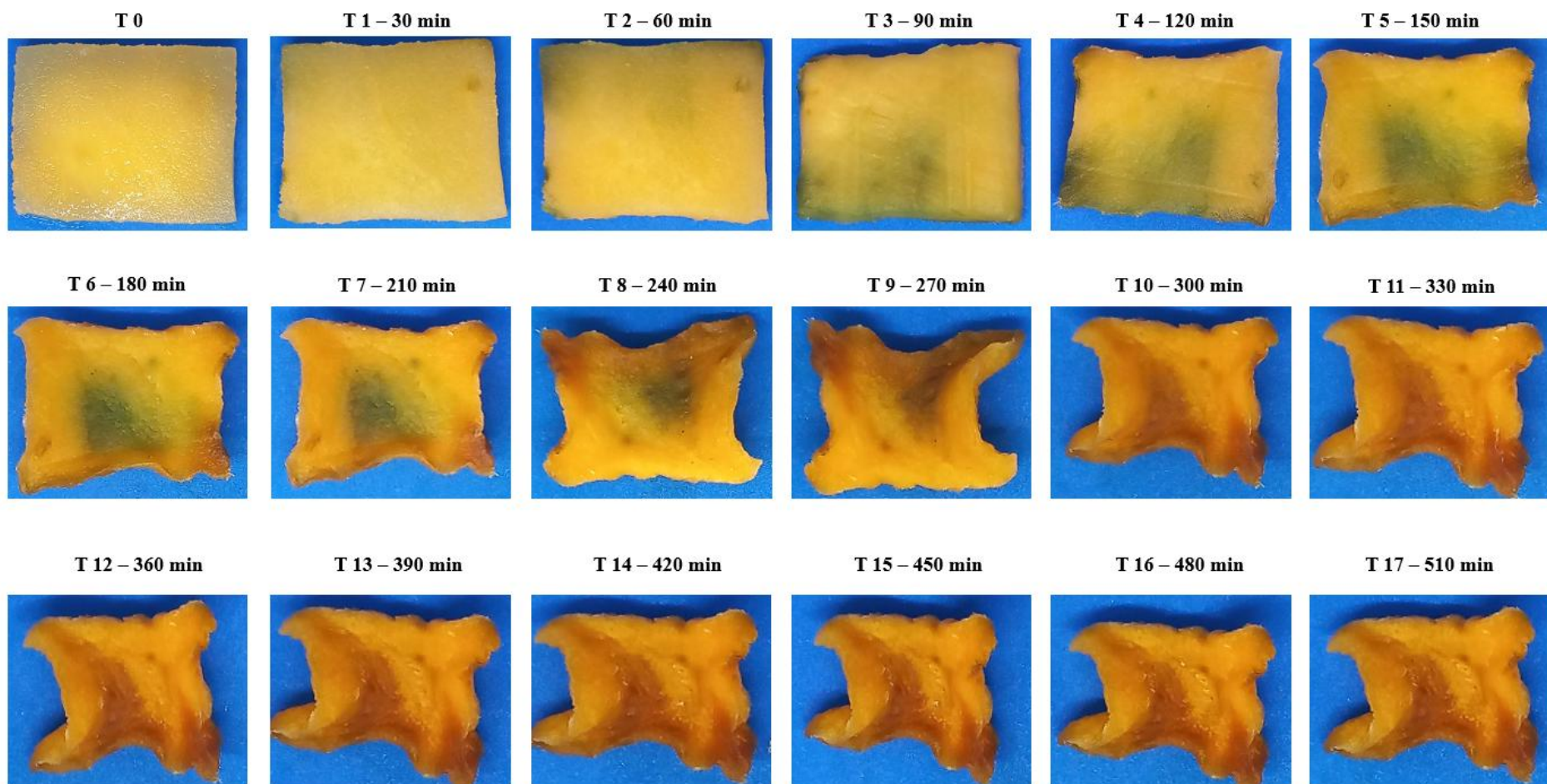


Figura 26

Rehidratación de las muestras del secado convectivo + congelación (segunda repetición)

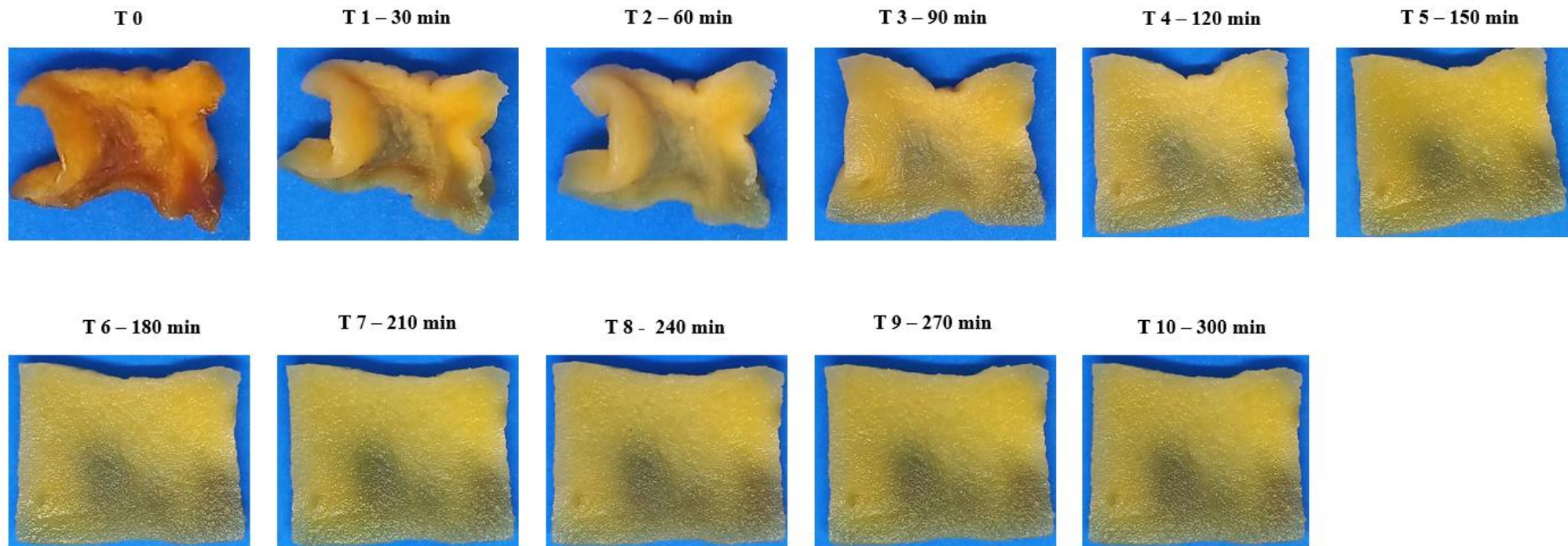


Figura 27

Secado solar de las muestras de yacón (segunda repetición)

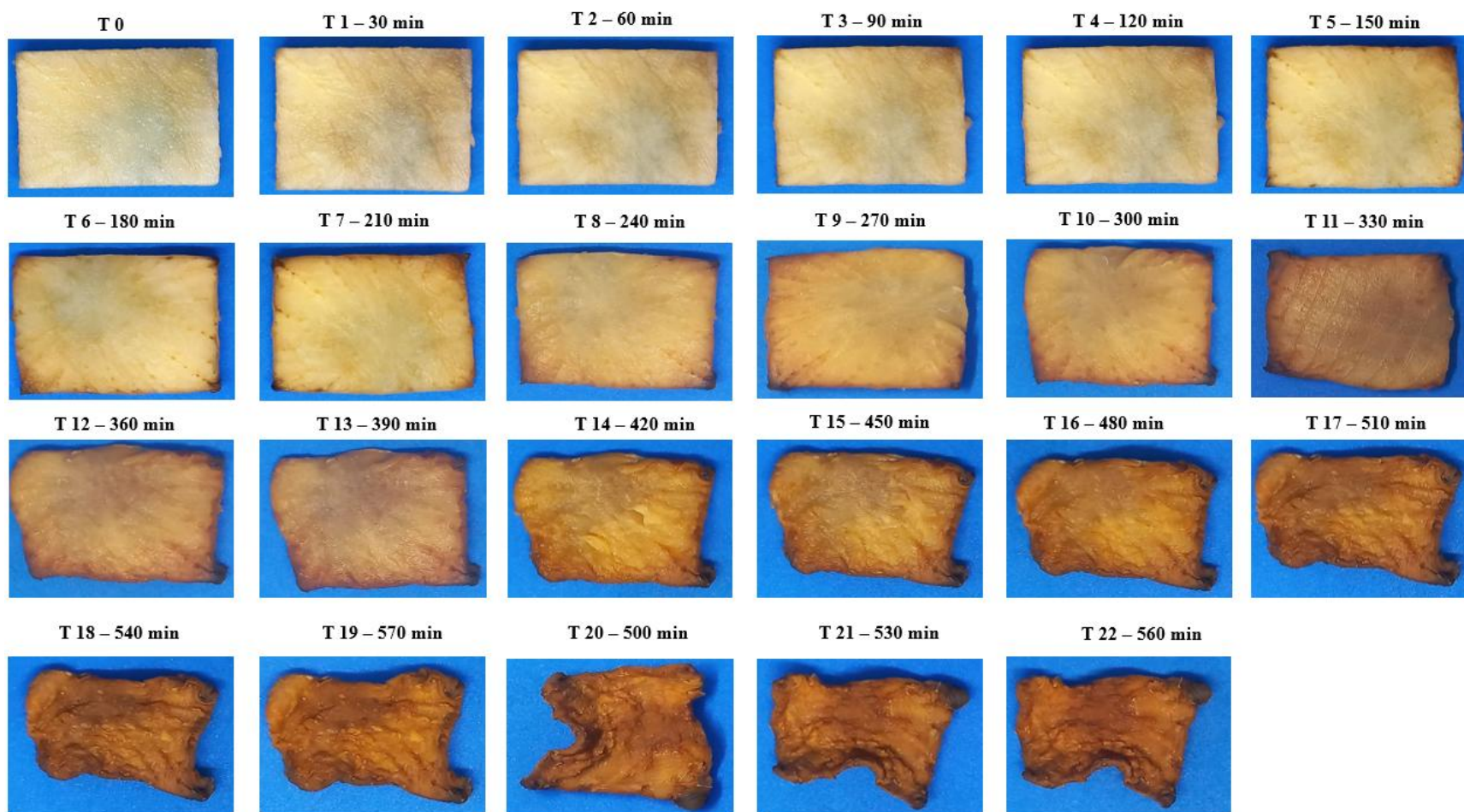


Figura 28

Rehidratación de las muestras del secado solar (segunda repetición)

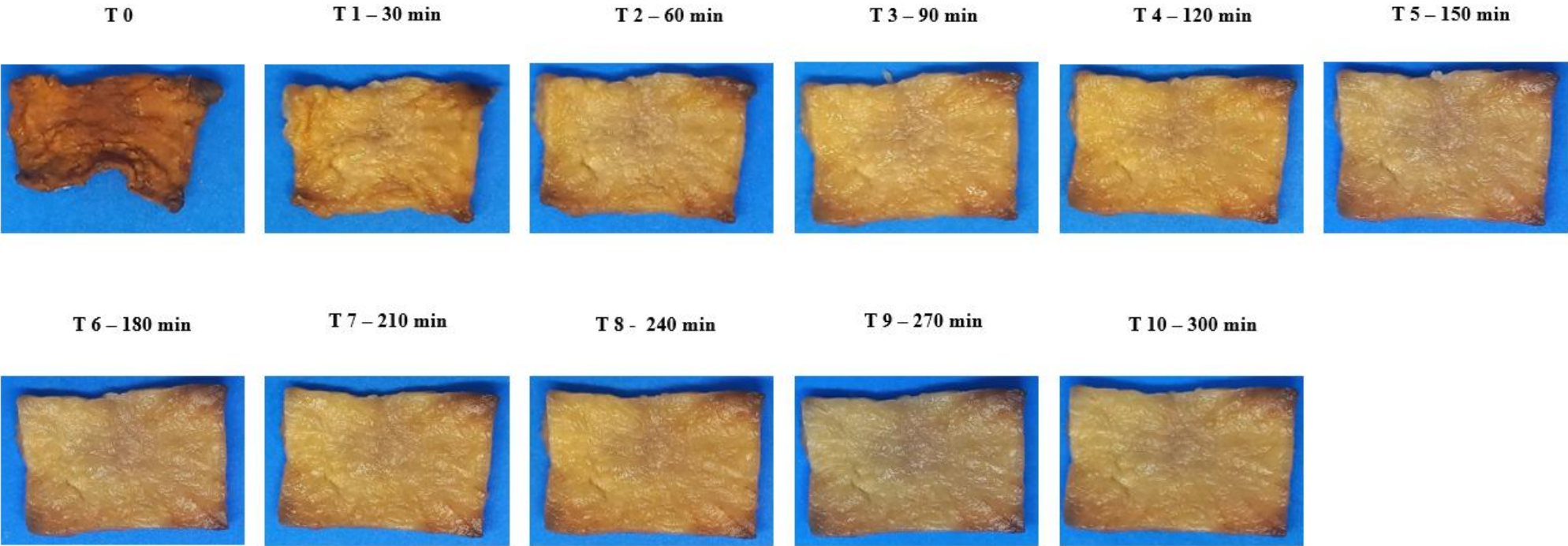


Figura 29

Análisis de humedad



Figura 30

Triturado de las muestras secas

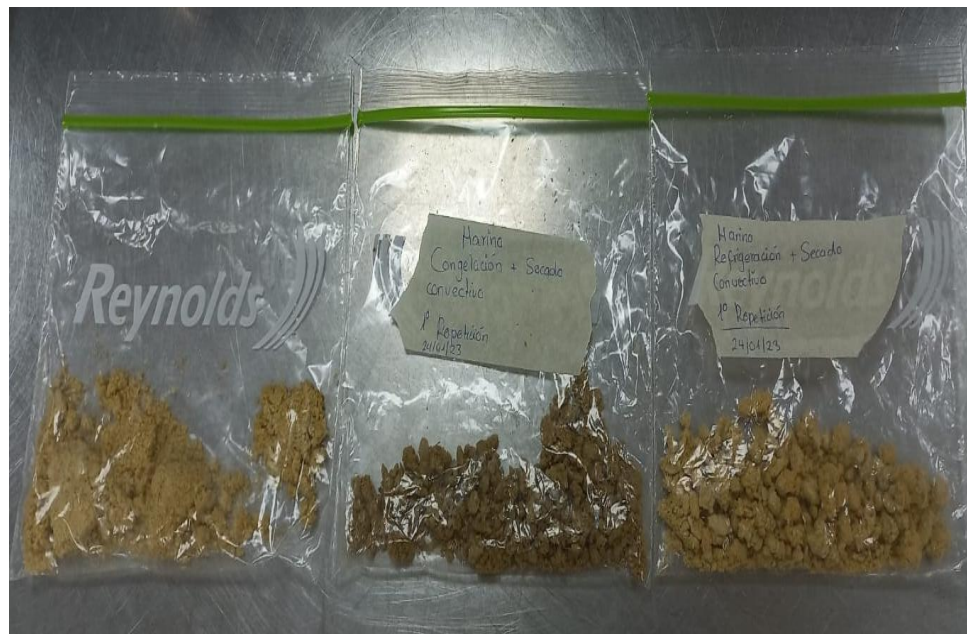


Figura 31

Se peso 0,5 g muestras (base seca) de cada tratamiento y se colocó en tubos de ensayo y vasos de precipitación + 12 mL de agua destilada



Figura 32

Baño maría



Figura 33

Centrifuga



Figura 34

Se tomó 5 mL del líquido sobrenadante de cada muestra y se transfirió a las placas Petri y se llevó a la estufa de secado a una temperatura de 110 °C por 16 horas

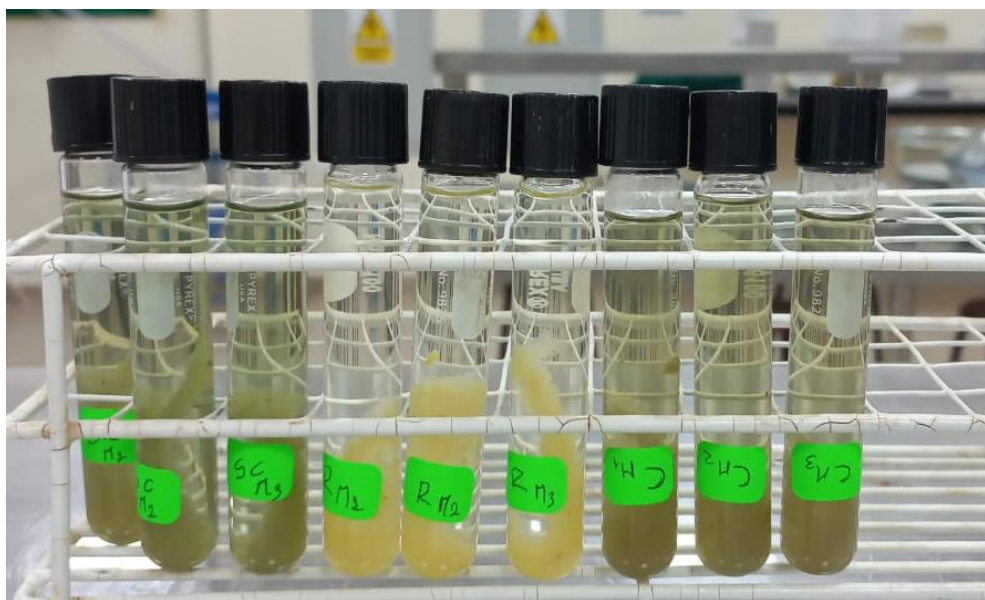


Figura 35

Se peso la recuperación de sólidos para calcular el porcentaje de solubilidad

