

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Estudio del proceso de secado mediante lecho fluidizado y
formulación de productos orientados a la valorización de
residuos de pera de origen agroindustrial

Proyecto integrador para optar por el título profesional de:

INGENIERA QUÍMICA

Alumna: Retamal Evelin Vanesa Estefanía

Carrera: Ingeniería Química

Legajo: ING-1367

Director: Dr. Francisco Garrido Makinistian

Co-directora: Dra. Milagros Gomez Mattson

Lugar de trabajo: Laboratorio de Tecnología de Alimentos del PROBIEN (CONICET-UNCO), Grupo de Tecnología de Alimentos (GTA)

Año: 2025

RESUMEN

La fruticultura es un sector clave en la economía del Alto Valle de Río Negro, orientado tanto al consumo fresco como a la agroindustria. Sin embargo, la acumulación de residuos orgánicos plantea un desafío ambiental, lo que resalta la necesidad de explorar estos materiales como sustratos para la obtención de productos de alto valor agregado. En este marco, el presente trabajo tuvo como objetivo estudiar como proceso de secado específico, el secado en lecho fluidizado de residuos de pera generados por una conservera de la región, combinados con distintos componentes alimenticios que permitieron formular distintos productos finales con aporte de fibra dietaria. Se prepararon cuatro formulaciones utilizando 80 % de residuo de pera (RP) y 20% (p/p) de diversas harinas o polvos: RP-harina de salvado de trigo (RP-HST), RP-harina de arroz (RP-HA), RP-harina de lupino (RP-HL), y RP-polvo de orujo de uva blanca (RP-PO). Tras el mezclado, se formaron bastones que se secaron en lecho fluidizado a 50, 60 y 70 °C, registrando la pérdida de peso para modelar la cinética de secado con los modelos de Page, Logarítmico y Henderson & Pabis. El modelo de Page presentó el mejor ajuste ($R^2 \geq 0,99$) para la cinética de secado, y la temperatura de 70 °C fue la más eficiente en términos de demanda energética. Finalmente, las formulaciones secadas a 70 °C fueron caracterizadas estructural y morfológicamente, y se analizó su contenido de fibra y polifenoles. Por otro lado, se estudió el comportamiento fluidodinámico del lecho para determinar la velocidad mínima de fluidización, la velocidad terminal y la clasificación Geldart, resultando todos los bastones de fibra partículas Geldart tipo D. La formulación con harina de salvado de trigo mostró la mayor eficiencia de secado debido a su morfología escamosa, mientras que la formulación con harina de arroz requirió mayores tiempos de secado debido a su estructura compacta. Esta última presentó la mayor integridad estructural, aunque el proceso de secado se vio dificultado por la formación de una costra superficial. En cuanto a la determinación de fibra dietaria total, se destacó la muestra RP-HST (49%), seguida por las muestras RP-HL (48%), RP-PO (43%) y RP-HA (27%). Respecto al contenido de polifenoles totales, cabe resaltar el resultado para la muestra RP-PO (864 ± 26 mg EAG/100g), explicado por el aporte de compuestos fenólicos del orujo de uva. Las restantes muestras presentaron las siguientes concentraciones: RP-HST= 123 ± 2 mg EAG/100g, RP-HL= 81 ± 4 mg EAG/100g, y RP-HA= 61 ± 15 mg EAG/100g. Los resultados de este estudio demuestran que el residuo de pera puede ser revalorizado mediante secado en lecho

fluidizado, obteniendo ingredientes con características estructurales y nutricionales diferenciadas según la harina utilizada. La optimización del proceso de secado y la caracterización de las formulaciones permiten su potencial aplicación en la industria alimentaria, promoviendo un enfoque sustentable para la gestión de residuos agroindustriales. Esto no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también abre nuevas oportunidades para el desarrollo de alimentos con valor agregado y beneficios funcionales.

Palabras clave: residuo de pera, secado en lecho fluidizado, revalorización, fibra, polifenoles.

ABSTRACT

Fruit growing is a key sector in the economy of the Alto Valle region in Río Negro, oriented towards both fresh consumption and agroindustry. However, the accumulation of organic residues presents an environmental challenge, highlighting the need to explore these materials as substrates for the development of high-value-added products. In this matter, the present work aimed to study a specific drying process — fluidized bed drying— applied to pear residues generated by a regional cannery, combined with different food ingredients that enabled the formulation of rich dietary fiber products. Four formulations were prepared using 80% pear residue (RP) and 20% (w/w) of different flours or powders: RP–wheat bran flour (RP-HST), RP–rice flour (RP-HA), RP–lupin flour (RP-HL), and RP–white grape pomace powder (RP-PO). After mixing, sticks were formed and dried in a fluidized bed dryer at 50, 60, and 70 °C, studying weight loss and adjust the drying kinetics using the Page, Logarithmic, and Henderson & Pabis mathematical models. The Page model showed the best fit ($R^2 \geq 0.99$) for the drying kinetics, and 70 °C proved to be the most energy-efficient temperature. Finally, the formulations dried at 70 °C were subsequently characterized in terms of structure and morphology, and their fiber and polyphenol contents were analyzed. Furthermore, the fluidization behavior of the bed was studied to determine the minimum fluidization velocity, terminal velocity, and Geldart classification, with all fiber sticks classified as Geldart type D particles. The formulation with wheat bran flour showed the highest drying efficiency due to its scaly morphology, while the formulation with rice flour required longer drying times due to its compact structure. The latter exhibited the greatest structural integrity, although the drying process was interfered by the formation of superficial crust. Regarding total dietary fiber content, the RP-HST sample stood out (49%), followed by PR-HL (48%), RP-PO (43%), and RP-HA (27%). For total polyphenol content, the RP-PO sample exhibited the highest value (864 ± 26 mg EAG/100 g), ascribed to the contribution of phenolic compounds from grape pomace. The remaining samples showed the following concentrations: PR-HST = 123 ± 2 mg EAG /100 g, RP-HL = 81 ± 4 mg EAG /100 g, and RP-HL = 61 ± 15 mg EAG /100 g. These results demonstrate that pear residue can be revalorized through fluidized bed drying, obtaining ingredients with structural and nutritional characteristics that vary depending on the flour used. The optimization of the drying process and the characterization of the formulations support their potential application in the food

industry, promoting a sustainable approach to agro-industrial waste management. This not only contributes to reducing environmental impact but also opens new opportunities for the development of value-added foods with functional benefits.

Keywords: pear residue, fluidized bed drying, revalorization, fiber, polyphenols.

Agradecimientos

En un principio, quiero agradecer a la Dra. Daniela Salvatori, por haberme abierto los brazos a su laboratorio y a mi director, el Dr. Francisco Garrido Makinistian, por haber confiado en mí al darme la oportunidad de realizar mi tesis. Su apoyo, dedicación y orientación me ha sido fundamental a lo largo de este proceso.

A mi codirectora, la Dra. Milagros Gomez Mattson por brindarme sus enseñanzas, las cuales enriquecieron mi experiencia académica. Quiero destacar su apoyo, simpatía y amabilidad, lo cual me ha motivado a llevar adelante este trabajo. También quiero expresar mi gratitud a Carmen por ayudarme con la medición de las muestras y a Mariana por su asistencia técnica y contribución al procesamiento de los resultados.

Quiero expresar mi agradecimiento a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería, Biotecnología y Energías Alternativas (PROBIEN, CONICET-UNCo), por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mi trabajo en sus instalaciones. El acceso a sus recursos y la excelente infraestructura han sido clave para la culminación de esta tesis. Quiero agradecer al Grupo de Ingeniería de Reactores y Procesos Químicos por la disposición del equipamiento.

Agradezco a la Universidad Nacional del Comahue por haberme brindado las instalaciones y los recursos necesarios que hicieron posible que pueda culminar mis estudios universitarios. Su espacio me ha generado comodidad y permitido conectar con compañeros y colegas con quienes hemos intercambiado espacios de aprendizaje. Quiero destacar a los numerosos docentes que han pasado durante mis años de aprendizaje, y han contribuido a mi formación académica.

Mi más profundo agradecimiento a mí amada madre por su confianza en mí y por ofrecerme todo lo que estuvo a su alcance para mi educación. Su constante apoyo y amor incondicional han sido una fuente de fortaleza en cada paso de mi camino. Ella me ha transmitido la capacidad de no rendirme y que con perseverancia y esfuerzo todo es posible.

A mi compañero de vida, mi amado Ain Doyel Garcés, gracias por la paciencia y por motivarme, contenerme y sostenerme en cada una de mis decisiones. Por tu amor incondicional y por ayudarme con todo lo que está a tu alcance para cumplir este sueño.

Eres una parte esencial de mi vida y siempre estaré agradecida por todo lo que haces por mí. También, a mi familia política, mi suegra Romi, abuelas Coca y Lili, que me han abierto los brazos y me brindaron sus palabras de aliento y su confianza deseándome lo mejor.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mis compañeros y amigos Sami, Marite, Lu, Natali, Juan, Ana, Sil, Aixa, Diana y Paula, los cuales fueron una gran compañía durante mi carrera y volvieron más ameno el aprendizaje. A ellos, les agradezco por acompañarme en los momentos difíciles, por alentarme con sus consejos, charlas y abrazos, por su incondicionalidad y cariño.

Gracias

I.	INTRODUCCIÓN	1
I.1	Materia Prima	2
I.1.1	Descripción general de la pera, composición química y nutricional.....	2
I.1.2	Producción de Pera en Argentina.....	4
I.1.3	Procesamiento de la pera	6
I.2	Valorización y potencial funcional de residuos de pera.....	8
I.2.1	Alimentos funcionales	9
I.2.2	Tecnologías para el aprovechamiento de residuos.....	10
I.2.2.1	Tecnologías de secado	11
I.2.2.2	Mecanismos involucrados en el proceso de secado convectivo.....	12
I.3	Cinética de Secado convectivo	13
I.3.1	Secado en Lecho fluidizado	15
I.3.1.1	Etapas del proceso.....	16
I.3.1.2	Clasificación de Geldart de partícula.....	17
I.3.1.3	Balance de materia y energía en lecho fluidizado.....	19
II.	OBJETIVOS.....	21
II.1	OBJETIVOS GENERALES.....	22
II.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	23
III.1	Materiales	24
III.1.1	Materia prima	24
III.2	Métodos.....	25
III.2.1	Obtención de pellets	25
III.2.2	Secado de pellets en lecho fluidizado.....	26
III.2.3	Curvas de secado y modelado de los datos experimentales del secado.....	27
III.2.4	Selección de condición de secado y producción de pellets	29
III.3	Análisis de propiedades fisicoquímicas	30
III.3.1	Humedad y a_w	30
III.3.2	Determinación del tamaño y estructura de los pellets	30
III.3.3	Determinación de la morfología, densidad y la porosidad de los pellets	31
III.3.4	Estimación de la velocidad mínima de fluidización, velocidad terminal y clasificación de Geldart.....	32
III.4	Contenido de fibra y polifenoles	33
III.5	Análisis estadístico.....	34

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
IV.1 Cinética de Secado	36
IV.2 Modelado matemático de las curvas de secado.....	40
IV.3 Selección de condición de secado y producción de pellets	43
IV.4 Caracterización estructural de los pellets: tamaño de partículas, densidad, porosidad y morfología	44
IV.5 Clasificación Geldart y estimación de la velocidad mínima de fluidización	48
IV.6 Determinación de contenido de fibra dietaria y polifenoles	49
V. CONCLUSIONES	51
VI. NOMENCLATURA	54
VII. BIBLIOGRAFÍA	58
VIII. ANEXO.....	67

I. INTRODUCCIÓN

I.1 Materia Prima

I.1.1 Descripción general de la pera, composición química y nutricional

El término “pera” hace referencia a los frutos producidos por diversas especies del género *Pyrus*. No obstante, cuando se habla del fruto comestible, se hace alusión al producido por la especie *Pyrus communis* (Xue keqing, 2004). Las variedades más destacadas en Argentina son: William’s, que representa el 45% del cultivo, seguida por Packham’s con el 30%, 10% Beurre D’ Anjou, mientras que el 15% restante corresponde a variedades minoritarias (Del Brio, 2018).

La pera William’s presenta como rasgo característico una estructura simétrica y piriforme. Los frutos suelen ser de tamaño medio, con piel lisa brillante y coloración entre verde claro a amarillo. El fruto está compuesto por cáscara, la pulpa y las semillas (Figura I-1). A medida que avanza la maduración, la pulpa se torna blanda-cremosa, de consistencia y textura fina y con propiedades organolépticas que indican un sabor dulce y levemente ácido (Maidana, 2017).

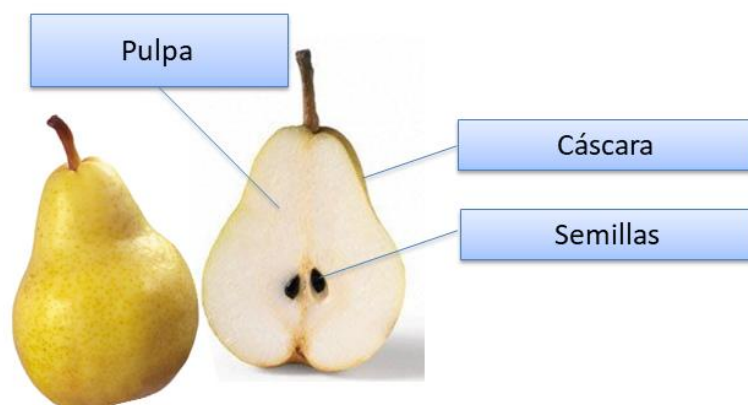


Figura I-1 Estructura correspondiente a la pera William’s

La pera William’s se destaca por su alta calidad nutricional, especialmente por su variedad de azúcares, entre los que se incluyen sacarosa, glucosa, fructosa y sorbitol (ver Tabla I-1). Este alimento se caracteriza por un alto porcentaje de agua (entre el 78-90%), ausencia de grasas y bajo nivel calórico. También es rica en fibra dietaria, que se compone principalmente de polisacáridos, oligosacáridos y lignina, y se clasifica en fibra soluble (9,4%, principalmente pectinas) e insoluble (17%) según su solubilidad en agua (Maidana, 2017; Barda y col., 2022). La fibra soluble, de rápida fermentación, genera ácidos grasos de cadena corta, los cuales aportan energía y favorecen el equilibrio de la microbiota, mientras

que la fibra insoluble tiene la capacidad de retener agua, lo que mejora el tránsito intestinal (Crosetti & Zúñiga, 2022). A su vez, el consumo de fibra dietaria se asocia con un efecto saciante, al involucrar la absorción de agua en las fibras insolubles, y su posterior aumento de volumen en el tracto digestivo, generando la distensión del estómago y reduciendo el apetito. Además, la fibra soluble ralentiza el vaciamiento gástrico y la digestión, prolongando la sensación de saciedad (Falcón y col., 2011). También contribuye a estabilizar los niveles de glucosa en sangre, evitando picos rápidos que podrían provocar sensación de hambre (Wu y col., 2023). En combinación, el aumento de volumen y la digestión más lenta estimulan la liberación de hormonas relacionadas con la saciedad, como la leptina, lo que refuerza la señal de reducción del apetito (Almeida-Alvarado, 2014).

Adicionalmente, la pera William's es una fuente rica de compuestos con propiedades antioxidantes, entre los que destacan los flavonoides, taninos, ciertos pigmentos naturales y la vitamina C. Estos antioxidantes desempeñan un papel crucial en la neutralización de los radicales libres, ayudando a proteger las células del daño oxidativo. En particular, los flavonoides y taninos contribuyen significativamente a la capacidad antioxidante de la fruta, mientras que la vitamina C no solo refuerza el sistema inmunológico, sino que también actúa como un potente antioxidante (Rangel y col., 2015). Gracias a estos compuestos, la pera William's ayuda a disminuir las Especies Reactivas del Oxígeno (ROS), retrasar el envejecimiento y disminuir la predisposición de desarrollar cáncer, hipertensión arterial, enfermedades neurodegenerativas y diabetes (Macavilca Yacsavilca, 2019).

Tabla I-1 Composición Nutricional típica de la pera William's (Barda y col., 2022).

INFORMACION NUTRICIONAL		
<i>Porción 190 g</i>		
<i>1 pera William's mediana, madura, con cáscara, calidad extra</i>		
	Cantidad por 100 g	% VD(*)
Valor energético	52 kcal - 221 kJ	3
Carbohidratos de los cuales:	12 g	4
<i>Sacarosa</i>	2,3 g	
<i>Glucosa</i>	1,3 g	
<i>Fructosa</i>	8,1 g	
<i>Sorbitol</i>	2,4 g	
Proteínas	0,5 g	1
Grasas totales de los cuales:	0 g	0
<i>Grasas saturadas</i>	0 g	
<i>Grasas trans</i>	0 g	
Fibra alimentaria	4,7 g	19
<i>Fibra insoluble (**)</i>	3,3 g	
<i>Fibra soluble (**)</i>	1,4 g	
Sodio	0 mg	0
Potasio	175 mg	5
Cobre	170 ug	19
Magnesio	11 mg	4
<p><i>(*) Valores diarios recomendados en base a una dieta de 2000 kcal o 8400 kJ. Los valores diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de las necesidades energéticas.</i></p> <p><i>(**) No mandatorio para la legislación Argentina.</i></p>		

I.1.2 Producción de Pera en Argentina

El cultivo de pera en Argentina alcanza un promedio anual de 0,8 millones de toneladas, siendo la mayor parte de la producción nacional destinada a la exportación a países como Brasil, Rusia, Estados Unidos e Italia (Bertoldi, 2015). El 68% de la producción se deriva al consumo de productos frescos y este consumo requiere que la fruta cumpla ciertos estándares de calidad, en términos de tamaño, forma, color, madurez y la ausencia de defectos (Maidana, 2017).

En Argentina, la región del Alto Valle está constituida por las provincias de Río Negro y Neuquén, recayendo en ellas el 90% de la producción del país con alrededor de 27.000 ha implantadas. Las condiciones climáticas de la zona, caracterizadas por un clima árido-semiárido, mesotérmico (templado) y con precipitaciones escasas, ofrecen un entorno propicio para el cultivo de esta fruta. Sin embargo los productores enfrentan desafíos como

heladas primaverales, altas temperaturas y una elevada radiación, así como vientos frecuentes y secos, que pueden generar condiciones estresantes para el desarrollo de los frutos. A pesar de estos retos, la región del Alto Valle ha logrado posicionarse como un referente en la producción de pera de alta calidad, gracias a la capacidad de los productores para adaptarse y superar las adversidades climáticas (Giayetto & Villarreal, 2010).

Entre las principales empresas de la región encontramos: Tres Ases S.A., que genera y comercializa principalmente manzanas, pera, ciruela y durazno; Boschi Hnos S.A., dedicada a la producción de peras, manzanas y carozos; Pai Argentina S.A., productora de peras y manzanas; y Ecofrut S.A., enfocada en la comercialización de manzanas, peras, ciruelas y limones. En la provincia de Neuquén se destaca Global Fresh, que cultiva peras, manzanas, cerezas, duraznos, nectarines, ciruelas y damascos. A su vez, la provincia de Buenos Aires destaca por la comercialización y procesamiento de peras provenientes del Alto Valle, entre ellas sobresalen empresas como Cauquén Argentina generadora de peras, cítricos y arándanos; Fruitworld S.A. productora de pera y manzana y por último Montever S.A. que cultiva y comercializa pera y manzana (Export Argentina, 2023) (Figura I-2).

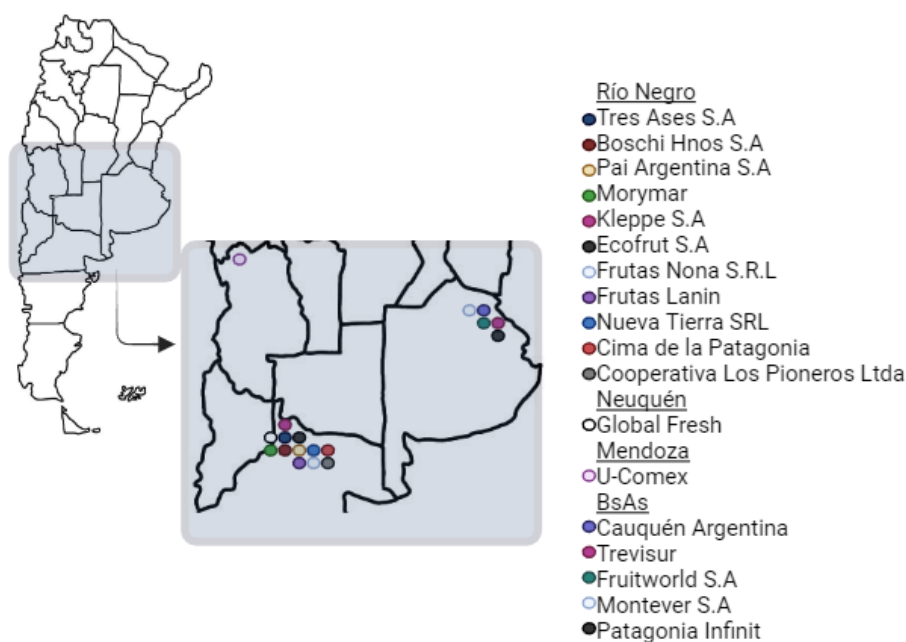


Figura I-2 Principales empresas del sector agroindustrial de peras (figura de elaboración propia utilizando información de Export Argentina, 2023).

I.1.3 Procesamiento de la pera

En la industria agroalimentaria, el procesamiento de frutas que no cumplen con los estándares de calidad para el consumo en fresco es una práctica común. En el caso de la pera, aproximadamente el 28% de la producción total se destina a estas actividades agroindustriales, donde predominan la elaboración de jugos (67,8%) y subproductos como conservas, pulpas, licores y frutos deshidratados (Figura I-3) (Maidana, 2017).

En los procesos industriales que comprenden a la pera se incluyen las etapas de selección de la fruta, lavado y pelado. Ésta última puede llevarse a cabo de varias maneras, siendo las más utilizadas el pelado mecánico y químico. El pelado mecánico utiliza equipos diseñados para retirar la cáscara de manera automatizada, destacándose por no emplear aditivos químicos contaminantes. En cambio, el pelado químico implica el uso de una solución diluida de NaOH para ablandar y eliminar la cáscara, lo cual requiere un control estricto de la concentración, temperatura y tiempo de contacto ya que un procesamiento inadecuado podría generar la contaminación del producto final (Ordóñez y col., 2022). Durante el procesamiento de las peras, hay diversas rutas de producción que se pueden seguir según el producto final deseado, como por ejemplo sidra, conservas, producción de jugo, elaboración de pulpas, licores o deshidratación de peras (Figura I-3)

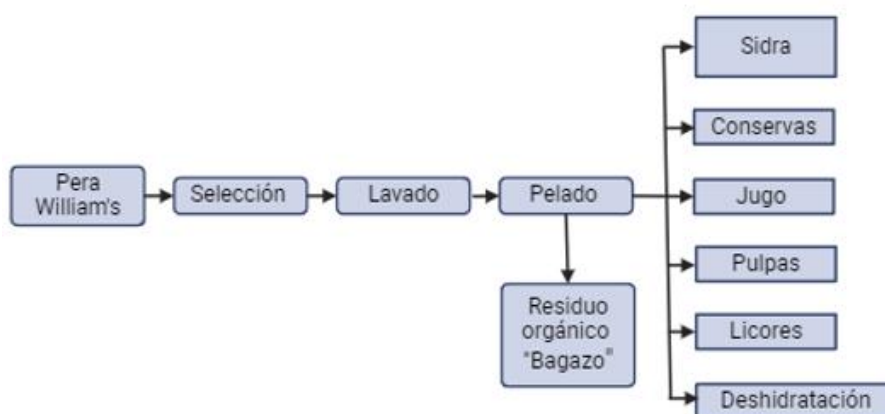


Figura I-3 Diagrama de flujo del procesamiento de la pera en la industria.

En cuanto al proceso de pelado se generan residuos orgánicos denominados orujos y/o bagazos, que están constituidos principalmente por piel, semillas y pulpa. Estos residuos poseen propiedades biológicas significativas que comprenden compuestos activos asociados a efectos antioxidantes, antienvjecimiento y propiedades antiinflamatorias. Se compone de un 60-70% de humedad y niveles elevados de fibra dietaria, predominantemente de tipo

insoluble. También, se compone por ácido ascórbico en proporciones abundantes en la piel más que en la pulpa, ácido málico y ácido cítrico, azúcares, minerales, proteínas y una pequeña cantidad de grasa. Las sustancias polifenólicas y otros fenoles, principalmente de tipo taninos, resultan responsables de la astringencia y el amargor de la fruta (Ferreira y col., 2023).

Se estima que la actividad de la agroindustria genera en la región aproximadamente 360.000 toneladas anuales de residuos, principalmente en forma de bagazo, representando el 60% del total de la fruta procesada (Aramberri, 2017; Martínez y col., 2015). Este desecho se acumula a cielo abierto entre los meses de marzo y septiembre, periodo en el cual las empresas llevan a cabo el procesamiento de los frutos (Aramberri, 2017). El residuo sufre una fermentación natural que resulta en la emisión de ácidos orgánicos, metano y sulfuro de hidrógeno, los cuales suelen acumularse en regiones cercanas a las áreas industriales donde se procesan grandes cantidades de peras, pudiendo causar serios problemas de contaminación en suelo y agua superficial y subterránea. En consecuencia, afectan flora y fauna circundante a los sitios de disposición, alterando el medio ambiente y generando gases de efecto invernadero, plagas o enfermedades (Martínez y col., 2015).

Para mitigar los efectos negativos de la no utilización de estos residuos, se emplean diversas técnicas que modifican su composición química, muchas de las cuales involucran el uso de microorganismos como *Pleurotus ostreatus* y otros hongos ligninolíticos, como *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium* (Da Re, 2016). Durante su crecimiento, el residuo de pera actúa como un sustrato que aporta nutrientes esenciales como azúcares, compuestos fenólicos y fibra. Estos nutrientes son utilizados por los microorganismos para su desarrollo y metabolismo (Buglione, 2017).

El proceso de degradación comienza con la producción de exoenzimas que rompen compuestos complejos como la celulosa, hemicelulosa y lignina en moléculas más simples, como azúcares de bajo peso molecular, que pueden ser asimiladas por los hongos. El tiempo que toma este proceso depende de varios factores, incluyendo la temperatura, las condiciones de humedad y la cantidad de residuos, pero generalmente puede durar entre 60 y 90 días para completar la degradación significativa del material. Este ritmo relativamente lento limita su aplicación a gran escala, por lo que es importante continuar investigando métodos que aceleren el proceso o complementen su eficiencia (Buglione, 2017).

Por otro lado, los residuos de frutas, como cáscaras, semillas y pulpas, debido a su composición nutricional y bioactiva, pueden aprovecharse en procesos productivos, optimizando el uso de recursos y contribuyendo tanto a la sostenibilidad económica como a la mitigación del impacto ambiental (Van Hoof y col., 2022). Entre sus aplicaciones, estos residuos pueden destinarse a la elaboración de nuevos alimentos, suplementos nutricionales y otros productos de valor agregado, lo que genera oportunidades económicas mediante la creación de nuevos mercados (Polenta, 2016).

I.2 Valorización y potencial funcional de residuos de pera

Ante la creciente problemática ambiental derivada de la acumulación de residuos sólidos con alto contenido orgánico, surge la necesidad de considerar estos desechos como sustratos potenciales para la obtención de productos de alto valor agregado ya que son una fuente importante de biocompuestos de interés industrial (Nayak & Bhushan, 2019).

Los residuos pueden ser aprovechados de diversas maneras para transformarse en valiosos recursos. La economía circular es un enfoque que promueve la reutilización, renovación o reciclaje de productos con el fin de prolongar su vida útil y reducir la generación de residuos contaminantes, transformándolos en recursos valiosos y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental mediante el cierre del ciclo de producción (Pascoalino y col., 2024). En este contexto, la bioeconomía se enfoca en el aprovechamiento de materiales de origen biológico, transformando residuos orgánicos en bioproductos, bioenergía o biomateriales, lo que no solo añade valor a los desechos, sino que también impulsa el desarrollo sostenible (Rodríguez y col., 2017). El bagazo de la fruta puede ser procesado para su posterior utilización en actividades de compostaje que implican la descomposición de estos residuos en abono natural rico en nutrientes para la tierra; o como complemento nutritivo para estrategias de alimentación a animales. Otras aplicaciones de estos biorresiduos comprenden la generación de biocombustible sólido y la producción de biogás (Aramberri, 2017).

Se están investigando nuevas formas de aprovechamiento, como la posibilidad de emplear el bagazo de pera para crear sustratos destinados a la producción de hongos comestibles (Martínez y col., 2015). Además, se está evaluando el uso de compost de orujo de pera y manzana como alternativa para la producción de plantines de tomate, con el objetivo de reemplazar el uso de recursos no renovables como la turba (Maldonado, 2021). Otra opción es utilizar técnicas de secado que permitan reducir la humedad del bagazo,

preservar las propiedades físicas y químicas para evitar el deterioro y reducir costos, obteniendo así un producto en polvo para enriquecimiento alimenticio (Krajewska y col., 2024). Estos tratamientos introducen una oportunidad para aprovechar las propiedades funcionales y nutritivas de este tipo de descarte, y así combatir la problemática ambiental que éstos generan.

I.2.1 Alimentos funcionales

El concepto de alimento funcional involucra productos naturales o procesados, que contienen nutrientes esenciales y/o agregados de compuestos biológicamente activos que mejoran sus propiedades y ofrecen beneficios para la salud, como la disminución del riesgo de desarrollo de enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT) como cáncer, obesidad, enfermedades respiratorias crónicas, afecciones cardiovasculares y diabetes. Para que un alimento se considere funcional, se deben demostrar los efectos beneficiosos de su consumo y se debe verificar su efecto fisiológico. La Organización Mundial de la Salud (OMS), estableció una serie de objetivos para la prevención y control de las ECNT, que incluyen la reducción del consumo de sal, reemplazo del consumo de grasas trans por grasas insaturadas, incremento en el consumo de frutas y verduras a porciones no menores a 400 gramos diarios e incorporación en la dieta de cereales integrales, legumbres, leche y proteínas magras (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2020). El consumo abundante de frutas está vinculado a beneficios significativos para la salud, por lo que los biorresiduos provenientes de estos alimentos presentan interés terapéutico (Pascoalino y col., 2021).

Los residuos de frutas contienen compuestos bioactivos de interés, tales como polifenoles, fibras dietarias y aceites esenciales. Estos componentes aportan propiedades antioxidantes que ayudan a prolongar la vida útil de los alimentos al prevenir la oxidación de lípidos y vitaminas, y propiedades antiinflamatorias que favorecen la salud al reducir el riesgo de enfermedades. También poseen actividad antimicrobiana, lo que podría ser útil en el tratamiento de infecciones por patógenos resistentes a diversos fármacos (Quiñones y col., 2012). A su vez, estos biorresiduos se asocian con efectos aglutinantes del agua y gelificantes, lo que permite mejorar la textura de los alimentos; la enzima β -glucosidasa, presente en los orujos, se utiliza en la industria alimentaria para la prevención de la decoloración de jugos de frutas y el tratamiento de disfunciones en la microbiota intestinal. Asimismo, las flavononas constituyen fitomedicamentos con propiedades antitumorales y

antipalúdicas; y los compuestos fenólicos presentan propiedades antienvjecimiento y como reguladores de la glucemia (Pascoalino y col., 2021).

Entre las aplicaciones potenciales en la industria para obtener alimentos funcionales, se ha explorado el potencial bioactivo de las harinas de orujo de pera y manzana, debido a su valor como fuente de metabolitos lipofílicos y polares. Además, se han propuesto diferentes aplicaciones para el orujo de pera, tales como la coproducción de celulosa bacteriana y vinagre de pera (Ferreira y col., 2024). Otros estudios sugieren la bioproducción de edulcorantes bajos en calorías a partir de residuos de frutas tales como pera, sandía, melón, naranja y mango que se utilizan para la producción de azúcares de alto valor como D-alulosa y D-manitol, a partir de la D-fructosa (Li y col., 2022). Los compuestos bioactivos tales como polifenoles, fenoles y triterpenos, presentes en los biorresiduos de manzana, pera y remolacha azucarera se han aplicado en formulaciones de alimentos y son provechosos porque poseen propiedades que contribuyen a la prevención de la disfunción endotelial y, por lo tanto, a la protección contra enfermedades cardiovasculares (Caliceti y col., 2022).

I.2.2 Tecnologías para el aprovechamiento de residuos

Existen diversas tecnologías y procesos que se han estudiado para aprovechar los residuos de la industria. Dentro de los procesos alternativos para revalorizar los residuos de fruta, con frecuencia se propone alguna etapa que involucra la operación unitaria de secado, ya sea como una operación intermedia para estabilizar el residuo y prepararlo para otras etapas de procesamiento, o como una operación final que genera el producto deseado (Sozzi y col., 2021; Sette y col., 2021). De esta manera, la aplicación de distintos métodos de secado, constituye una manera de obtener productos deshidratados de diferentes propiedades fisicoquímicas, con distintos contenidos y tipos de fibra dietaria y antioxidantes, según la fuente vegetal y tipo de industria de la que provengan los residuos (Franceschinis, 2016).

El bagazo se está reconociendo como un valioso material para fines nutricionales, siendo el proceso de secado la técnica más utilizada porque permite conservar al residuo por tiempos prolongados dada su baja humedad, mejorar la logística y costos de almacenamiento, y conservar las propiedades fisicoquímicas (Krajewska y col., 2024).

I.2.2.1 Tecnologías de secado

El proceso de secado implica la reducción del peso y volumen de los alimentos al generar una pérdida de agua, que deriva en una disminución de la actividad microbiana y enzimática, permitiendo su conservación aumentando la vida útil del producto seco. A su vez, la reducción del volumen del producto genera una serie de ventajas logísticas, entre ellas la reducción de los costos de envasado, manejo, almacenaje y transporte (Araya-Farias & Ratti, 2009).

Entre los métodos de secado más utilizados se destacan el secado convectivo, el secado en lecho fluidizado y la liofilización. El secado convectivo emplea un flujo de aire caliente para eliminar la humedad del producto, elevando su temperatura y facilitando la evaporación del agua (Unigarro Bolaños, 2017). Por su parte, el secado en lecho fluidizado, un tipo de secado convectivo, utiliza corrientes de aire que mantienen las partículas en suspensión, logrando un secado eficiente y uniforme (Calleja Pardo y col, 2002). La liofilización, un método avanzado de secado por sublimación, consta de dos etapas: primero se congela el producto y luego se elimina el hielo por sublimación directa bajo presión reducida. Este proceso elimina el agua sin pasar por el estado líquido, utilizando bajas temperaturas (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005).

Los procesos de secado que utilizan técnicas convectivas tienden a deteriorar la calidad del producto final, provocando alteraciones en su composición nutricional y afectando tanto sus propiedades físicas como químicas. Este deterioro también influye en las reacciones enzimáticas, ya que el aumento de temperatura puede desnaturalizar enzimas esenciales, disminuyendo su actividad y alterando la estabilidad y funcionalidad de los compuestos bioactivos presentes en los residuos procesados.

Además, la rehidratación de estos productos no permite restaurar los valores y propiedades nutricionales (Saavedra, 2022). En contraposición, el proceso de liofilización al realizarse a bajas temperaturas minimiza el riesgo de desnaturalización de proteínas y otras moléculas sensibles al calor, como las enzimas, vitaminas y compuestos bioactivos, preservando las propiedades organolépticas, nutricionales y estructurales del producto (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). Sin embargo, la necesidad de reducir la presión y el prolongado tiempo de deshidratación (24-48 horas) implica un mayor consumo de energía (Alvarado, 2021).

Finalmente, es importante mencionar que, en el caso del secado por lecho fluidizado, el costo energético es considerablemente menor debido a su eficiencia en la transferencia de calor y masa, facilitada por el contacto directo y continuo entre el aire caliente y el material. Esta técnica permite una deshidratación más rápida en comparación con otros métodos, optimizando el consumo de energía (Delgado-Plaza y col., 2023).

I.2.2.2 Mecanismos involucrados en el proceso de secado convectivo

Existen distintos mecanismos durante el secado convectivo de un alimento, entre ellos los fenómenos que comprenden fuerzas capilares y de gravedad, difusión de vapor de agua ocasionada por gradientes de presión y difusión del líquido debido a vaporización o condensación del agua (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). Estos mecanismos actúan en conjunto en las distintas etapas del proceso de secado, contribuyendo al flujo total (Bruin & Luyben, 1980). La Figura I-4 esquematiza el proceso global de secado de una matriz sólida (mecanismos implicados).



Figura I-4 Distribución de la humedad en un lecho de un sólido durante el proceso de secado. (Adaptado de Foust y col., 2006).

Los procesos de secado convectivo, incluyendo las técnicas de secado en lecho fluidizado, involucran mecanismos de vaporización que evitan la acumulación de agua en los poros cerca de la superficie y contribuyen a la difusión de vapor de agua (Xue keqing, 2004). Estos procesos son impulsados por un gradiente de temperatura y de presión parcial de vapor. Los poros del alimento generan intersticios que consisten en estructuras espaciales que permiten un flujo continuo de la humedad retenida hacia la superficie del sólido. A medida que el sólido poroso va eliminando agua, esta pérdida induce fuerzas capilares y de gravedad que generan un flujo de agua ascendente desde el interior del sólido hasta llegar al medio que lo rodea (Allier González, 2012). Durante este proceso las moléculas del líquido deben atravesar una capa de aire estancado. Este mecanismo depende en gran medida de la

estructura porosa del alimento y de las interacciones entre el agua y la matriz alimentaria. Adicionalmente, la diferencia de concentración entre el interior del sólido y su superficie genera procesos de difusión de líquidos (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005; Van Arsdel y col., 1963).

I.3 Cinética de Secado convectivo

La cinética de secado es una herramienta muy utilizada para establecer los parámetros de este proceso; este concepto implica la deshidratación bajo condiciones de secado específicas que puede verse afectado tanto por las condiciones externas del medio como por aspectos internos del producto, entre ellos la estructura química y física de los alimentos. La cinética de secado se establece bajo condiciones de temperatura constante midiendo la masa de la muestra a lo largo del tiempo, con lo cual se determina el contenido de humedad en el alimento (Carrín & Crapiste, 2009), de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$X_0 = \frac{m_0 - m_s}{m_s} \quad (1.1)$$

$$X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (1.2)$$

$$X^* = \frac{X}{X_0} \quad (1.3)$$

X_0 = humedad en base seca inicial

$X(t)$ = humedad en base seca en función del tiempo

X^* = humedad adimensional

m = masa total del alimento

m_s = masa seca del alimento

t = tiempo

Por otro lado, en base a la construcción de la curva de secado es posible determinar la velocidad de secado $[-\frac{dX}{dt}]$ a partir de la derivada numérica en base a la diferencia en el

contenido de agua en función del tiempo (ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6). De esta manera también es posible analizar su comportamiento en función de la humedad del producto.

$$\Delta X = X_i - X_{i+1} \quad (1.4)$$

$$\Delta t = t_i - t_{i+1} \quad (1.5)$$

$$-\frac{dX}{dt} = -\frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (1.6)$$

donde:

$$i = n + 1 \quad n \geq 0$$

La Figura I-5 esquematiza una cinética de secado a partir de la evaluación de pérdida de humedad (Figura I-5 a) y de la velocidad de secado (Figura I-5 b), pudiendo identificarse distintas zonas: inicialmente se visualiza un periodo de acondicionamiento ($A \rightarrow B$) donde las moléculas de agua son evaporadas en la superficie del alimento, mientras el mismo se calienta. Aquí la velocidad de secado varía y es independiente del producto.

Seguido de esto, ocurre un primer periodo de secado ($B \rightarrow C$) denominado periodo de velocidad constante de secado, verificándose una disminución lineal de la humedad hasta el punto de humedad crítica C (Figura I-5 a). La velocidad de secado se mantiene estable porque hay suficiente agua en la superficie del material, lo que permite que la evaporación ocurra a un ritmo constante (Figura I-5 b). En los sólidos porosos el agua eliminada en la superficie es compensada por el flujo de agua desde el interior del sólido, siendo la temperatura superficial aproximadamente la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}). En esta etapa, la energía aplicada se utiliza principalmente para la evaporación del agua superficial.

Por último, se da una tercera etapa de secado ($C \rightarrow E$) denominada periodo de velocidad decreciente en la cual la disminución de humedad con respecto al tiempo es no lineal y se acerca asintóticamente a la humedad de equilibrio (Figura I-5 a). Los fenómenos involucrados pueden explicarse analizando el periodo en dos etapas: la primera de ellas se da cuando los puntos húmedos en la superficie del producto disminuyen continuamente hasta que la misma está completamente seca (punto D). Luego, a medida que disminuye la humedad, el plano de evaporación se aleja lentamente de la superficie (Figura I-4), el producto se acerca a la temperatura de bulbo seco (T_{bs}) y la resistencia interna para la

transferencia de masa resulta más dominante. En este periodo, la velocidad de secado se ve afectada por dicha resistencia interna asociada a las características del material sólido, pudiendo no existir diferencias marcables entre la primera y segunda etapa del periodo de velocidad decreciente (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005; Carrín & Crapiste, 2009).

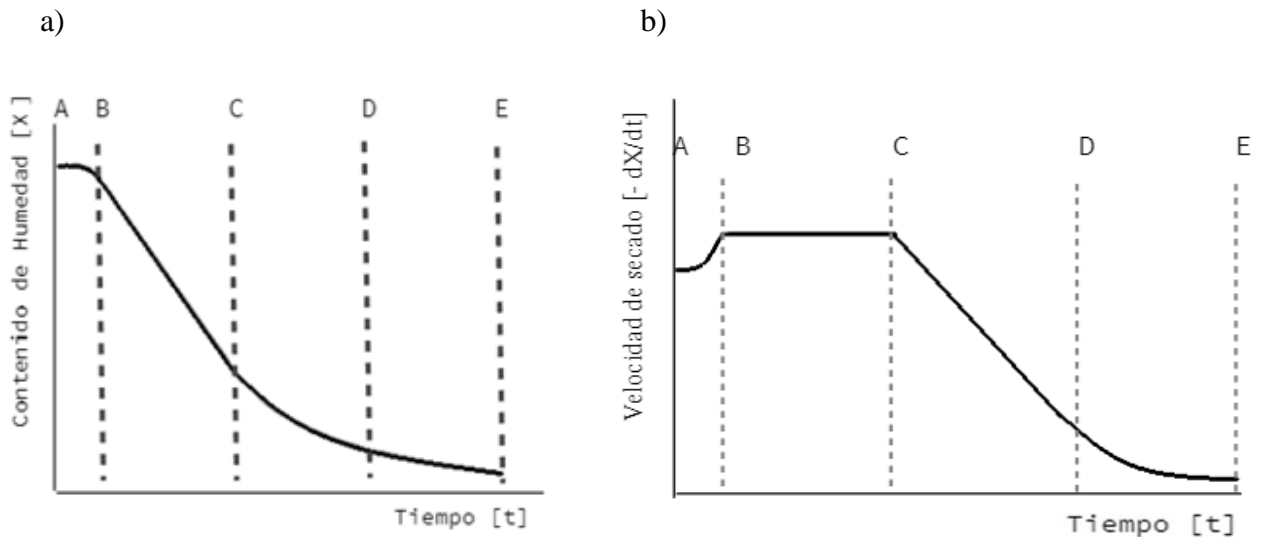


Figura I-5 Gráficas de una curva de secado humedad vs tiempo (a) y velocidad de secado vs tiempo (b) típicas del secado por convección en condiciones externas constantes. (Adaptado de Carrín & Crapiste, 2009)

I.3.1 Secado en Lecho fluidizado

El secado en lecho fluidizado es una técnica de deshidratación de tipo convectivo en la que se utiliza una corriente de aire caliente como agente de secado y fluidizante a la vez. En este sistema, el aire asciende a través de un lecho de partículas sólidas, generando un movimiento que mantiene las partículas suspendidas y en agitación, lo cual favorece la transferencia de calor y masa, resultando en un secado más eficiente y homogéneo. Adicionalmente, al mantener las partículas en suspensión mediante el flujo de aire caliente, se reduce el riesgo de sobrecalentamiento local y la formación de puntos con humedad residual, lo que favorece la calidad del producto final (Delgado-Plaza y col., 2023).

Una de las principales ventajas del secado en lecho fluidizado es su capacidad de adaptarse tanto a equipos de funcionamiento continuo como discontinuo, lo que le confiere una notable flexibilidad operativa. Esta tecnología resulta especialmente eficaz para el tratamiento de materiales granulares o pulverizados, como granos, y trozos de frutas o verduras. Su aplicación está ampliamente difundida en la industria alimentaria, donde se

utiliza para secar productos agrícolas con distintos tamaños de partícula, como arvejas y soja, garantizando un secado uniforme y eficiente. Además, mejora significativamente la tasa de eliminación de humedad sin comprometer la calidad del producto final, lo cual es fundamental en este sector, donde se requiere un control riguroso del proceso para evitar alteraciones en la estructura y propiedades del alimento (Calleja Pardo y col., 2002; Kumar & Belorkar, 2015).

El secado en lecho fluidizado también ofrece el beneficio de un control preciso sobre la temperatura de secado. Este control contribuye a una distribución homogénea del calor en la zona de trabajo, asegurando una transferencia de masa y energía altamente eficiente, lo que mejora la calidad del producto y acelera el proceso de deshidratación (Sivakumar y col., 2016; Unigarro Bolaños, 2017).

Desde ya, esta tecnología de secado puede tener algunas desventajas o dificultades, como por ejemplo: pérdida de material particulado de menor tamaño por arrastre, complicaciones en el control del proceso en sistemas particulados de tamaño muy heterogéneo, dado que se necesitan tiempos de residencia desiguales para tener secados uniformes, entre otras (Smith, 2007; De Prada Díaz, 2014).

I.3.1.1 Etapas del proceso

Cuando un fluido atraviesa un lecho de partículas en reposo a baja velocidad, fluye entre los espacios interpartícula sin desplazarlas, generando una caída de presión debido a la fricción. A medida que la velocidad del fluido aumenta, la fuerza de arrastre ejercida sobre las partículas se incrementa hasta igualar su peso aparente. En este punto, las partículas se reordenan para reducir la resistencia al flujo, aumentando su separación y dando lugar al estado de fluidización. La velocidad mínima requerida para alcanzar esta condición se denomina velocidad mínima de fluidización (U_{mf}). Si la velocidad del fluido es menor que U_{mf} , el lecho permanece fijo, pero al superarla, las partículas flotan hidrodinámicamente y adoptan una disposición más abierta con mayores espacios entre ellas (Toschi, 2020).

Si la velocidad del fluido continúa aumentando más allá de la condición de fluidización, la caída de presión se mantiene estable hasta que, al alcanzar un valor crítico, las partículas comienzan a ser arrastradas del lecho. Esto da lugar a la condición de transporte neumático, caracterizada por una disminución en la caída de presión debido a la pérdida de material sólido. La velocidad superficial mínima necesaria para que las partículas

sean arrastradas con la corriente gaseosa se conoce como velocidad terminal (U_t) y se define como el punto en el que la fuerza de arrastre del gas supera el peso de las partículas, provocando su transporte continuo a lo largo del flujo (Toschi, 2020). La Figura I-6 representa el comportamiento de un lecho de partículas para distintas velocidades del gas de entrada.

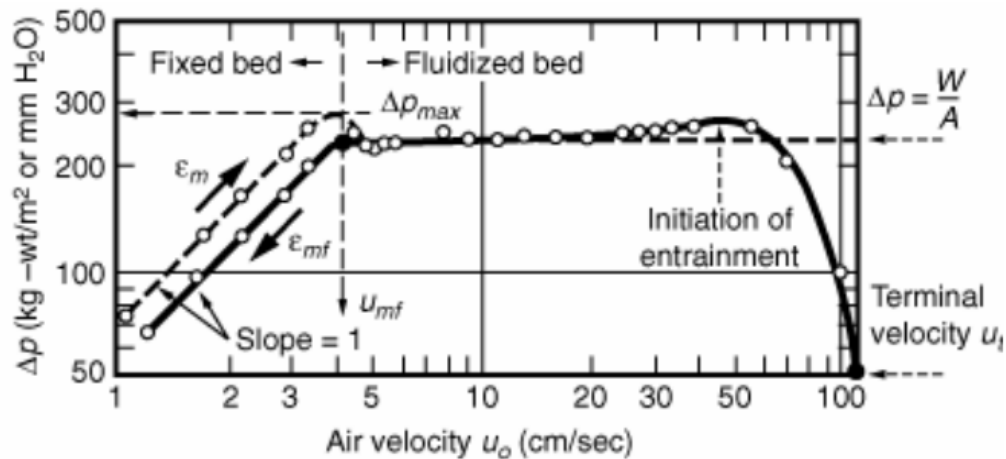


Figura I-6 Caída de presión en función de la velocidad de fluidización. Partículas de tamaño uniforme. Fuente: Kunii & Levenspiel (1991).

I.3.1.2 Clasificación de Geldart de partícula

Geldart (1973) estudió el comportamiento en cuanto a la fluidización de una gran variedad de sólidos de distintos materiales, logrando reconocer y definir cuatro grupos de partículas (grupos A, B, C y D), caracterizados por un diámetro medio de partícula y una diferencia de densidades entre la correspondiente a la partícula y la del agente fluidizante. Las partículas del *Grupo A* poseen baja densidad (menores a 1400 kg/m^3) y un diámetro promedio que varía entre 30 a $100 \mu\text{m}$, mientras que las del *Grupo B* presentan una densidad que está en el intervalo de 1400 a 4000 kg/m^3 y un diámetro promedio entre 40 a $500 \mu\text{m}$. A su vez, las partículas del *Grupo C* son las más pequeñas con un tamaño menor a $30 \mu\text{m}$ y finalmente, las partículas más densas y grandes de valores mayores a $500 \mu\text{m}$ corresponden al *Grupo D* (Figura I-7) (Toschi, 2020; Smith, 2007).

Grupo C: Las partículas son cohesivas o polvos. Es muy complicado lograr una fluidización porque las fuerzas entre partículas son difíciles de vencer y para poder fluidizarlas deben ser mezcladas con partículas de mayor tamaño.

Grupo A: Las partículas pueden ser aireadas, se fluidizan fácilmente. Se logra una fluidización suave a bajas velocidades y lechos burbujeantes controlados con pequeñas burbujas a altas velocidades. Pertenecen a este grupo las partículas que poseen una baja densidad de partícula y/o diámetros relativamente pequeños. La velocidad de mínimo burbujeo es mayor que la de mínima fluidización.

Grupo B: Estos sólidos se fluidizan bien, se forman burbujas vigorosas que crecen hasta tamaños importantes. Las burbujas aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización.

Grupo D: Con este tipo de sólidos se obtienen lechos de chorro estables (spouted beds). En general el gas se canaliza, y se requieren grandes caudales de aire para lograr la fluidización. En estos casos los lechos burbujeantes pueden lograrse si se utilizan lechos de poca altura y si la velocidad no es mucho mayor que la de mínima fluidización. Para evitar el slugging se diseña una parte superior del lecho con un área mayor. (Toschi, 2020; Smith, 2007).

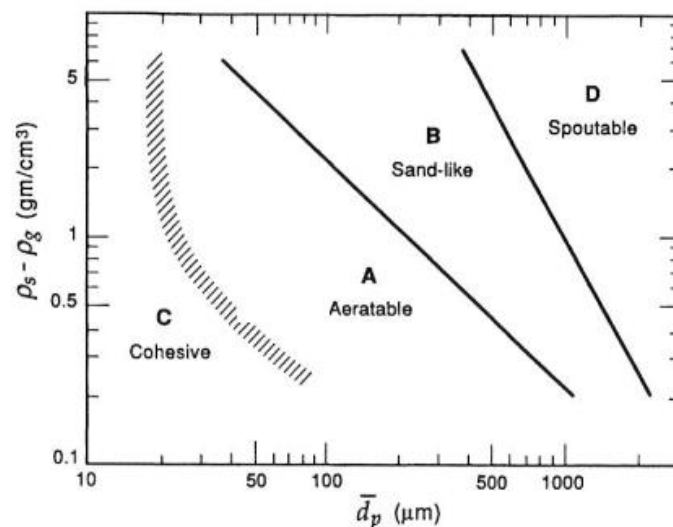


Figura I-7 Clasificación de partículas Geldart. \bar{d}_p = tamaño medio de las partículas.

$\rho_s = \rho_p$. Fuente: Kunii & Levenspiel (1991).

I.3.1.3 Balance de masa y energía en lecho fluidizado

Los procesos de secado involucran transferencia de masa y de energía. En la Figura I-8 se representan, para el caso de un lecho fluidizado, las corrientes materiales y energéticas a tener en cuenta para plantear el balance correspondiente.

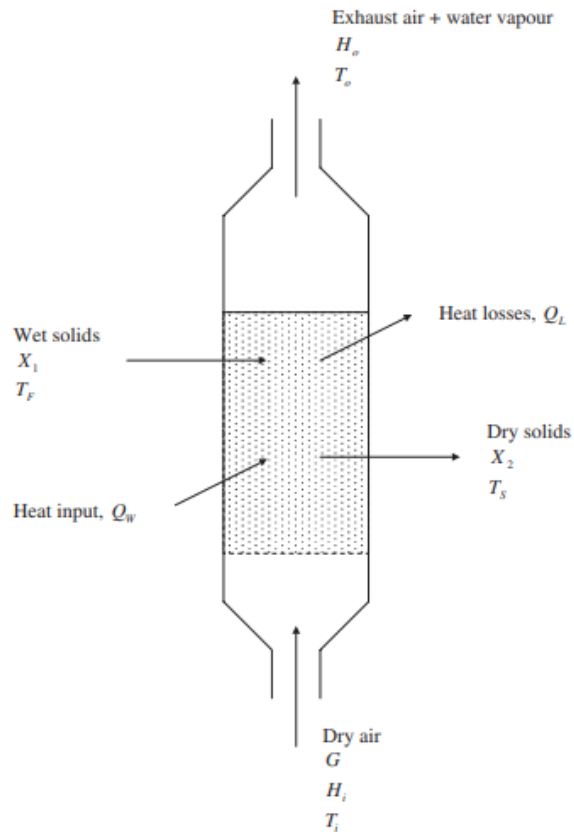


Figura I-8 Esquema de secado mediante lecho fluidizado: balance de materia y energía (extraído de Smith, 2007).

Para el caso del balance de masa se obtiene la siguiente ecuación:

$$W.(X_1 - X_2) = G.(H_o - H_i) \quad (1.7)$$

W = masa de sólido seco por unidad de tiempo.

G = caudal masico de aire.

X_1 = humedad del sólido inicial.

X_2 = humedad del sólido final.

H_i = Humedad absoluta del aire entrada

H_o = Humedad absoluta del aire salida

Por otro lado el balance de energía se expresa en la ecuación 1.8, la cual es una ecuación simplificada. Se tuvo en cuenta que, el cambio de entalpía de los sólidos, de la humedad asociada a ellos, y el calor sensible requerido para el cambio de temperatura del vapor de agua en la corriente gaseosa de salida resultan despreciables (Smith, 2007), obteniéndose:

$$G \cdot C_{p_{aire}} \cdot (T_i - T_o) \cong H_o \cdot G \cdot h_{fg} + Q_L \quad (1.8)$$

$C_{p_{aire}}$ = calor específico del aire.

T_i = temperatura entrada aire.

T_o = temperatura salida aire.

h_{fg} = calor latente de vaporización del agua.

Q_L = pérdidas de calor.

De esta manera, la variación de entalpía del aire (lado izquierdo de la ecuación 1.8) es aproximadamente igual al calor latente necesario para evaporar el agua, más las pérdidas de calor en el proceso.

II. OBJETIVOS

II.1 OBJETIVOS GENERALES

Estudiar, como proceso de secado específico, el secado en lecho fluidizado de residuos de pera generados por una conservera de la región del Alto Valle de Río Negro, combinados con distintos componentes alimenticios que permitan formular distintos productos finales con aporte de fibra dietaria.

II.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Abordar la temática de la revalorización de residuos generados en un proceso productivo en el marco de la Bioeconomía.
- 2) Obtener las cinéticas de secado de distintas formulaciones que tengan como componente principal residuo de pera, y analizar los fenómenos de transporte involucrados en el proceso de secado por lecho fluidizado.
- 3) Analizar las características fisicoquímicas y visuales, así como la composición de fibra dietaria y polifenoles de las formulaciones estudiadas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

III.1 Materiales

III.1.1 Materia prima

Se utilizaron residuos provenientes de la elaboración de conservas de pera, que fueron proporcionados por la empresa Ceres S.A., localizada en Gral. Enrique Godoy, provincia de Río Negro. Estos residuos obtenidos durante el pelado mecánico de la fruta, fueron pretratados mediante inmersión en una solución antipardeante de ácido ascórbico, y posteriormente prensados en un extractor en frío, permitiendo así la separación de jugo del bagazo. El bagazo obtenido, compuesto principalmente de cáscara y pulpa (denominado de aquí en adelante RP), se conservó a -20°C , previo a la formulación de la mezcla para pellets.

El bagazo se descongeló a baño maría, para luego ser procesado en conjunto con el ingrediente correspondiente (80 %m/m de bagazo y 20 % m/m de ingrediente). Se obtuvieron finalmente 4 formulaciones diferentes, cuyos ingredientes se detallan en la Tabla III-1.

Tabla III-1 Formulaciones correspondientes a los ingredientes adicionados y su nomenclatura

Formulación	Adición de Ingredientes	Nomenclatura de las formulaciones
1	Harina de Salvado de Trigo (HST)	RP-HST
2	Harina de Lupino (HL)	RP-HL
3	Harina de Arroz (HA)	RP-HA
4	Polvo de orujo de uva blanca (PO)	RP-PO



Figura III-1 Obtención del bagazo de pera y formulación de las mezclas para el pelletizado.

III.2 Métodos

III.2.1 Obtención de pellets

Se mezcló el bagazo de pera con los residuos de HST, HL, HA y PO para obtener las cuatro formulaciones antes mencionadas. Posteriormente, las mezclas fueron trituradas y homogeneizadas hasta formar una pasta uniforme, la cual se envolvió en nylon para conservar la humedad y se dejó reposar durante una hora para su estabilización. Luego, se utilizó un extrusor para realizar cortes estandarizados dando lugar a pequeños bastones o pellets de 2 cm de longitud y de área circular que fueron recolectados en canastas de acero inoxidable (Figura III-2).

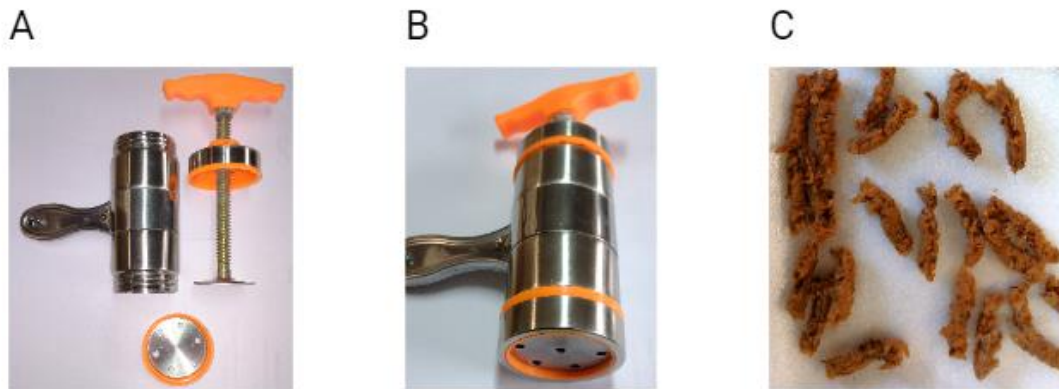


Figura III-2 Extrusor manual desarmado (A), extrusor manual armado (B) y representación de los pellets obtenidos (C).

III.2.2 Secado de pellets en lecho fluidizado

Se colocaron los pellets correspondientes a las formulaciones en una canasta y se pesaron utilizando una balanza electrónica instalada junto al equipo (WLC 2/A2 Radwag, Random, Polonia), corroborando que se alcancen los 10 g por canasta para cada formulación. Luego, se colocó la canasta con los pellets dentro del equipo de secado en lecho fluidizado.

El secado se realizó a tres temperaturas: 50°C, 60°C y 70°C con un n=2 ensayos independientes, en un equipo compuesto por un tubo acrílico de 5,2 cm de diámetro y 50 cm de altura, donde fue colocada la canasta metálica que contenía las distintas formulaciones. Este equipo presenta un sistema de filtrado del aire del ambiente y utiliza un compresor centrífugo (modelo 2RB-810-7AH16 propulsado por un motor de 5,5 kW/50Hz Greenco Industry Co.Ltd., Zeguo Town, Wenling City, China) que dirige el aire al calentador eléctrico de 1600 W el cual está regulado por un controlador PID para lograr la temperatura deseada, y luego lo impulsa hacia el tubo de acrílico. En la base del tubo de acrílico se encuentra una placa distribuidora de aire perforado que permite una distribución adecuada del aire sobre el compartimento del tubo de acrílico. En la parte superior del tubo se colocó un rejilla de retención (malla de alambre de acero inoxidable AISI 316 40) para evitar el arrastre de las partículas finas (Figura III-3) (Sozzi y col., 2021).

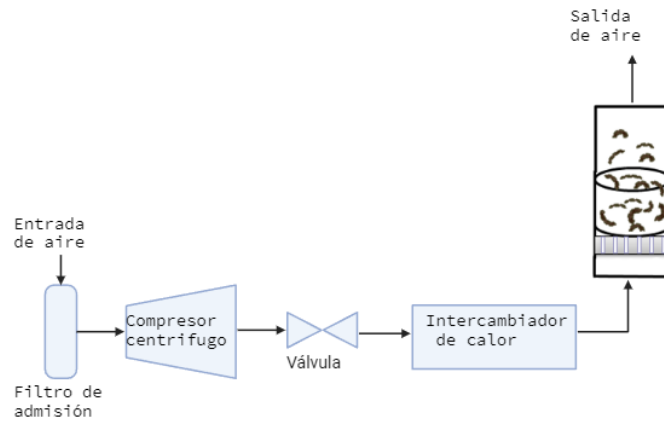


Figura III-3 Estructura del equipo de lecho fluidizado.

Durante el proceso de secado en lecho fluidizado, se controló la velocidad de trabajo, comenzando con una velocidad superficial inicial de aire caliente de aproximadamente 6 m/s para asegurar una adecuada fluidización. Esta variable se redujo de manera controlada hasta aproximadamente 4 m/s, en concordancia con la disminución de la densidad de la muestra. Asimismo, la masa de la canasta se registró en distintos intervalos de tiempo:

- cada un minuto, desde $t = 0$ min hasta $t = 4$ min.
- cada 2 min, desde $t = 4$ min hasta $t = 10$ min.
- cada 5 min, desde $t = 10$ min hasta $t = 30$ min.
- cada 10 min, desde $t = 30$ min hasta finalizar la curva de secado.

A su vez, cada determinación de la masa implicó una interrupción del proceso de fluidización de entre 5 y 10 segundos, finalizando el proceso cuando las muestras alcanzaron una masa constante.

III.2.3 Curvas de secado y modelado de los datos experimentales del secado

Se construyeron las curvas de secado de humedad vs. tiempo (X vs t) a las temperaturas trabajadas, calculando la humedad en base seca X , mediante la siguiente ecuación

(3.1):

$$X(t) = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa seca inicial}} \quad (3.1)$$

A partir de las curvas de secado correspondientes a $X(t)$ para las temperaturas estudiadas, se estableció el diferencial y se confeccionaron las curvas de velocidad de secado. A continuación, se ejemplifican las ecuaciones correspondientes a la construcción de las curvas de velocidad de secado.

$$\Delta X = X_i - X_{i+1} \quad (3.2)$$

$$\Delta t = t_i - t_{i+1} \text{ desde } i: (1:n) \quad (3.3)$$

$$-\frac{dX}{dt} = -\frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Para el modelado, se consideró el parámetro adimensional X^* que expresa el contenido de agua residual relativa en la muestra, y se define como $X^* = (X - X_e)/(X_0 - X_e)$, donde los valores de X_e corresponden a la humedad en base seca de equilibrio y resultan despreciables por lo que X^* se reduce a $X^* = X/X_0$, siendo X la humedad en base seca al tiempo (t) y X_0 la humedad en base seca inicial (Akgun & Doymaz, 2005; Thakor y col., 1999). Los ajustes de las curvas de secado se realizaron mediante los modelos matemáticos semiempíricos de Page (ecuación 3.5), Logarítmico (ecuación 3.6) y Henderson & Pabis (ecuación 3.7); utilizando el programa OriginPro 2016. Al tratarse de modelos empíricos, éstos sólo pueden describir el comportamiento de secado para condiciones experimentales, es decir, que al no proponer un mecanismo en cuanto a la migración de agua en el interior del alimento durante el proceso de secado, no poseen un significado físico. Sin embargo, han sido ampliamente utilizados para explicar y predecir el secado de alimentos y materiales biológicos, con buena precisión (Maidana, 2017).

$$X^* = \frac{X}{X_0} = \exp(-k \cdot t^n) \quad (3.5)$$

$$X^* = \frac{X}{X_0} = A \cdot \exp(-k \cdot t) + C \quad (3.6)$$

$$X^* = \frac{X}{X_0} = A \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (3.7)$$

Donde:

t= tiempo (s).

k= constante cinética de velocidad de secado (1/h).

n, A, C= parámetros empíricos de ajuste (adimensionales).

III.2.4 Selección de condición de secado y producción de pellets

Al ajustar las curvas de secado con los modelos utilizados, se obtuvieron los valores de k, n, A y C según corresponda, para cada condición de temperatura y formulación. Con dichos resultados se determinó cuál fue el modelo que ajustó de manera más adecuada a las cinéticas de secado. Luego, se utilizó dicho modelo para analizar y seleccionar la mejor condición de secado entre las estudiadas. Para realizar dicha selección se puso el foco en el requerimiento energético del proceso de secado, buscando seleccionar aquella condición que tienda a minimizarlo. En este sentido, se tuvieron en cuenta los tiempos de secado hasta una determinada humedad objetivo (h_0) común de $0,2 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ para todas las muestras, y para cada temperatura de secado ensayada. Por otro lado, se supusieron iguales condiciones del aire tomado del ambiente (agente fluidizante), seleccionándose una temperatura del aire de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a los fines del análisis. De esta manera, se pudo estimar de forma comparativa y aproximada el incremento energético de la corriente de aire, durante todo el tiempo que involucró el proceso de secado hasta alcanzar la humedad objetivo, seleccionando aquella condición donde la energía requerida fuera menor.

Para realizar la comparación se propuso el índice de Relación Energética Comparativa para cada temperatura de secado (REC_{Ts}) definida como:

$$REC_{Ts} = \frac{\Delta\dot{H}_{Ts} \cdot t_{Ts}}{\Delta\dot{H}_{50} \cdot t_{50}} \quad (3.8)$$

Donde $\Delta\dot{H}_{Ts}$ es la variación de entalpía del aire desde la temperatura de ingreso hasta la temperatura de secado (T_s), y $\Delta\dot{H}_{50}$ es la variación de entalpía del aire desde la temperatura de ingreso hasta la temperatura de $50 \text{ }^\circ\text{C}$, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\dot{H}_{Ts} = \dot{m}_{\text{aire}} C_{p_{\text{aire}}} (T_s - T_{\text{entrada}}) \quad (3.9)$$

$$\Delta\dot{H}_{50} = \dot{m}_{\text{aire}} C_{p_{\text{aire}}} (50 \text{ }^\circ\text{C} - T_{\text{entrada}}) \quad (3.10)$$

Así, el índice REC_{TS} se calculó para cada muestra por separado, y para cada una de ellas se buscó aquella condición en la que el índice fuera menor.

Una vez seleccionada la temperatura de trabajo, se repitió el proceso con $n=10$ ensayos independientes para las 4 formulaciones, hasta alcanzar un total de 35 g aproximadamente de producto final de cada una de ellas. Sobre estos productos obtenidos se realizaron los análisis que se detallan en las secciones que siguen a continuación.

III.3 Análisis de propiedades fisicoquímicas

III.3.1 Humedad y a_w

Se determinó la actividad acuosa (a_w) usando un medidor electrónico con punto de rocío Aqualab (Serie 3TE Decagon devices, Washington, EEUU), previamente calibrado con soluciones salinas saturadas. Las determinaciones de la actividad acuosa se realizaron a 25 °C. Esta determinación se realizó con $n=3$ ensayos independientes para cada formulación.

La humedad en el alimento se estableció mediante la determinación de la pérdida de peso de las formulaciones, utilizando una balanza Entris modelo BCE (Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Goettingen, Germany) y una estufa de convección por aire caliente Venticell 111 Standard (MMM Medcenter Einrichtungen GmbH, Munich, Germany), a una temperatura de $105 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 h. Esta determinación se realizó con $n=3$ ensayos independientes para cada formulación.

III.3.2 Determinación del tamaño y estructura de los pellets

La determinación del tamaño y estructura de los pellets obtenidos luego del secado óptimo a 70°C , se realizó mediante un análisis de imágenes bidimensionales. Estas imágenes bidimensionales capturan el área principal de la forma tridimensional de los pellets, resultando útiles para caracterizar la muestra (Sozzi y col, 2021). Para ello, se tomaron tres fotografías utilizando un celular Motorola G 52 en fondo blanco, para cada formulación, conteniendo aproximadamente entre 30 a 50 partículas. Asimismo, se incluyó una imagen de referencia de área conocida para realizar la conversión de píxeles a milímetros. Una vez obtenidas las imágenes, las mismas se procesaron con la herramienta Image Processing

Toolbox de MATLAB. En primer lugar, para mejorar el contraste se realizó una conversión de RGB a escala de grises y se generaron imágenes binarias, que permitieron la determinación del área, perímetro y longitud de los ejes mayor y menor de las partículas. A partir de esta información, se estableció el diámetro medio de Sauter (d_{sv}) (ecuación 3.11).

$$d_{sv} = \frac{\sum n_i^* d_i^3}{\sum n_i^* d_i^2} \quad (3.11)$$

Donde:

n_i^* = número de partícula del intervalo i .

d_i = diámetro medio de la partícula en el intervalo i .

III.3.3 Determinación de la morfología, densidad y la porosidad de los pellets

Densidad de partícula (ρ_p), densidad absoluta (ρ_a) y Porosidad porcentual ($\epsilon_p\%$)

La densidad de partícula se calculó a partir de la determinación de la masa (W_p) y el volumen hidrodinámico de las partículas. Se utilizó un picnómetro de mercurio Purcell Ruska, y una balanza. Con estos datos, se calculó la densidad de las partículas (ρ_p) aplicando la ecuación 3.12.

La densidad absoluta se calculó luego de medir el volumen de las partículas (V_a) mediante un picnómetro de gas de helio modelo PB2. A partir de este valor y el W_p , se calculó la densidad absoluta (ρ_a) utilizando la ecuación 3.13.

$$\rho_p = \frac{W_p}{V_p} \quad (3.12)$$

$$\rho_a = \frac{W_p}{V_a} \quad (3.13)$$

Donde:

V_p : volumen hidrodinámico de la partícula (m^3).

W_p : masa de la muestra (kg).

V_a : volumen absoluto (m^3).

A partir de la determinación de la ρ_p y ρ_a se cuantificó la porosidad porcentual ($\varepsilon_{p\%}$) de las partículas en las cuatro formulaciones, utilizando la ecuación 3.14.

$$\varepsilon_{p\%} = \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_a}\right) \cdot 100 \quad (3.14)$$

Morfología de partículas

La morfología de las partículas se analizó de acuerdo a Sozzi y col., (2021). Se esparcieron los pellets sobre una superficie ligera y se tomaron imágenes representativas de los mismos utilizando un microscopio estereoscópico Nikon SMZ 7457 (Nikon, Tokio, Japón) que contaba con un rango de zoom de 0,65-5X y una distancia de trabajo de 115 mm, acoplado a una cámara Digital Slight DS-Fi1. Se tomaron imágenes por duplicado a 0,67X y 1X de las cuatro formulaciones; y se realizó un análisis cualitativo que permitió evaluar la superficie de los pellets, la formación de costra superficial y la porosidad (tamaño e interconexión de poros). Se realizó una comparación cualitativa de estas características entre las distintas formulaciones.

III.3.4 Estimación de la velocidad mínima de fluidización, velocidad terminal y clasificación de Geldart

En este trabajo, la U_{mf} de los pellets se estimó utilizando la correlación (3.15) propuesta por Paudel & Feng (2013), desarrollada para sistemas particulados de biomasa. Cabe aclarar que la velocidad mínima de fluidización estimada corresponde a la de los pellets secos; es decir al final del proceso de secado.

$$Re_{mf} = [30.28^2 + 0.108Ar]^{1/2} - 30.28 \quad (3.15)$$

Siendo Re_{mf} el número de Reynolds en la condición de velocidad mínima de fluidización, y Ar el número de Arquímedes:

$$Re_{mf} = \frac{U_{mf}\rho_g d_p}{\mu_g} \quad (3.16)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (3.17)$$

En cuanto a la velocidad terminal (U_t), esta fue evaluada según lo propuesto por Haider y Levenspiel (1989). Para este fin, se utilizó el diámetro medio de Sauter de la distribución del tamaño de partícula.

Por otro lado, para llevar adelante la clasificación de Geldart, se utilizó el diámetro medio de Sauter de cada sistema particulado y la diferencia entre la densidad de partícula aparente y la densidad del agente fluidizante (aire a la temperatura de secado).

III.4 Contenido de fibra y polifenoles

Fibra dietaria total (FDT), insoluble (FDI) y soluble (FDS)

La determinación de Fibra Dietaria Total (FDT) y de la Fibra Dietaria Insoluble (FDI) se realizó mediante el método enzimático-gravimétrico utilizando el kit magazine (AACC 32-05), siguiendo la técnica 991.43 (AOAC, 1997). Los residuos digeridos, filtrados y secados fueron seleccionados según el contenido remanente de proteínas, siguiendo las indicaciones del protocolo. La determinación de Fibra Dietaria Soluble (FDS) se calculó mediante la diferencia entre la fibra total y la insoluble, utilizando la ecuación 3.18.

$$FDS = FDT - FDI \quad (3.18)$$

Polifenoles totales (PT)

El contenido de polifenoles se cuantificó utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu compuesto por ácido fosfotúngstico y ácido fosfomolibdico, haciendo uso del método de Singleton y Rossi (1965). Para la extracción de polifenoles se tomó 1 g de pellets previamente molido y se realizaron 3 extracciones sucesivas con metanol puro como solvente: se adicionaron inicialmente 7,5 ml de solvente homogeneizado con agitación constante durante 5 min y se filtró la muestra. Se repitió la extracción dos veces más sobre el remanente sólido, adicionando 7,5 y 10 ml de solvente, respectivamente. Las soluciones filtradas se juntaron, llevando a un volumen final de 25 ml. Los compuestos polifenólicos generaron la reducción del reactivo en medio alcalino y el viraje en el color del mismo, que fue cuantificado en un espectrofotómetro modelo UV / Vis 1700 (Metrolab Instruments, Buenos Aires, Argentina) a 765 nm. Se estableció la concentración de PT mediante extrapolación con una curva estándar de ácido gálico (Ronchi, 2018).

III.5 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el software Statgraphics Centurion 2016. Se evaluó por triplicado cada determinación y los resultados se expresaron como la media \pm desvío estándar.

Para las curvas de secado se realizó un análisis de la varianza (ANOVA SIMPLE) para ver las diferencias significativas de los parámetros de ajuste con un nivel de significancia de 5% ($p < 0,05$). En la comparación de las muestras obtenidas se utilizó el test de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0,05$.

Los modelos seleccionados se ajustaron a curvas de secado y los parámetros del modelo se determinaron mediante un análisis de regresión de mínimos cuadrados no lineal. La bondad del ajuste se evaluó a través del coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el Chi cuadrado reducido (χ^2).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{exp,i} - X_{pre,i}) \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N - z} \left[\sum_{i=1}^N (X_{exp,i} - X_{pre,i})^2 \right] \quad (3.20)$$

Donde:

$X_{exp,i}$: contenido de humedad experimental.

$X_{pre,i}$: contenido de humedad predicho con cada modelo matemático.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 Cinética de Secado

A continuación, se analizarán distintos resultados obtenidos que permitirán abordar en detalle la cinética de secado de los bastones de fibra producidos a partir de las cuatro formulaciones estudiadas: RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO. La Figura IV-1 presenta los resultados experimentales de disminución de humedad de las muestras frente al avance del tiempo de secado, a las tres temperaturas ensayadas en simultáneo, y para cada formulación por vez.

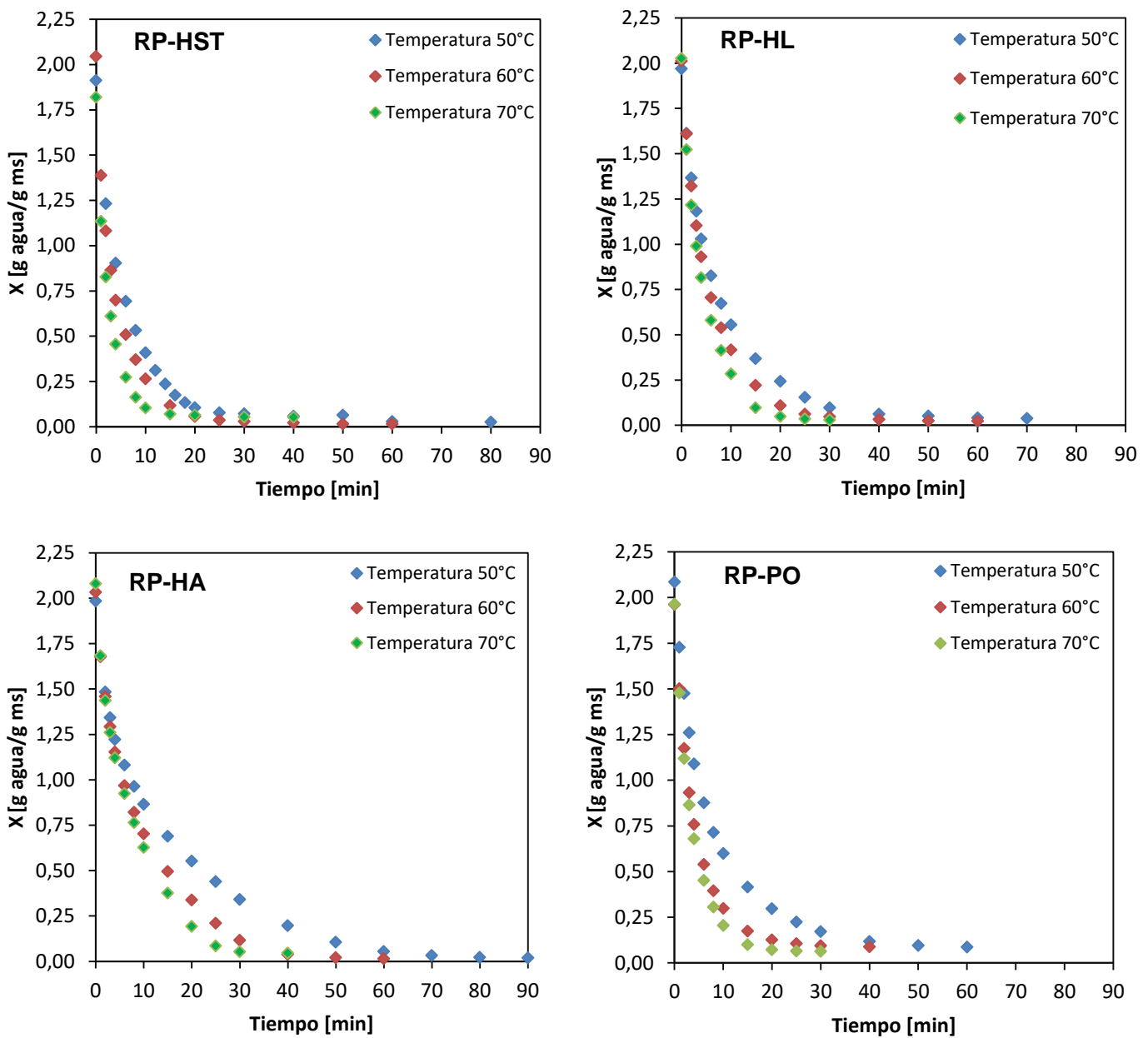


Figura VI -1 Curvas de secado para los pellets a partir de las cuatro formulaciones RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO a diferentes temperaturas: 50 °C, 60°C y 70°C.

En dichas figuras pudo corroborarse para todas las formulaciones que, al incrementar la temperatura del aire, aumentó la velocidad de secado impactando en una disminución de los tiempos del proceso. Este efecto fue el esperable, siendo consistente con resultados experimentales de investigaciones previas (Zambon y col., 2019; Sozzi y col., 2021). De manera complementaria, en la Figura IV-2 se comparan las cuatro formulaciones en simultáneo para cada temperatura ensayada por vez.

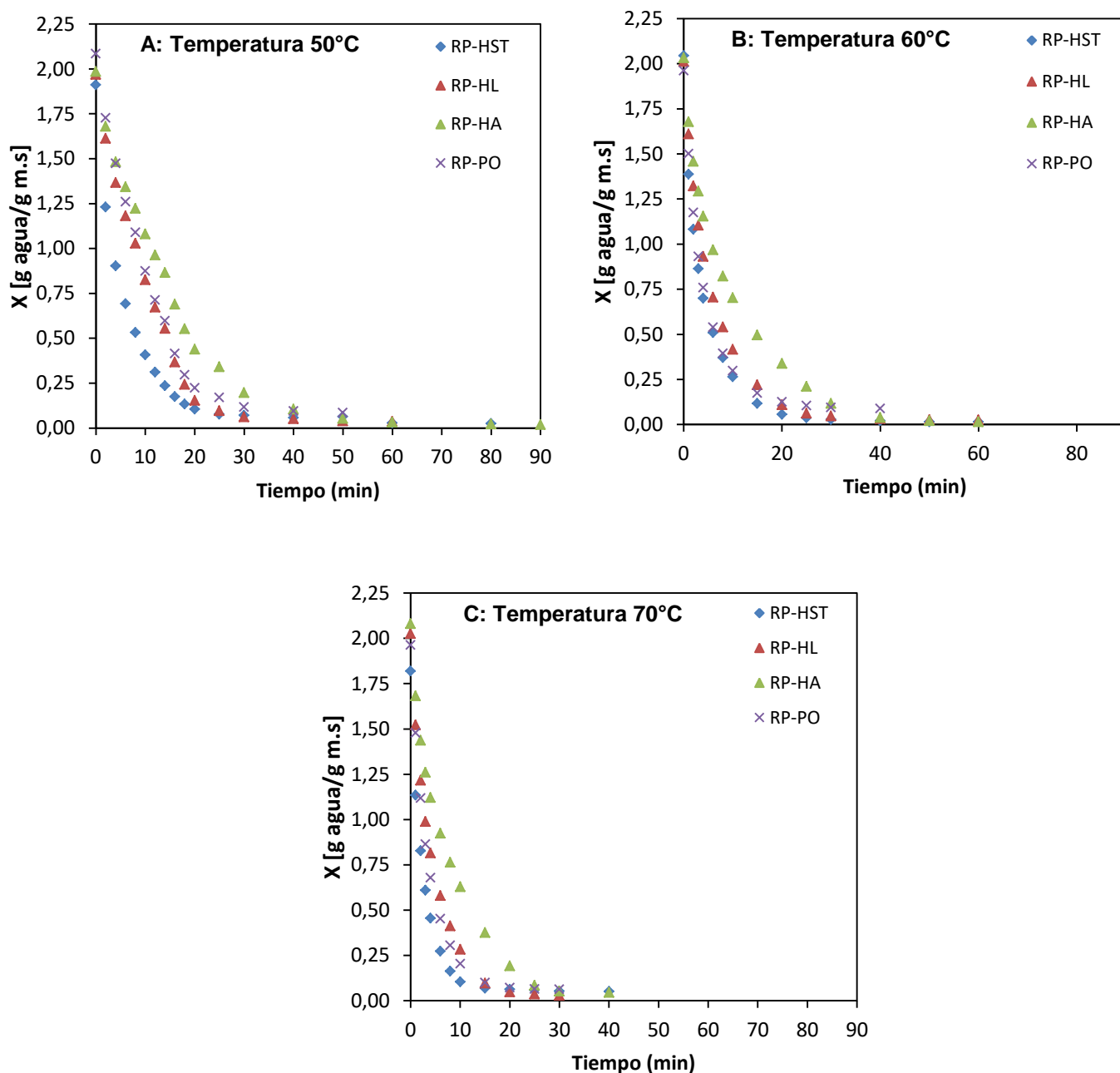


Figura IV- 2 Curvas de secado para las formulaciones de RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO a cada temperatura ensayada (A-50°C; B-60°C; C-70°C).

Aquí pudo observarse que la formulación RP-HA presentó una disminución de humedad más gradual durante todo el proceso, mientras que la formulación de RP-HST presentó una reducción de humedad más pronunciada, encontrándose las muestras RP-HL y RP-PO en una situación intermedia.

Con el objetivo de profundizar el análisis de las cinéticas, se graficó la variación de la velocidad de secado frente a la reducción de humedad de las muestras para cada formulación (Figura IV-3). En primer lugar, esto permitió observar que, para todas las temperaturas ensayadas, ninguna de las formulaciones presentó un periodo de velocidad de secado constante, evidenciándose desde el comienzo que la velocidad de secado fue decreciente. Este resultado general, y común a todos los ensayos, permitió asumir que el proceso de secado estuvo controlado por difusión interna a través de la estructura sólida de cada muestra (Carrín & Crapiste, 2009; Sozzi y col., 2021). Por otro lado, pueden distinguirse diferencias entre las distintas formulaciones. Por ejemplo, la velocidad inicial de secado correspondiente a la muestra RP-HA fue, en general, menor que el resto de las velocidades iniciales, y a su vez el efecto del incremento de temperatura sobre la velocidad de secado incidió en menor medida que en el resto de las muestras. En el otro extremo se ubicó la muestra RP-HST, mostrando las mayores velocidades de secado iniciales y el mayor efecto sobre dichas velocidades al incrementar la temperatura. En el caso de las muestras RP-PO y RP-HL, puede observarse que presentan un comportamiento intermedio, relativo a las otras. De manera complementaria, en el apartado de anexo (ver Figura VIII-1) se presentan las curvas de velocidad de secado a cada temperatura para las cuatro formulaciones en forma simultánea, con el objetivo de ampliar la información y facilitar la comparación del comportamiento entre ellas.

De todo lo expuesto anteriormente, puede observarse que, aunque existen tendencias generales comunes a las distintas muestras (el 80 % de la masa de los pellets fue residuo de pera), la matriz alimenticia agregada para formular los pellets afectó sensiblemente el proceso de secado. En las secciones siguientes se profundizará el análisis de este punto.

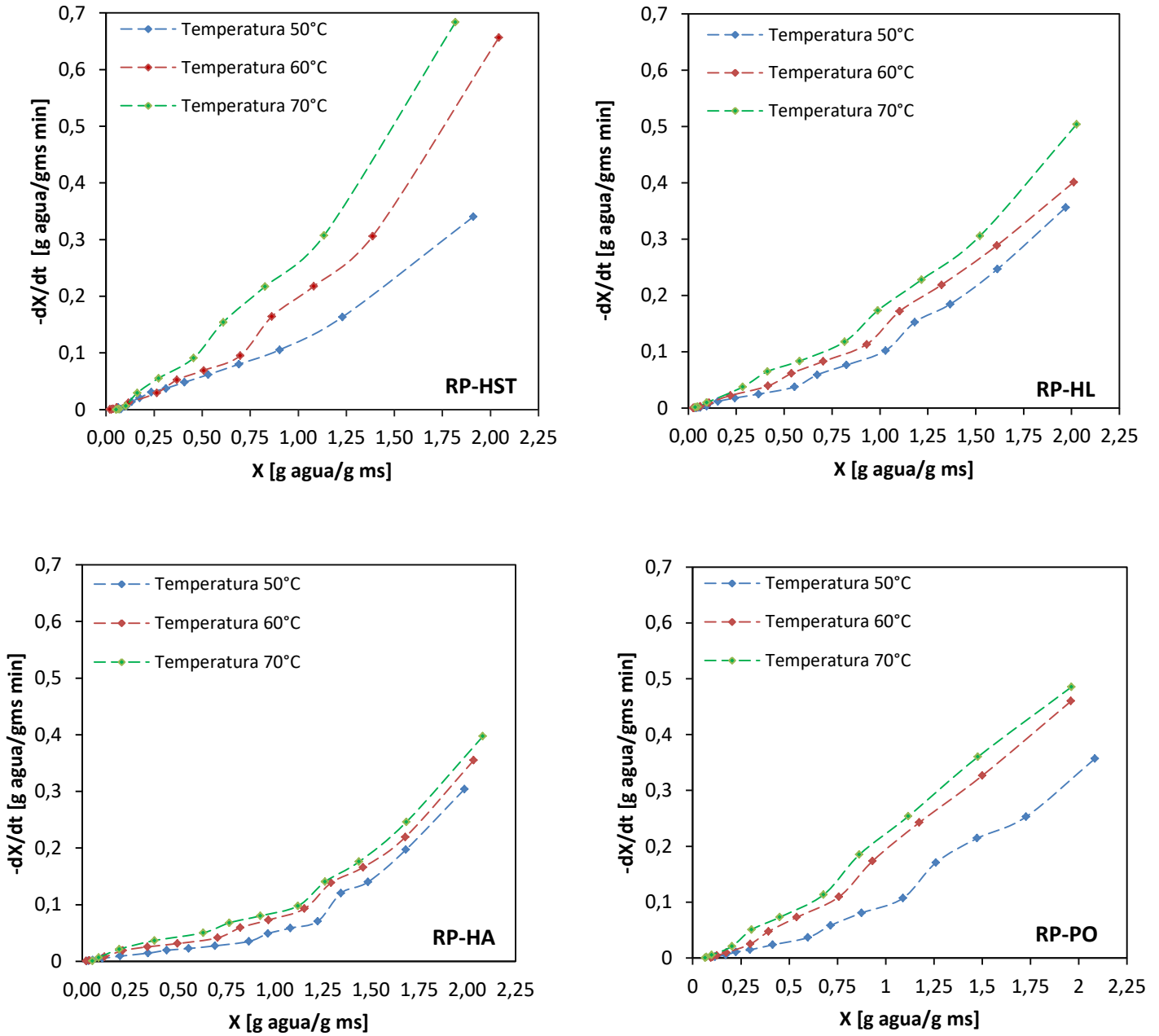


Figura IV- 3 Velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca para las formulaciones con RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO, secadas a diferentes temperaturas: 50°C, 60°C y 70°C.

IV.2 Modelado matemático de las curvas de secado

Los resultados experimentales correspondientes a las cinéticas de secado de las distintas muestras, y a las tres temperaturas ensayadas, fueron ajustados mediante tres modelos semiempíricos: modelo de Page, modelo Logarítmico, y el modelo de Henderson & Pabis. Cabe aclarar que, dada la gran cantidad de información en formato de gráficos, tablas con parámetros de ajuste y estadísticos que indican la bondad de los mismos; junto a la necesidad de focalizar la discusión de los resultados sobre los aspectos más relevantes, se decidió presentar aquí la información del modelo que mejor ajustó (Page), derivando la información completa del resto de los modelos al apartado de anexos.

La Figura IV- 4 muestra las curvas correspondientes al ajuste mediante el modelo de Page, a las tres temperaturas ensayadas en simultáneo, y para cada formulación por vez. Adicionalmente, en la Tabla IV-1 se presentan los parámetros de dicho modelo, junto con los estadísticos que reflejan la bondad de cada ajuste. Aunque todos los modelos evaluados mostraron resultados aceptables en términos de R^2 y χ^2 , el modelo de Page proporcionó una mejor aproximación a las cinéticas de secado de las formulaciones a las tres temperaturas ensayadas. Esto último es compatible con resultados obtenidos por Sozzi y col., (2021) en secado en lecho fluidizado de residuos de mora, donde se observó que el modelo de Page presentó un mejor ajuste bajo todas las condiciones de temperatura evaluadas (50, 60 y 70 °C), en comparación con el modelo Logaritmo.

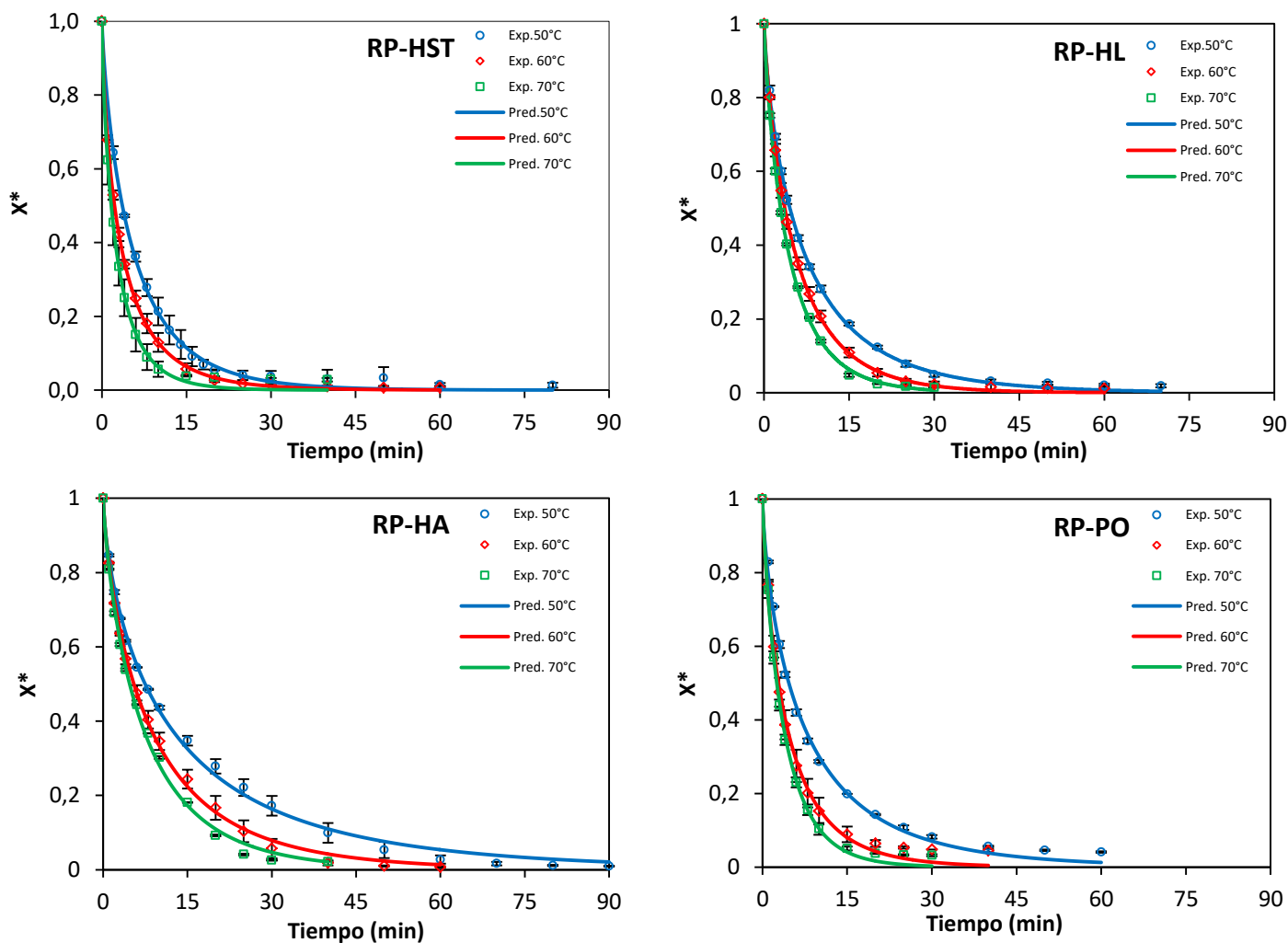


Figura IV- 4 Curva de humedad promedio vs tiempo modelada con Page y formulada con RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO a diferentes temperaturas 50 °C, 60°C y 70°C.

El hecho de que los modelos semiempíricos logran un ajuste adecuado a los datos experimentales resultó sumamente beneficioso para el estudio del secado en lecho fluidizado, especialmente considerando la complejidad geométrica y estructural de la materia prima. Al tratarse de residuos mezclados con distintas harinas y formando pellets irregulares, el proceso de secado presenta una gran variabilidad. Este enfoque permitió abordar la cinética y la velocidad de secado de manera efectiva, evitando la necesidad de recurrir a modelos matemáticos más complejos, como los derivados del análisis teórico basado en la segunda ley de Fick, cuya aplicación resulta considerablemente más desafiante (Maidana, 2017).

Tabla IV-1. Parámetros de ajuste obtenidos a partir del modelo semi- empírico de Page utilizado para las curvas de secado de la formulación de RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO.

Page	Temperatura de secado [°C]		
	50	60	70
RP-HST			
k	0,24 ± 0,01 ^a	0,39 ± 0,006 ^{ab}	0,48 ± 0,1 ^b
n	0,81 ± 0,05 ^a	0,72 ± 0,003 ^a	0,77 ± 0,04 ^a
R²	0,996	0,999	0,997
X²	0,00032	0,00004	0,00029
RP-HL			
k	0,22 ± 0,008 ^a	0,24 ± 0,01 ^a	0,28 ± 0,009 ^b
n	0,76 ± 0,004 ^a	0,83 ± 0,004 ^b	0,84 ± 0,02 ^b
R²	0,999	0,999	0,999
X²	0,00009	0,00005	0,00005
RP-HA			
k	0,17 ± 0,007 ^a	0,19 ± 0,001 ^b	0,20 ± 0,003 ^b
n	0,69 ± 0,03 ^a	0,76 ± 0,03 ^{ab}	0,80 ± 0,004 ^b
R²	0,997	0,998	0,997
X²	0,00031	0,00020	0,00029
RP-PO			
k	0,23 ± 0,008 ^a	0,31 ± 0,02 ^b	0,31 ± 0,02 ^b
n	0,72 ± 0,01 ^a	0,78 ± 0,03 ^b	0,86 ± 0,008 ^c
R²	0,997	0,995	0,997
X²	0,00035	0,0006	0,00027

Valores expresados como media ± desvío estándar. Diferentes letras en una misma columna indican diferencias significativas entre medias ($p < 0,05$).

Utilizando las funciones obtenidas mediante el ajuste del modelo de Page es posible profundizar el análisis de las cinéticas de secado iniciado en la sección anterior. En primer lugar, se calculó el tiempo necesario para alcanzar una humedad de $0,2 \text{ kg de agua/kg}_{ms}$, para una misma muestra, variando la temperatura. Para el caso de la muestra RP-HST los tiempos fueron $t \approx 15,81 \text{ min}$ (50°C), $t \approx 11,90 \text{ min}$ (60°C), $t \approx 7,46 \text{ min}$ (70°C); es decir, reducciones de 24,7 % y de 37,3% en cada salto térmico. En cambio, la muestra RP-HA arrojó los siguientes resultados: $t \approx 42,30 \text{ min}$ (50°C), $t \approx 26,64 \text{ min}$ (60°C), $t \approx 21,49 \text{ min}$ (70°C); siendo las reducciones de 37,02 % y de 19,33 % en cada incremento de temperatura. Estas dos muestras fueron, como se observó en la sección anterior, las que se ubicaron en los dos extremos en el proceso de secado, mostrando resultados intermedios las muestras RP-HL y RP-PO. Adicionalmente, es posible comparar en términos cuantitativos el efecto de la formulación y de la temperatura sobre el parámetro k del modelo de Page. Dicho parámetro fue mayor, en general, para la muestra RP-HST, y menor en el caso de la muestra RP-HA. Además, se incrementó al elevar los niveles térmicos: para el caso de la muestra RP-HST el incremento del parámetro k fue de un 61 % al pasar de 50°C a 60°C , y luego de un 29 % al

pasar de 60 °C a 70 °C (Tabla IV-1), y en el caso de la muestra RP-HA el parámetro k se incrementó un 9,8 % (50 °C a 60 °C) y un 5,8 % (60 °C a 70 °C).

De esta manera, es posible reafirmar que la matriz alimenticia agregada al residuo de pera al formular los pellets afectó al proceso de secado, evidenciándose tanto al comparar las distintas formulaciones para un mismo nivel térmico, como así también el efecto del incremento de la temperatura sobre las velocidades y tiempos de secado. Esto sugiere la necesidad de indagar sobre características estructurales de los bastones que pudieran estar afectando la difusión interna de humedad.

IV.3 Selección de condición de secado y producción de pellets

En la sección anterior se extrajo como una de las conclusiones de los resultados que el modelo de Page fue el que proporcionó el mejor ajuste; por tal motivo, fue el modelo que se utilizó para analizar y seleccionar la condición de secado más adecuada entre las estudiadas. Para realizar dicha selección se puso el foco en el requerimiento energético del proceso de secado, buscando seleccionar aquella condición que tienda a minimizarlo, proponiendo un índice denominado “relación energética comparativa” para cada temperatura de secado (REC_{TS}), como fuera detallado en la sección III.2.4 de materiales y métodos.

El índice REC_{TS} se calculó para cada muestra por separado, y para cada una de ellas se buscó aquella condición en la que el índice fuera menor. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla IV-2, pudiendo observarse que para las muestras RP-HST, RP-HL y RP-PO el menor índice REC_{TS} se obtuvo para la temperatura de secado de 70 °C. En el caso de la muestra RP-HA, el índice fue menor al secar a 60 °C, aunque la diferencia fue mínima frente al índice para la temperatura de 70 °C. En este marco, se optó por seleccionar para todas las muestras la temperatura de 70 °C como temperatura de secado para la producción de pellets, unificando esta variable de proceso y facilitando la posterior comparación de propiedades determinadas en los productos obtenidos.

Tabla IV-2 Tabla de resultados obtenidos del índice de REC_{Ts} .

Muestra	T_s (°C)	Tiempo hasta h_0 (min)	REC_{Ts}
RP-HST	50	15,81	1,00
	60	11,90	1,00
	70	7,46	0,79
RP-HL	50	21,96	1,00
	60	15,61	0,95
	70	12,18	0,92
RP-HA	50	42,30	1,00
	60	26,64	0,84
	70	21,49	0,85
RP-PO	50	25,30	1,00
	60	13,21	0,70
	70	10,14	0,67

IV.4 Caracterización estructural de los pellets: tamaño de partículas, densidad, porosidad y morfología

Previo a la caracterización estructural de los sistemas particulados obtenidos, es conveniente mencionar algunas observaciones cualitativas preliminares relacionadas con la pegajosidad entre los bastoncitos y la integridad estructural de los mismos. Las formulaciones de RP-HST y RP-PO presentaron baja pegajosidad entre bastoncitos, y la muestra RP-HL mostró un nivel intermedio. Esto facilitó su manipulación y posterior fluidización. En cambio, la muestra RP-HA destacó por su alta pegajosidad, propiciando una mayor tendencia a la aglomeración y dificultando la fluidización al inicio del proceso de secado. Sin embargo, estos últimos mostraron una buena integridad estructural, lográndose pellets más homogéneos con bajo grado de fragmentación o generación de finos durante el proceso de secado. En el caso de las muestras RP-HST y RP-HL, también se formaron pellets con buena integridad estructural, aunque durante la fluidización se evidenció algo de generación de finos. Por su parte, la formulación RP-PO mostró dificultades en la cohesión de los pellets al no poder retener parte de la humedad de la mezcla en la etapa de compresión de la masa para formar los bastoncitos, dando como resultado mayor fragmentación y generación de finos durante la fluidización.

La Figura IV-5 permite observar muestras de los bastones de fibra correspondientes de las cuatro formulaciones analizadas después del proceso de secado en lecho fluidizado a la temperatura seleccionada de 70°C. Estas imágenes fueron utilizadas para realizar el análisis de tamaños de

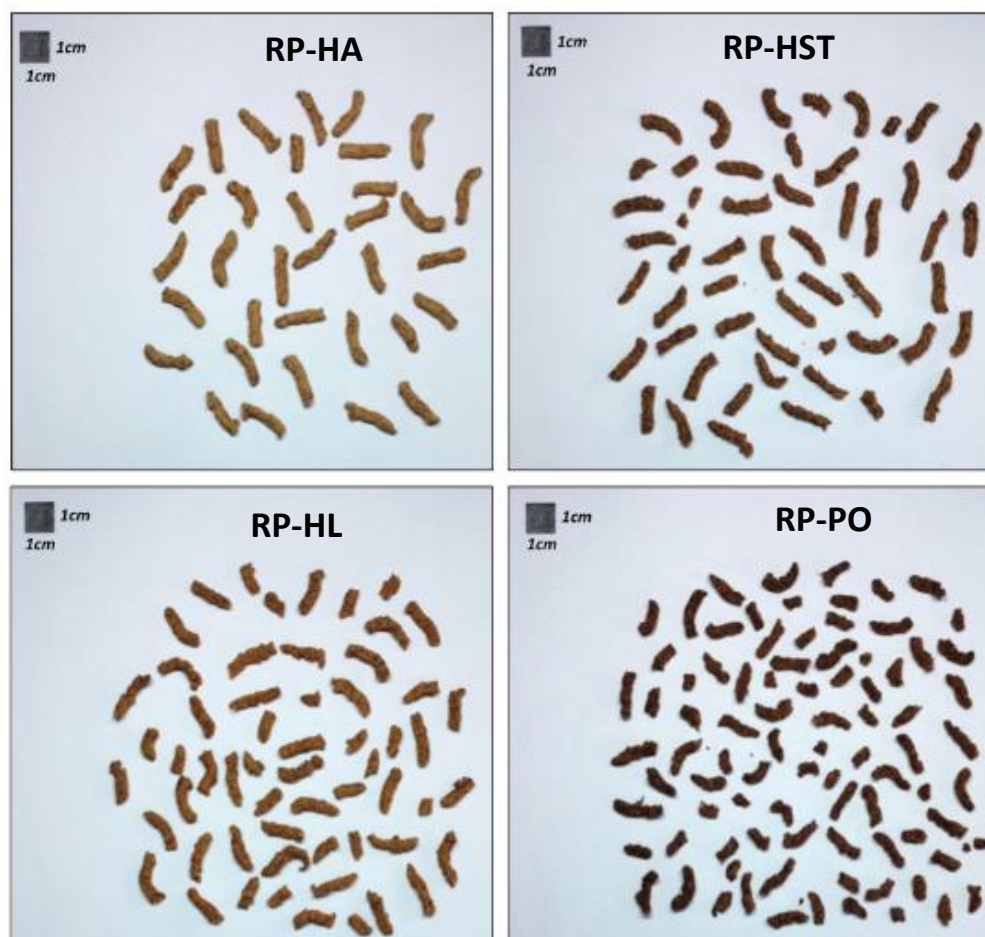


Figura IV-5 Bastones de fibra correspondientes de las cuatro formulaciones.

partículas mediante técnicas de procesamiento de imágenes (ver sección III.3.2). A priori, puede apreciarse cualitativamente lo mencionado anteriormente; es decir, que la muestra RP-PO es la que más se fragmentó, las muestras RP-HST y RP-HL lo hicieron en menor medida, mientras que la muestra RP-HA mantuvo su integridad estructural. Esto se puede observar cuantitativamente en los resultados del diámetro de Sauter (Tabla IV-3), siendo mayor para RP-HA, seguido por RP-HST (aunque estadísticamente la diferencia no es significativa), luego RP-HL, y finalmente RP-PO.

En la Tabla IV-3 también se presentan resultados diámetro de Sauter (d_{sv}); densidades absoluta (ρ_a); de partícula (ρ_p); y de porosidad porcentual de las partículas ($\epsilon_p\%$). Puede observarse que la muestra RP-HA fue la más densa (ρ_a de 1513 kg/m^3),

además de haber sido la de mayor tamaño. Esto sumado a la pegajosidad inicial de los bastones, explica que haya sido la formulación más difícil de fluidizar. Por el contrario, la muestra RP-HST fue la menos densa, tanto en términos de ρ_a (1390 kg/m^3) como ρ_p (852 kg/m^3), lo cual sumado a su baja pegajosidad, contribuyó a que fuera la muestra que mejor fluidizó. Respecto a la porosidad, cabe destacar que tres de las cuatro formulaciones no presentaron diferencias significativas entre sí, siendo levemente menor la porosidad de la muestra RP-PO ($36,2 \pm 1,2$) % frente a las restantes.

Tabla IV-3 Resultados obtenidos respecto a los diámetros de Sauter, densidades (real y aparente) y porosidad porcentual de las partículas.

Muestra	d_{sv} (mm)	ρ_a [kg/m^3]	ρ_p [kg/m^3]	$\epsilon_{p\%}$
RP-HST	$10,3 \pm 0,2^c$	$1390 \pm 0,4^a$	$852 \pm 0,8^a$	$38,7 \pm 0,8^b$
RP-HL	$9,8 \pm 0,1^b$	1474 ± 19^b	897 ± 20^b	$39,2 \pm 0,6^b$
RP-HA	$10,7 \pm 0,1^c$	$1513 \pm 0,2^c$	$918 \pm 0,3^{bc}$	$39,3 \pm 0,1^b$
RP-PO	$8,2 \pm 0,4^a$	$1490 \pm 0,3^{bc}$	950 ± 18^c	$36,2 \pm 1,2^a$

Valores expresados como media \pm desvío estándar. Diferentes letras en una misma columna indican diferencias significativas entre medias ($p < 0,05$).

En la Figura IV-6 se presentan imágenes obtenidas mediante microscopía óptica de campo claro de las formulaciones ensayadas tras ser sometidas al proceso de secado a la temperatura seleccionada de 70°C . Los resultados obtenidos muestran que, tanto los productos alimenticios agregados como el residuo de pera utilizado en la elaboración de las formulaciones, tienen un impacto significativo en las características morfológicas y estructurales de los pellets obtenidos. Esta variación estructural se debe tanto a las interacciones químicas y física de los componentes de la formulación, como a las diferentes propiedades de contracción de los materiales porosos durante el proceso de secado. El transporte de agua desde el interior de las muestras hacia el entorno circundante provoca cambios en el volumen del material, lo que se conoce como contracción. Este fenómeno físico afecta la eficiencia del proceso de secado, así como los tiempos requeridos para alcanzar un nivel de humedad deseado (Li y col., 2024). Sin embargo, una profundización sobre las interacciones químicas y físicas específicas entre los compuestos excede los

objetivos del presente trabajo. Aquí nos centraremos en cómo las diferencias morfológicas observadas pueden haber influido en el proceso de secado.

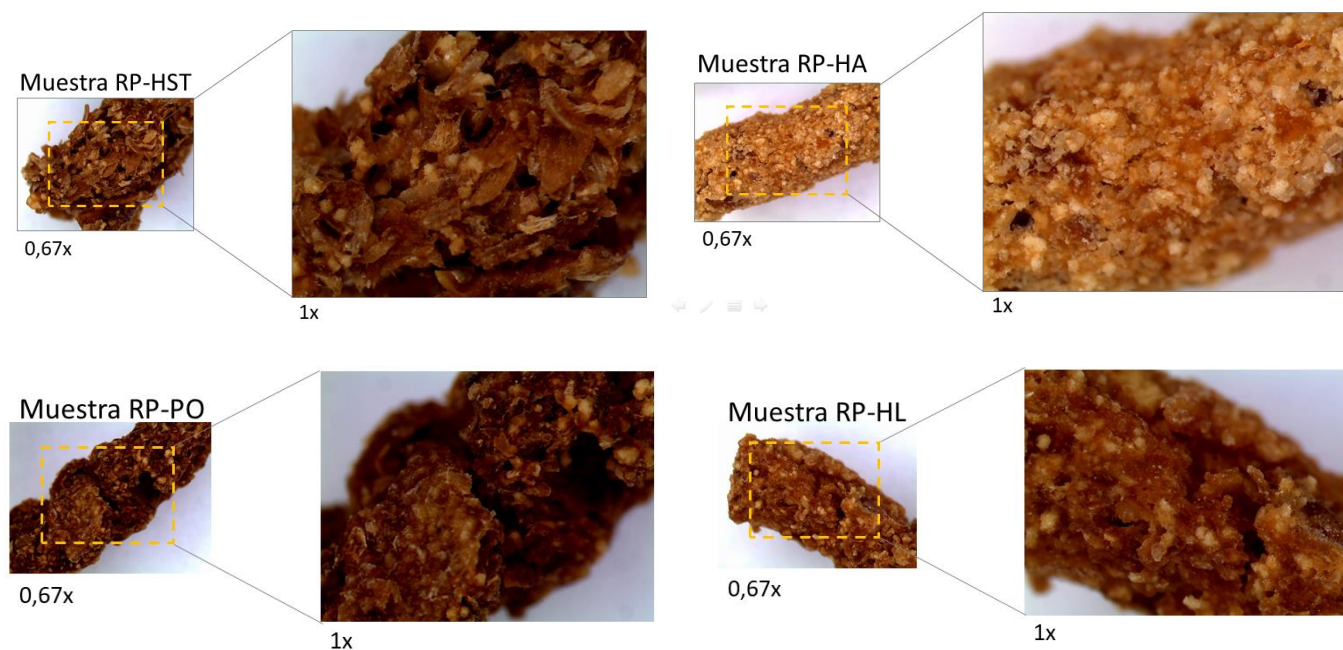


Figura IV-6 Fotografías de pellets de fibra obtenidas mediante microscopía óptica (0,67x y 1x), secados a 70°C, para las cuatro formulaciones analizadas.

En primer lugar, es conveniente observar las imágenes de las muestras RP-HST y RP-HA, dado que fueron las que se ubicaron en extremos opuestos respecto al desempeño durante el proceso de secado. Como se indicó anteriormente, para una temperatura de secado de 70 °C los pellets de la formulación RP-HST alcanzaron una humedad de $0,2 \text{ kg de agua/kg}_{ms}$ en aproximadamente 7 minutos, mientras que los pellets de RP-HA requirieron 21 minutos para alcanzar el mismo nivel de humedad. Los pellets de la formulación RP-HST presentaron una morfología “escamosa”, con una estructura más abierta y grandes poros externos. Esta estructura más abierta posiblemente facilitó la difusión de humedad, tendiendo así a favorecer el proceso de secado. En contraste, los pellets de RP-HA presentaron una estructura más compacta y densa, con poros más pequeños y áreas con “costras” en la superficie, lo cual tendería a dificultar la difusión de humedad, dando como resultado menores velocidades de secado. Este comportamiento está en línea con lo planteado por Li y col. (2024), quienes sugieren que las diferencias en la morfología y estructura de las formulaciones impactan directamente en la eficiencia del secado, prolongando los tiempos necesarios para alcanzar un nivel de humedad similar. Adicionalmente, Thibaul y col. (2024) señalan que los poros abiertos o cerrados de los

productos alimenticios deshidratados influyen considerablemente en la cinética de deshidratación. Los poros abiertos permiten la conectividad con la superficie externa del alimento, facilitando la transferencia de masa, mientras que los poros cerrados, como los observados en los pellets RP-HA, limitan este acceso directo, lo que ralentiza el proceso de secado. La costra “vítrea” que se observó en RP-HA podría deberse a los carbohidratos presentes en su formulación. Al formar una capa externa menos permeable, crea una “barrera” que dificulta la liberación de la humedad desde el seno de los pellets. Esto coincide con los hallazgos de Ramírez Rojas & Silva Verde (2022), quienes explican que la costra superficial puede modificar las propiedades físicas de la superficie de los productos alimenticios, disminuyendo la permeabilidad y, por lo tanto, incrementando los tiempos de secado.

Respecto a las formulaciones RP-HL y RP-PO, pudo observarse que poseen algunos “surcos” o “grietas” localizadas en algunas partes de su superficie, junto con zonas con poros de aspecto intermedio a los observados para RP-HST y RP-HA. Por lo tanto, desde este punto de vista las muestras RP-HL y RP-PO resultaron similares entre sí. Sin embargo, mostraron diferencias en cuanto a la distribución de tamaño de partícula y la determinación de porosidad. La muestra RP-PO tuvo menor diámetro de Sauter, lo cual beneficia el secado, pero por otro lado tuvo menor porosidad, afectando negativamente la deshidratación. Posiblemente, todos estos aspectos (morfología, tamaño de partícula, porosidad) expliquen el desempeño del proceso de secado con velocidades similares entre sí e intermedias, respecto a estas dos formulaciones.

IV.5 Clasificación Geldart y estimación de la velocidad mínima de fluidización

Geldart (1972) y (1973) estudió el comportamiento en cuanto a la fluidización de una gran cantidad de sólidos, logrando reconocer y definir cuatro grupos de partículas (grupos A, B, C y D descritos en la introducción), caracterizados por un diámetro medio de partícula y una diferencia de densidades entre la correspondiente a la partícula y la del agente fluidizante.

En el presente trabajo, a partir de los resultados obtenidos de densidad aparente y diámetro de Sauter, fue posible realizar la clasificación Geldart de los sistemas particulados estudiados. Las densidades aparentes se ubicaron entre 852 y 950 kg/m³ (Tabla IV-3), las cuales son densidades relativamente bajas, pudiendo a priori ser compatibles con distintos grupos de sistemas particulados. Sin embargo, el hecho de que los diámetros de Sauter

estuviesen en el rango de 8,2-10,7 mm (Tabla IV-3) indicó claramente que los bastoncitos estudiados corresponden al grupo D de la clasificación de Geldart. Esto último suele ser así para sistemas particulados como chips de biomasa, cáscaras de algunos alimentos, bagazos de caña de azúcar, entre otros (Proenza Pérez y col., 2018; Cáceres Martínez y col., 2023; Toschi, 2020). Además, es coherente con lo observado experimentalmente, dado que, aunque se evidenció una buena fluidización, por momentos la muestra presentaba un comportamiento errático: tendía a “encastrarse” y necesitaba ser ayudada con algunas vibraciones para volver a fluidizar vigorosamente, observando vuelos elevados y repentinos de bastoncitos.

Respecto a la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), en el presente trabajo fue estimada mediante una correlación propuesta por Paudel y Feng (2013), y a su vez la velocidad terminal (U_t) fue estimada de acuerdo a Haider y Levenspiel (1989). Los resultados obtenidos fueron los siguientes: $U_{mf} = 2,95$ m/s y $U_t = 8,66$ m/s (RP-HST), $U_{mf} = 2,95$ m/s y $U_t = 8,67$ m/s (RP-HL), $U_{mf} = 3,12$ m/s y $U_t = 9,17$ m/s (RP-HA), $U_{mf} = 2,76$ m/s y $U_t = 8,15$ m/s (RP-PO). Puede observarse que dichos resultados son compatibles con las velocidades superficiales utilizadas en los procesos de secado de las cuatro muestras, dado que estas últimas se ubicaron en el rango de 4 – 6 m/s, aproximadamente.

IV.6 Determinación de contenido de fibra dietaria y polifenoles

Sobre los bastoncitos de las cuatro formulaciones obtenidos en los procesos de secado a 70 °C se llevaron adelante las determinaciones de contenido de fibra dietaria y de polifenoles totales, obteniendo como resultado lo detallado en la Tabla IV-4.

En relación con la FDT, los resultados mostraron que la formulación RP-HST destacó por su elevado contenido, seguida por RP-HL y RP-PO. En el extremo opuesto, la formulación RP-HA presentó niveles significativamente inferiores de FDT. Dado que todas las formulaciones tuvieron

Tabla IV-4 Contenido de fibra dietaria y polifenoles de las formulaciones ensayadas.

Muestra	FDT (%)	FDI (%)	FDS (%)	Polifenoles (mg EAG/ 100 g)
RP-HST	51,9 ± 0,5 ^d	44,93 ± 0,02 ^c	7,0 ± 0,5 ^a	123 ± 2 ^b
RP-HL	51,2 ± 0,2 ^{bc}	47 ± 1 ^c	4 ± 1 ^a	81 ± 4 ^a
RP-HA	28,7 ± 0,9 ^a	22 ± 2 ^a	7 ± 3 ^a	61 ± 15 ^a
RP-PO	49 ± 2 ^b	41,5 ± 0,9 ^b	7 ± 3 ^a	864 ± 26 ^c

Valores expresados como media ± desvío estándar. Diferentes letras en una misma columna indican diferencias significativas entre medias ($p < 0,05$).

como base un aporte del 80% en masa de residuo de pera, era esperable que se obtuvieran bastoncitos con un elevado contenido de fibra dietaria total, radicando la diferencia en la composición química del sistema particulado agregado. La muestra RP-HA se originó a partir del agregado de harina de arroz, la cual es rica en carbohidratos complejos como el almidón, pero pobre en cuanto a contenido de fibra. Esto provoca un efecto de “dilución” en el valor de FDT que aporta el residuo inicial de pera, obteniendo menos del 30% de FDT para los bastones RP-HA. En contraste las harinas de lupino, de salvado de trigo y el polvo de orujo de uva blanca, son generadas respectivamente a partir de la semilla completa de lupino, de la cáscara de trigo y de un residuo de uva, todos ricos en fibra. En cuanto al contenido de FDI, nuevamente los resultados destacaron a las formulaciones de RP-HST y RP-HL, seguido por RP-PO, y finalmente RP-HA con un contenido significativamente más bajo de FDI. Con respecto al contenido de FDS, las cuatro formulaciones ensayadas no mostraron diferencias significativas entre sí. De esta manera, es posible afirmar que los bastoncitos obtenidos constituirían un aporte importante de fibra dietaria, siendo este un recurso nutritivo esencial para la microbiota intestinal, otorgándole a los colonizadores la capacidad de descomponer las fibras y generar ácidos grasos junto con metabolitos beneficiosos que contribuyen a la salud intestinal (Sette y col., 2024; Alba y col, 2019).

En cuanto al contenido de PT presentado en la Tabla IV- 4, la formulación de RP-PO mostró la mayor concentración de compuestos fenólicos en comparación con las demás formulaciones. Este resultado puede atribuirse al aporte de PT por parte del orujo de uva blanca, el cual se conoce que es rico en estos bioactivos (López-Astoga y col., 2023; Sette y col., 2024). Por el contrario, las otras formulaciones mostraron niveles bajos de PT, sugiriendo que las harinas adicionadas no contribuyen en este aspecto. Así, salvo RP-PO, los productos obtenidos no se destacaron por ser ricos en polifenoles.

V. CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES

En este estudio, se evaluaron diversos aspectos del proceso de secado en lecho fluidizado y las características de las formulaciones obtenidas a partir de mezclas de residuos de orujo de pera provenientes de la empresa Ceres S.A., localizada en Gral. Enrique Godoy, provincia de Río Negro. A través del análisis de la cinética de secado, los modelos matemáticos y la caracterización de las formulaciones, se lograron identificar factores clave que influyen en la eficiencia y calidad del proceso, así como en las propiedades de los productos finales.

Cinética y modelado del proceso de secado

El análisis cinético mostró que la temperatura del aire de secado influye de manera directa en la velocidad del proceso, acelerándolo y reduciendo los tiempos necesarios para alcanzar los niveles óptimos de humedad. A su vez, se observó que no existió un período de velocidad de secado constante en ninguna de las muestras. Por otro lado, el modelado matemático demostró que, si bien los tres modelos evaluados ofrecieron ajustes aceptables, el modelo de Page fue el más adecuado para describir la dinámica de secado de las formulaciones a las diferentes temperaturas. Las diferencias en los valores del parámetro k reflejaron la influencia de la temperatura sobre la velocidad de secado, como también el efecto de la matriz alimenticia de cada formulación. Estos resultados reflejan la importancia de estudiar y comprender las operaciones unitarias como el secado, para abordar con mayor eficiencia la revalorización de residuos frutícolas.

Selección de la condición de secado

El índice REC_{TS} , propuesto a los fines de poseer una metodología de comparación relativa del requerimiento energético del proceso, permitió seleccionar una temperatura de 70°C para el secado de todas las formulaciones de pellets. La propuesta de cálculo de este índice acompaña la iniciativa del presente trabajo en obtener productos con potencial aplicación alimenticia desde modelos de producción sostenible (reutilización de residuos con el menor consumo energético).

Caracterización fisicoquímica de las formulaciones

El análisis de la morfología, porosidad porcentual, tamaño y estructura de los pellets reveló su efecto en la eficiencia del secado. La formulación con estructura más abierta y

poco densa, como la RP-HST, favorecieron la transferencia de masa desde la muestra hacia el medio fluido de secado, mientras que la compactación en la formulación RP-HA dificultó el proceso tanto en su fluidización como en la pérdida de agua generando pellets más grandes y densos. A su vez, este efecto se vio reflejado en el secado de los pellets RP-HL y RP-PO al presentar valores intermedios en los parámetros físicos estudiados. Estos hallazgos subrayan la importancia de ajustar las condiciones de secado de acuerdo con las características específicas de cada formulación para mejorar la eficiencia y la calidad del producto final.

Por otro lado, el estudio del contenido de fibra dietaria y de polifenoles mostró que las muestras presentaron variaciones significativas. La formulación RP-PO destacó por su alto contenido de polifenoles, mientras que RP-HST y RP-HL, presentaron un alto contenido de fibra. Estas características indican que los distintos pellets obtenidos presentan potencial para ser consumidos de forma directa como alimentos funcionales. Este aspecto implica profundizar en el análisis del potencial funcional de los productos, lo que conllevaría otro tipo de estudio, siendo una alternativa interesante a abordar en el futuro.

CONCLUSIÓN FINAL

Este trabajo no sólo se enfoca en el estudio del proceso de secado en lecho fluidizado como operación unitaria, sino que además, busca aportar una alternativa concreta que contribuya a la producción sustentable de productos alimenticios. Al optimizar esta etapa clave en la conservación de alimentos, se promueve un uso más eficiente de los recursos energéticos y la reducción del impacto ambiental. Esto último, sumado a la revalorización de residuos generados por la agroindustria de la zona, abre un camino de investigación con fines de contribuir a prácticas más responsables y sostenibles en la industria alimentaria.

VI. NOMENCLATURA

Términos generales

ECNT	Enfermedades Crónicas No Transmisibles
FDI	Fibra Dietaria Insoluble
FDS	Fibra Dietaria Soluble
FDT	Fibra Dietaria Total
GTA	Grupo de Tecnología de los Alimentos
OMS	Organización Mundial de la Salud
PT	Polifenoles Totales
ROS	Especies Reactivas del Oxígeno
RP-HA	Residuo de Pera-Harina de Arroz
RP-HL	Residuo de Pera-Harina de Lupino
RP-HST	Residuo de Pera-Harina de Salvado de Trigo
RP-PO	Residuo de Pera-Polvo de Orujo de uva blanca

Términos técnicos

Ar	Número de Arquímedes
a_w	Actividad acuosa
$C_{p_{aire}}$	Capacidad calorífica del aire
DS	Desvío Estándar
d_{sv}	Diámetro de Sauter
\bar{d}_p	Tamaño medio de las partículas
$\varepsilon_{p\%}$	Porosidad porcentual de la partícula
G	Caudal másico de aire seco

H	Humedad absoluta del aire
h_{fg}	Calor latente de vaporización
h_0	Humedad objetivo
k	Constante cinética de velocidad de secado
\dot{m}_{aire}	Caudal másico del aire
Q_L	Calor liberado
Q_w	Entrada de calor
R^2	Coefficiente de determinación
Re_{mf}	Número de Reynold a la U_{mf}
REC_{TS}	Relación Energética Comparativa
T_{bh}	Temperatura de bulbo húmedo
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco
t_{TS}	Tiempo del proceso de secado a la temperatura de secado
U_{mf}	Velocidad mínima de fluidización
U_t	Velocidad terminal
χ^2	Chi cuadrado.
μ_g	Viscosidad dinámica
ρ_a	Densidad absoluta
ρ_p	Densidad de partícula
ΔP	Diferencial de Presión
$\Delta \dot{H}_{TS}$	Variación de entalpía del aire a la temperatura de secado

VII. BIBLIOGRAFÍA

Referencias

Alba K, Campbell GM, Kontogiorgos V (2019). Dietary fibre from berry-processing waste and its impact on bread structure: a review. *J Sci Food Agr* 99:4189–4199.

Allier González, A. (2012). *Análisis de los periodos y mecanismos de transporte durante el secado de papa por convección de aire forzada* (Tesis doctoral). Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca.

Almeida-Alvarado, Sonia Lorena, Aguilar-López, Tania, & Hervert-Hernández, Deisy. (2014). *Fibra y sus beneficios para la salud*. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 27 (1), 73-76.

Alvarado, L., X., S. (2021). *Evaluación técnica y económica del proceso de liofilización de frutas a escala laboratorio*. Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de Ingeniería.

Araya-Farias, M., & Ratti, C (2009). Dehydration of Foods: General Concepts. En C. Ratti (Ed.) *Advances in Food Dehydration* (1-36) CRC Press

Aramberri, M. (2017). *Análisis ambiental de los residuos de las industrias jugueras: el caso del alto Valle de Rio Negro y Neuquén, Argentina*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Quilmes.

Barda, N., Miranda, M.J., & Suárez,P. (2022). *Calidad nutricional y sensorial de las principales variedades comerciales de peras y manzanas*. INTA Alto Valle.

Bertoldi, L. (2015). *La importancia de la trazabilidad en pera y manzana para exportación a Brasil*. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina.

Bruin, S. and Luyben, K. (1980). Drying of food materials: A review of recent developments, in *Advances in Drying*, Vol. 1, Mujumdar, A.S., Ed., Hemisphere Publishing, New York, pp. 155–215.

Buglione, M. B., Filippi, M. V., Martínez, D. A., Agüero, M. S., & Rodríguez, G. (2017). *Caracterización química del orujo de pera sometido a biotransformación por *Pleurotus ostreatus**. XVI Congreso de Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

Cáceres-Martínez, L.E., Guío-Pérez, D.C., Rincón-Prat, S.L. (2023). *Significance of the particle physical properties and the Geldart group in the use of correlations for the prediction of minimum fluidization velocity of biomass-sand binary mixtures*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13: 935-951.

Caliceti, C., Malaguti, M., Marracino, L., Barbalace, M. C., Rizzo, P., & Hrelia, S. (2022). *Agri-Food Waste from Apple, Pear, and Sugar Beet as a Source of Protective Bioactive Molecules for Endothelial Dysfunction and Its Major Complications*. *Antioxidants*, 11(9), 1786.

Calleja Pardo, G., Rodríguez Somolinos, F., Aguado Alonso, J., Calles Martín, J. A., Cañizares Cañizares, P., López Pérez, B., Santos López, A., & Serrano Granados, D. (2002). *Ingeniería de la industria alimentaria. Volumen III. Operaciones de conservación de los alimentos*. Editorial Síntesis.

Carrín, M. E., & Crapiste, G. H (2009) *Convective drying of foods*. En C. Ratti (Ed.), *Advances in food dehydration* (pp. 123-151). CRC Press.

Crosetti, A. y Zúñiga, A. (2022). *Adaptación transcultural de la dieta mediterránea a los hábitos alimenticios de la población argentina para el tratamiento de la enfermedad por hígado graso no alcohólico*. Tesis de pregrado, Instituto Universitario de Ciencias de la Salud. Buenos Aires, Argentina.

Da Re, C. V. (2016). *Relevamiento de cepas argentinas de hongos ligninolíticos para su aplicación en procesos biotecnológicos ligados a la industria celulósico-papelera*. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Biblioteca Digital FCEN.

Del Brio, D. (2018). *Análisis de variabilidad espacio-temporal de la calidad de peras Williams en un monte frutal*. Tesis de grado, Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ciencias y Tecnología de los Alimentos.

Delgado-Plaza, E., Martínez, E., Peralta-Jaramillo, J., Maldonado, F., Reinoso-Tigre, J., Torres, P., & Carrión, M. (2023). *Diseño y construcción de un secador de lecho fluidizado a escala para laboratorio*.

De Prada Díaz, A. (2014). *Estudio experimental de la aglomeración de partículas en un lecho fluidizado*. Tesis de Grado, Universidad Carlos III, Departamento Ingeniería Térmica y de fluidos.

Export Argentina. (2023). Agencia Argentina de Inversiones y Comercio Internacional.

https://exportargentina.org.ar/companies?category_id=109&page=2

Falcón V., M. del R., Barrón H., JM, Romero B., AL, & Domínguez S., Francisca, M. (2011). *Efecto adverso sobre la calidad de las proteínas alimentarias de las dietas ricas en fibra alimentaria*. Revista chilena de nutrición. 38 (3), 356-367.

Ferreira, J., Tkacz, C., Turkiewicz, I. P., Santos, I., Camoesas E Silva, M., Lima, A., & Sousa, I. (2024). *Explorando las propiedades bioactivas y los beneficios terapéuticos del orujo de pera*. Antioxidants, 13(7), 784.

Ferreira, J., Tkacz, K., Turkiewicz, I. P., Santos, M. I., Belas, A., Lima, A., Wojdylo, A., & Sousa, I. (2023). *Influence of Particle Size and Extraction Methods on Phenolic Content and Biological Activities of Pear Pomace*. Foods (Basel, Switzerland), 12(23), 4325.

Foust, A., S, Wenzel, L., A, Cutis Clump., W., Maus, L & Bryce Andersen, L. (2006). *Transferencia Simultánea de Calor y Masa-Secado* (pp. 459-495). Principios de operaciones unitarias. Editorial continental

Franceschinis, L. E. (2016). *Propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos deshidratados en base a cerezas y zarzamoras de la Patagonia argentina*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Geldart, D. (1973). Types of Gas Fluidization, Powder Technology, (7) 285-292.

Geldart, D. (1972). The effect of Particle Size and Size Distribution on the Behavior of Gas Fluidized Beds, Powder Technology, (6) 201-215.

Giayetto, A. Villarreal, P. (2010). *Pera Williams. Manual para el productor y el empacador*. Editorial ProRioNegro. Capitulo N°1

Haider, A., Levenspiel, O. (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles, Powder Technol. 58, 63–70.

Ibarz, A., & Barbosa- Cánovas, G. (2005) *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Editorial Mundi-Prensa.

Krajewska, A., Dziki, D., Yilmaz, M. A., & Özdemir, F. A. (2024). *Physicochemical Properties of Dried and Powdered Pear Pomace*. *Molecules* (Basel, Switzerland), 29(3), 742.

Kunii, D. y O. Levenspiel, O. (1991) *Fluidization Engineering*, 2nd ed. ButterworthHeinemann, Boston.

Kumar Y., Belorkar S. (2015). *International Journal of Engineering Studies and Technical Approach*, 01- N9.

Li, J., Chen, J., Xu, W., Zhang, W., Chen, Y., & Mu, W. (2022). *Utilización eficiente de cáscaras de frutas para la bioproducción de D-alulosa y D-manitol*. *Foods*, 11(22), 3613.

Li, J., Huang, Y., Gao, M., Tie, J., & Wang, G. (2024). *Shrinkage properties of porous materials during drying*. *Frontiers in Materials*, (11), 1330599. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1330599>

López-Astorga, M., Molina-Domínguez, C. C., Ovando-Martínez, M., & Leon-Bejarano, M. (2023). *Orujo de Uva: Más que un Residuo, una Fuente de Compuestos Bioactivos*. *EPISTEMUS*, 16 (33), 115–122.

Macavilca Yacsavilca, Z. M. (2019). *Evaluación de la actividad antioxidante y compuestos fenólicos de carambola (Averrhoa carambola L) en temperatura ambiente y refrigeración*. Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.

Maidana, S. B (2017). *Desarrollo de nuevos productos deshidratados a partir de peras (var. Packham's Triumph) de la Norpatagonia argentina*. Tesis doctoral publicada, Universidad Nacional de la Plata, Neuquén, Argentina.

Maldonado, J. F., Agüero, M. S., Buglione, M. B., Iturmendi, F., Filippi, M. V., & Martínez, D. A. (2021). Pear and apple pomace compost as an alternative to commercial substrates in the production of tomato seedlings. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*. 53 (1); 128-138

Martínez, D. A., Buglione, M. B., Filippi, M. V., Reynoso, L. d. C., Rodríguez, G. E., & Agüero, M. S. (2015). *Evaluación del crecimiento micelial de Pleurotus ostreatus y Agrocybe aegerita sobre orujos de pera*. *Anales de Biología* 37, 1-10.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. (2020). *Estudio panorámico sobre alimentos funcionales en Argentina. Secretaría de Alimentos, Bioeconomía y Desarrollo Regional*.

Akgun, N., Doymaz, I. (2005). *Modelado del proceso de secado en capa fina de orujo de aceituna*. *J. Food Eng.* 68, 455–461

Thakor, N., Sokhansanj, S., Sosulski, F., Yannacopoulos, S. (1999). *Cambios de masa y dimensiones de los granos de canola individuales durante el secado*. *Journal of Food Engineering*, (40), 153-160.

Nayak A., Bhushan B. (2019). *Una descripción general de las tendencias recientes en las técnicas de valorización de desechos para desechos alimentarios*. *Journal of Environmental Management*, 233, 352–370.

Ordóñez, A. L., Morant, M. A., Sela, B. C., Lavastrou, V. (2022). *Tecnología de los alimentos de origen vegetal, alimentos de origen vegetal y bebidas*. Universidad Nacional de Cuyo.

Paudel, B., Feng, Z.-G. (2013). *Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles*, *Powder Technol.* 237, 134–140.

Pascoalino, L. A., Reis, F. S., Prieto, M. A., Barreira, J. C. M., Ferreira, I. C. F. R., & Patricio Salgado-Tello, Iván; Elizabeth Sánchez-Herrera, Tatiana; Mauricio Oleas- López, Julio; Vaca-Cardenas, Maritza L. (2024). *Economía circular para el desarrollo agroindustrial y social en Ecuador*. *Revista Telos* , Vol 26, Issue 1, p297

Pascoalino, L. A., Reis, F. S., Prieto, M. A., Barreira, J. C. M., Ferreira, I. C. F. R., & Barros, L. (2021). *Valorización de biorresiduos del procesamiento de los principales cultivos frutales cultivos frutales portugueses: de residuos desechados a compuestos promotores de salud*. *Moléculas* (Basel, Switzerland), 26(9), 2624.

Polenta, G.A., 2016. *Aprovechamiento de subproductos frutihortícolas como alternativa para la prevención de PDA*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Proenza Pérez, N., Travieso Pedroso, D., Blanco Machin, E., Santana Antunes, J., Verdú Ramos, R.A., Silveira, J.L. (2018). Prediction of the minimum fluidization velocity of particles of sugarcane bagasse. *Biomass and Bioenergy*, 109, 249-256.

Quiñones, M., Miguel, M., & Aleixandre, A. (2012). *Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular*. Revista: Nutrición Hospitalaria, 27(1), 76-89.

Ramírez Rojas, K.J y Silva Verde, L.R (2022). *Análisis de los parámetros cinéticos de secado convectivo usando el modelo de page en frutas y hortalizas pretratadas con diferentes métodos*. Tesis de grado, Universidad privada del norte, Perú.

Rangel, Adriana & Flores-Martínez, Norma & F, Villaseñor & C.I, Muñoz & Perez-Perez, Cristina & López-González, Maria. (2015). *Aceites esenciales como antioxidantes y antimicrobianos naturales. Alimentos funcionales y compuestos bioactivos*.

Rodríguez, A., Mondaini, A., & Hitschfeld, M. (2017). *Bioeconomía en América Latina y el Caribe: Contexto global y regional y perspectivas*. CEPAL

Ronchi, M. (2018). *Extracción de compuestos bioactivos con propiedades funcionales en residuos agroindustriales de la Norpatagonia Argentina para el desarrollo de ingredientes funcionales*. Tesis de Grado, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina.

Saavedra Amasifuén, L., E. (2022). *Tecnología de Secado aplicado a alimentos y nutrientes*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Iquitos, Perú.

Sette, P., A. Garrido Makinistian., F., M. Maturano., R. Salvatori., D., M. (2021). *Particulate systems from maqui (Aristotelia chilensis) wastes to be used as nutraceuticals or high value-added ingredients*. Taylor & Francis; *Drying Technology*; 40; 13; 2669-2684.

Sette, P., Mattson Gomez, M., Schebor, C., Salvatori, D.,(2024). *Strategies for bioactive compound recovery from grape and apple wastes: traditional and emerging technologies to reach zero waste discharge*.

Sivakumar R, Saravaman R, Elaya Perunal A, Iniyan S. (2016). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 280-301.

Smith, P. (2007). *Applications of Fluidization to Food Processing-Wiley-Blackwell*.

Sozzi A., Zambon M., Mazza G., Salvatori D. (2021). *Fluidized bed drying of blackberry wastes: Drying kinetics, particle characterization and nutritional value of the obtained granular solids*. *Powder Technology*, 385, 37-49.

Thibault, B., Aghajanzadeh, S., Sultana, y col.,(2024). *Características de los poros abiertos y cerrados, sus técnicas de medición y aprovechamiento en productos alimenticios deshidratados*. *Food Eng Rev* (16), 323–355.

Toschi, F. (2020) *Modelado CFD de lechos fluidizados bajo regímenes para procesos de interés Norpatagonia Argentina*. (Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Argentina).

Unigarro Bolaños, D.A. (2017). *Secado de café arábigo Coffea arábica L. de la variedad caturra mediante lecho fluidizado*. (Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte). Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica del Norte, Ecuador. Universidad Nacional de Río Negro

Van Arsdel, Wallace B y Copley, Michael Joseph. (1963). *Deshidratación de alimentos / Ed. por WBVan Arsdel y MJCopley*. Westport, Connecticut: Avi Pub. Co.

Van Hoof, B., Núñez, G., & de Miguel, C. (2022). *Metodología para la evaluación de avances en la economía circular en los sectores productivos de América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Editorial CEPAL

Wu, S., Jia, W., He, H., Yin, J., Xu, H., He, C., Zhang, Q., Peng, Y. y Cheng, R. (2023). *Una nueva fibra dietética puede mejorar la saciedad y reducir la glucemia posprandial en adultos sanos: un ensayo cruzado aleatorizado*. *Nutrients*, 15 (21), 4569.

Xue keqing, D. (2004). *Optimización del secado por aire caliente de pera (Variedad Blanquilla)*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

Zambon, M., Carp, D., Reyes Urrutia, R.A., Mazza, G., Salvatori, D. (2019). *Estudio cinético y fluidodinámico del secado de manzana en lecho fluidizado*. X Congreso Argentino de Ingeniería Química (CAIQ).

VIII. ANEXO

En el siguiente anexo se encuentra información complementaria a los estudios realizados en el presente trabajo. Los mismos se estructuran con igual orden de aparición que en el capítulo IV.

VIII.1 Cinética de Secado

Se presentan a continuación los resultados experimentales correspondientes a las curvas de velocidad de secado a cada temperatura para las cuatro formulaciones.

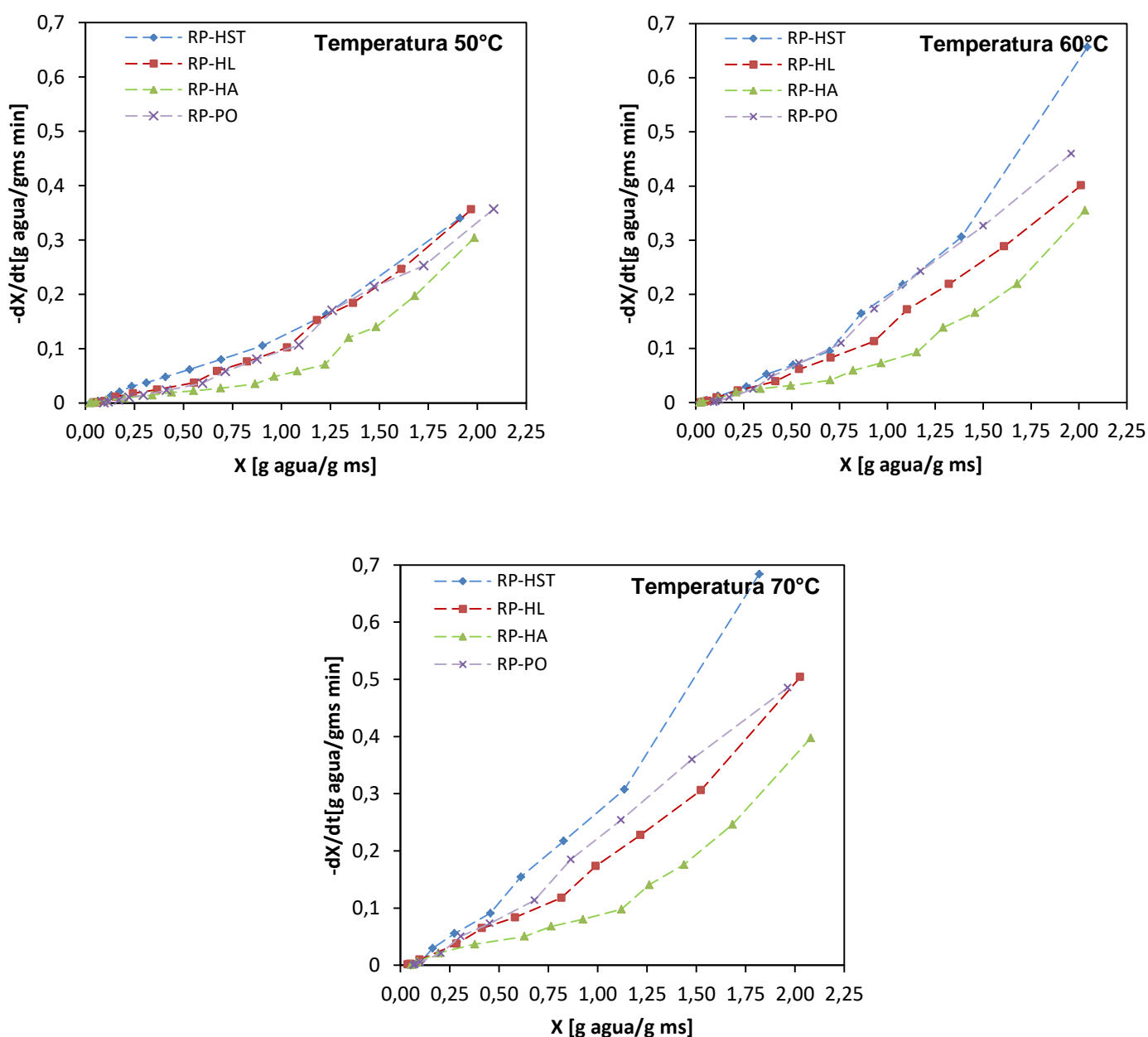


Figura VIII -1 Velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca de las 4 formulaciones: RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO a las temperaturas de 50°C, 60°C y 70°C.

VIII. Estudio del modelado matemático de las curvas de secado

Los resultados experimentales correspondientes a las cinéticas de secado de las distintas muestras, y a las tres temperaturas ensayadas, fueron ajustados mediante los modelos semiempíricos: Henderson y Pabis y modelo Logarítmico.

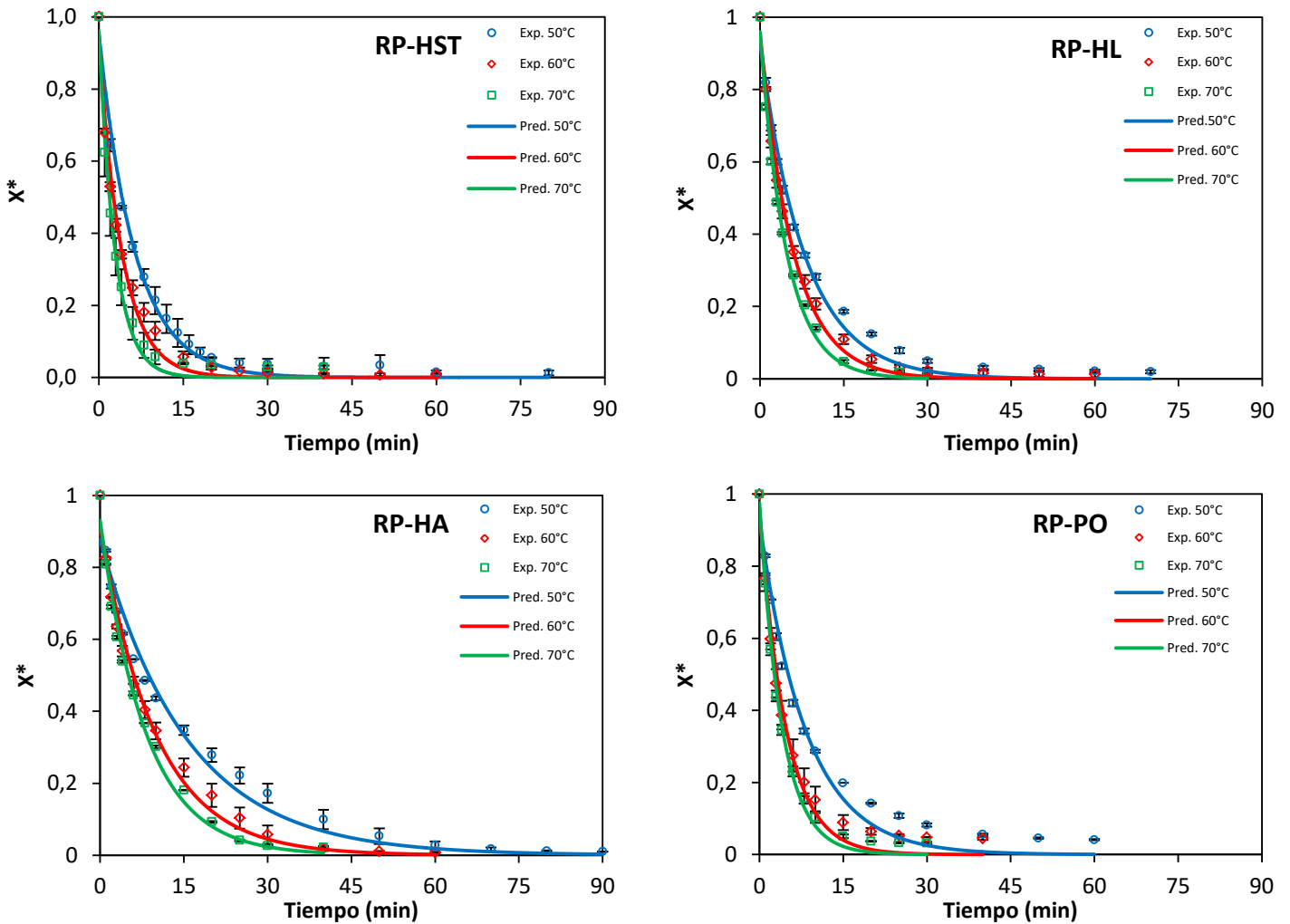


Figura VIII -2 Curva de humedad promedio vs tiempo modelada con Henderson y Pabis y formulada con RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO a diferentes temperaturas 50 °C, 60°C y 70°C.

Tabla VIII -1. Parámetros de ajuste obtenidos a partir del modelo semi- empírico de Henderson y Pabis utilizado para las curvas de secado de la formulación de RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO.

Henderson y Pabis	Temperatura de secado [°C]		
	50	60	70
RP-HST			
k	0,16 ± 0,02 ^a	0,24 ± 0,02 ^{ab}	0,36 ± 0,07 ^b
a	0,95 ± 0,02 ^a	0,93 ± 0,01 ^a	0,96 ± 0,001 ^a
R²	0,989	0,986	0,988
X²	0,00090	0,00065	0,00117
RP-HL			
k	0,12 ± 0,003 ^a	0,17 ± 0,01 ^b	0,21 ± 0,0008 ^c
a	0,93 ± 0,003 ^a	0,96 ± 0,002 ^b	0,96 ± 0,005 ^b
R²	0,988	0,994	0,995
X²	0,00129	0,00061	0,00057
RP-HA			
k	0,06 ± 0,005 ^a	0,10 ± 0,01 ^b	0,12 ± 0,0009 ^b
a	0,88 ± 0,02 ^a	0,92 ± 0,02 ^{ab}	0,93 ± 0,002 ^b
R²	0,980	0,988	0,991
X²	0,00216	0,00133	0 00105
RP-PO			
k	0,12 ± 0,001 ^a	0,21 ± 0,03 ^b	0,25 ± 0,01 ^b
a	0,93 ± 0,003 ^a	0,96 ± 0,01 ^b	0,98 ± 0,003 ^b
R²	0,978	0,985	0,994
X²	0,00229	0,00156	0,00067

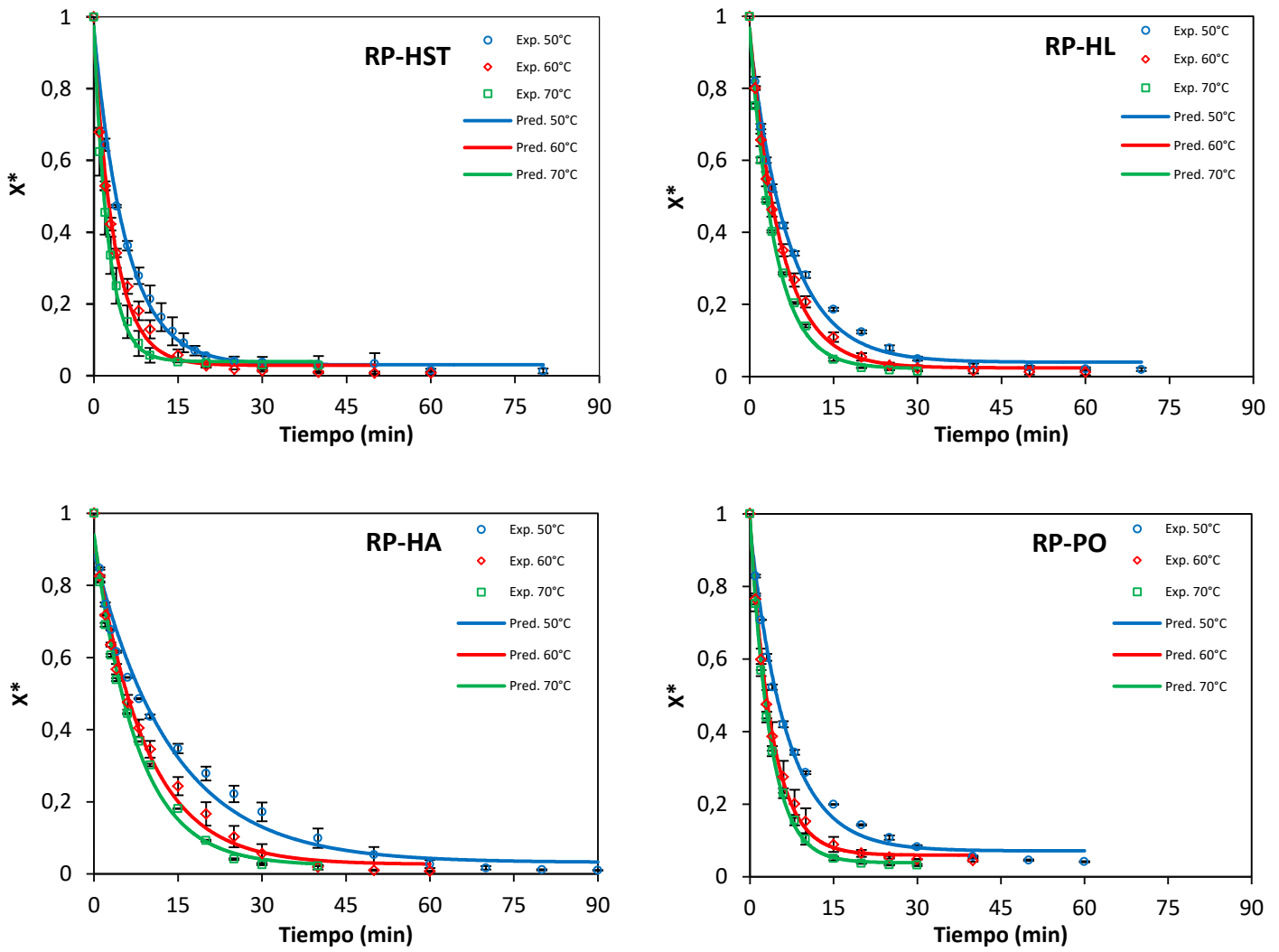


Figura VIII - 3 Curva de humedad promedio vs tiempo modelada con Logaritmo formulada con RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO a diferentes temperaturas 50 °C, 60°C y 70°C.

Tabla VIII-2. Parámetros de ajuste obtenidos a partir del modelo semi- empírico de Logaritmo utilizado para las curvas de secado de la formulación de RP-HST, RP-HL, RP-HA y RP-PO.

Logaritmo	Temperatura de secado [°C]		
	50	60	70
RP-HST			
A	$0,94 \pm 0,02^a$	$0,92 \pm 0,01^a$	$0,94 \pm 0,003^a$
k	$0,17 \pm 0,02^a$	$0,26 \pm 0,02^{ab}$	$0,41 \pm 0,1^c$
C	$0,03 \pm 0,01^a$	$0,03 \pm 0,0003^a$	$0,04 \pm 0,002^a$
R ²	0,994	0,989	0,996
X ²	0,00054	0,00116	0,00048
RP-HL			
A	$0,91 \pm 0,001^a$	$0,94 \pm 0,01^b$	$0,95 \pm 0,006^b$
k	$0,14 \pm 0,002^a$	$0,18 \pm 0,01^a$	$0,23 \pm 0,0005^c$
C	$0,04 \pm 0,004^b$	$0,02 \pm 0,006^a$	$0,02 \pm 0,002^a$
R ²	0,993	0,997	0,996
X ²	0,00078	0,00041	0,00047
RP-HA			
A	$0,86 \pm 0,02^a$	$0,90 \pm 0,02^{ab}$	$0,92 \pm 0,001^b$
k	$0,07 \pm 0,004^a$	$0,11 \pm 0,01^b$	$0,13 \pm 0,001^c$
C	$0,03 \pm 0,008^a$	$0,03 \pm 0,006^a$	$0,02 \pm 0,0006^a$
R ²	0,982	0,989	0,992
X ²	0,00205	0,00128	0,00104
RP-PO			
A	$0,89 \pm 0,003^a$	$0,92 \pm 0,01^b$	$0,95 \pm 0,003^c$
k	$0,15 \pm 0,004^a$	$0,26 \pm 0,04^a$	$0,28 \pm 0,01^b$
C	$0,07 \pm 0,003^c$	$0,06 \pm 0,003^b$	$0,04 \pm 0,00003^a$
R ²	0,993	0,998	0,999
X ²	0,00074	0,00024	0,00012

