

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

"ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE REHIDRATACIÓN USANDO EL MODELO DE PELEG DE LAS FRUTAS Y/O HORTALIZAS SECADAS POR DIFERENTES MÉTODOS"

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Agroindustrial

Autores:

Giovani Eduardo Rurush Zegarra
Maria del Carmen Alvarado Quiroz

Asesores:

Dr. Alberto Claudio Miano Pastor

<https://orcid.org/0000-0002-2874-3012>

Dr. Meliza Lindsay Rojas Silva

<https://orcid.org/0000-0001-5750-8399>

MBA Ing. Mylena Karen Vilchez Torres

<https://orcid.org/0000-0001-9994-368X>

Trujillo - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Ricardo David Vejarano Mantilla	41260201
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Cesia Elizabeth Boñon Silva	40222757
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Jose Manuel Cedano Romero	45070233
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

DEDICATORIA

A Dios, por darnos fortaleza y sabiduría para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestros padres, por su apoyo incondicional, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

A nuestros asesores por estar siempre presentes, guiándonos lo largo de esta etapa

AGRADECIMIENTO

Los autores reconocen el apoyo financiero del Proyecto CONCYTEC “Mecanismos de mejora del proceso de secado de alimentos por pretratamientos con ultrasonidos de alta potencia y promotores de flujo Marangoni”, a través de su unidad ejecutora PROCIENCIA. [contrato número 406-2019]

TABLA DE CONTENIDO

<i>JURADO CALIFICADOR</i>	<i>1</i>
<i>DEDICATORIA</i>	<i>2</i>
<i>AGRADECIMIENTO</i>	<i>3</i>
<i>TABLA DE CONTENIDO</i>	<i>4</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>5</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	<i>6</i>
<i>ÍNDICE DE ECUACIONES</i>	<i>7</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>8</i>
<i>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</i>	<i>9</i>
<i>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA</i>	<i>11</i>
2.1. <i>Tipo de estudio</i>	<i>11</i>
2.1.1. <i>Enfoque</i>	<i>11</i>
2.1.2. <i>Nivel</i>	<i>11</i>
2.1.3. <i>Diseño</i>	<i>11</i>
2.1.4. <i>Extracción de datos</i>	<i>12</i>
2.2. <i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</i>	<i>13</i>
2.2.1. <i>Modelamiento matemático</i>	<i>13</i>
2.3. <i>Aspectos éticos</i>	<i>14</i>
<i>CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES</i>	<i>15</i>
<i>CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES</i>	<i>38</i>
<i>REFERENCIAS</i>	<i>39</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>45</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de extracción de datos: Parámetros cinéticos y de bondad de ajuste del modelo de Peleg obtenidos del modelado de datos experimentales de los artículos seleccionados.....	17
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Matriz PRISMA para la Extracción de Artículos	12
Figura 2. Matriz Prisma de los estudios de rehidratación analizados.....	15
Figura 3. Gráfico solar sobre la materia prima estudiada en los trabajos de investigación recopilados.	16
Figura 4. Gráfico de barras del parámetro k_1 para las temperaturas de rehidratación de 18°C a 30°C.....	22
Figura 5. Gráfico del parámetro k_1 (min/d.b) obtenido para productos rehidratados a temperaturas en el rango de 40°C a 100°C.....	25
Figura 6. Valores del parámetro k_2 para muestras secadas con diferentes métodos de secado y rehidratados a temperaturas de 18°C a 30°C.....	28
Figura 7. Valores del parámetro k_2 para muestras secadas con diferentes métodos de secado y rehidratados a las temperaturas de 40°C a 100°C.	29
Figura 8. Porcentaje de rehidratación de los productos a temperaturas entre 18°C y 100°C.....	32
Figura 9. Dendograma de los trabajos que realizaron secado convectivo a diferentes condiciones y rehidratación a diferentes temperaturas.....	35

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	13
Ecuación 2.....	13
Ecuación 3.....	13
Ecuación 4.....	14
Ecuación 5.....	14
Ecuación 6	14

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar los mejores métodos de secado de frutas y/o hortalizas que permitan mejor capacidad de rehidratación. Para seleccionar los artículos se aplicó la metodología PRISMA considerando criterios de inclusión y exclusión. Los datos experimentales fueron extraídos de las cinéticas de rehidratación de los artículos seleccionados haciendo uso del software "xyExtract Graph Digitizer". El modelo de Peleg, a través de sus parámetros k_1 y k_2 fue ajustado a los datos experimentales, validándose con los coeficientes R^2 , RMSD, NMRSD, a y b. También se aplicó Análisis jerárquico de conglomerados para clasificar el método de secado convectivo y sus condiciones en función de su efecto en el % de rehidratación. Los resultados demostraron que durante el secado siempre existirá destrucción de estructuras celulares de alimento en mayor o menor intensidad dependiendo de su composición, método de secado y sus condiciones de aplicación. Lo cual, facilitará o dificultará la entrada y retención de agua durante la rehidratación. Además, se demostró que existe influencia de la temperatura de rehidratación directamente proporcional a la velocidad de rehidratación, incluso esta temperatura deberá adecuarse a la temperatura de transición vítrea para poder rehidratarse adecuadamente. Finalmente, la calabaza secada por microondas al vacío en tres etapas fue el estudio con mejores perspectivas por su valor de k_1 ($2.27 \text{ min} \cdot \text{d} \cdot \text{b}^{-1}$) y k_2 ($0.071 \text{ d} \cdot \text{b}^{-1}$). Además, llegó a rehidratarse un 268% respecto a su humedad en fresco, superando al 71% de rehidratación del kiwi liofilizado. Se recomienda estudiar productos como aguaymanto, camu-camu y chirivía.

PALABRAS CLAVES: Cinética de rehidratación, Peleg, métodos de secado, frutas y hortalizas.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La necesidad de poder contar con una manera de conservar alimentos ha llevado a que el hombre desarrolle diferentes métodos que permitan alargar la vida útil de este. Uno de los métodos más usados desde la antigüedad es el secado, el cual, a pesar de su antigüedad aún sigue siendo estudiada. El secado es la eliminación parcial del agua del alimento con la finalidad de conseguir un producto con bajo contenido de agua (Berk, 2018). Además, mediante el secado se reduce el volumen del producto, lo que ocasiona una disminución de los costos de almacenamiento y transporte (Mayor y Sereno, 2004). Sin embargo, la aplicación de métodos de secado inapropiados puede causar desventajas, una de ellas es el deterioro de la calidad del alimento seco (Beigi, 2017). Otra desventaja de los procesos de secado es que puede ocasionar daños estructurales significativos, es por esto que la selección idónea del método de secado para un alimento es un factor clave (Zielinska y Markowski, 2016).

Una forma relativamente simple de analizar la calidad del producto seco y el posible daño producido por el secado es mediante la evaluación de su capacidad de rehidratación (Álvarez, et al., 2018; Hebda, et al., 2019). La rehidratación es un proceso muy complejo e importante en aquel alimento que ha sido secado, ya que esta se centra en la influencia del método de secado sobre la capacidad de restitución del alimento. Es por ello que, si el alimento recupera un gran porcentaje de las propiedades, se califica como un producto de buena calidad (Gökçe y İsmail, 2017).

Diferentes autores han utilizado ecuaciones empíricas como el modelo Peleg, Weibull, etc., para describir la cinética de rehidratación en frutas y/o hortalizas (López et. al, 2019). Además, estos estudios concuerdan que el modelo de Peleg tiene un mejor ajuste a la cinética de rehidratación de diferentes alimentos deshidratados debido a su simplicidad y facilidad al

describir el comportamiento de rehidratación de alimentos en comparación a otros modelos utilizados (Zielinska y Markowski, 2016).

El modelo Peleg consta con dos parámetros para la descripción de la rehidratación (Ergün, et. al, 2016). El parámetro k_1 es la constante de velocidad de Peleg, que tiene relación con la tasa de absorción, y el parámetro k_2 es la constante de capacidad de Peleg, que se relaciona con el contenido de humedad en el equilibrio y con la capacidad de retención de agua (Rojas y Augusto, 2018). Ricce, et al, (2016) explican que el cuanto menor sea el valor de k_1 , la rehidratación será más rápida, de igual manera hacen referencia a que la tasa de rehidratación se ve afectada por el método y temperatura de secado.

Como lo indicado anteriormente, la rehidratación de frutas y hortalizas es un proceso importante para evaluar el método de secado y la calidad del producto rehidratado. Sin embargo, a pesar de ser ampliamente estudiado, no es posible hacer una comparación directa de las cinéticas de rehidratación, debido a que no todos los trabajos publicados usan el mismo modelo matemático para describirlo. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo determinar los mejores métodos de secado de frutas y/o hortalizas que permitan una mejor capacidad de rehidratación. Para lo cual, en diferentes publicaciones, se analizaron los valores de los parámetros cinéticos de rehidratación obtenidos del modelo de Peleg. En los casos que no se presentaron estos valores, el modelo de Peleg fue aplicado para ajustar las cinéticas de secado experimentales extraídas de los trabajos publicados.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo de estudio

2.1.1. Enfoque

Cuantitativo porque utilizó la medición numérica, el conteo, y analizó estas mediciones mediante métodos estadísticos para establecer con exactitud los patrones de comportamiento en una población (Leo-Amador, 2014).

2.1.2. Nivel

Descriptivo porque la información fue recolectada sin realizar intervención directa. Incluso, se puede considerar como descriptivo correlacional porque estableció las relaciones entre las variables (Hernández Sampieri et al., 2014).

2.1.3. Diseño

El diseño seleccionado para la presente investigación fue el metaanálisis, que es un método que analiza estadísticamente los resultados de estudios primarios, con el fin de resumir los resultados y analizar sus discrepancias (Botella y Zamora, 2017).

Para la búsqueda de datos se tomó en cuenta criterios de inclusión para el análisis de los artículos originales en el idioma inglés que presenten datos de cinéticas de rehidratación de frutas y/u hortalizas previamente deshidratadas. Asimismo, estos artículos debieron encontrarse en el periodo de tiempo de 2009 a 2021, y debieron ser provenientes de revistas de las editoriales como ElSevier, Springer, Wiley, Taylor and Francis y The Gruyter. Para la búsqueda de artículos se emplearon las palabras clave: “Rehydration”, “Water Absorption”, “Rehydration capacity”. “Dehydration” y “Drying”.

Posteriormente, se excluyeron de estos artículos todos los que tengan como objeto de estudio a los cereales y leguminosas, debido a que el fenómeno de absorción de agua es distinto al estudiado. También se excluyeron las investigaciones que consideren un

tratamiento previo al secado.

Para la identificación y selección de los estudios se realizó mediante el flujograma, a través de 4 etapas de la metodología PRISMA (Figura 1). Este método se utiliza para ayudar en la transparencia de las diferentes publicaciones de revisiones sistemáticas y metaanálisis (Urrútia y Bonfill, 2010).

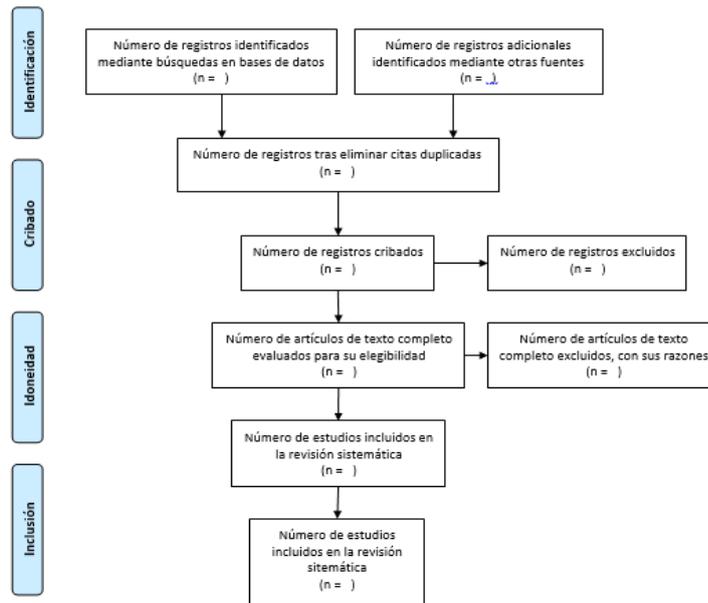


Figura 1. Matriz PRISMA para la Extracción de Artículos

2.1.4. Extracción de datos

Los datos experimentales fueron extraídos de los gráficos de cinética de rehidratación reportados en los artículos seleccionados, incluyendo aquellos trabajos que realizaban el secado sin tratamiento previo como experimento control. Los datos de humedad en base seca, base húmeda y/o masa del producto en función del tiempo de rehidratación fueron extraídos con el software “xyExtract Graph Digitizer”, a partir de los datos mostrados en las gráficas de los trabajos publicados. Estos datos fueron registrados en la matriz de extracción de datos en donde se consideró la fruta y/o hortaliza, el método de secado, condiciones de rehidratación

(temperatura, medio y tiempo) y la información bibliográfica.

2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

2.2.1. Modelamiento matemático

De los artículos que hayan ajustado el modelo de Peleg a la cinética de rehidratación, se consideraron directamente los parámetros obtenidos del modelo. Para los demás trabajos, se ajustó el Modelo de Peleg a los datos experimentales extraídos como se explica a continuación. Esto con el fin de uniformizar los trabajos y poder realizar comparaciones directas relacionadas a los parámetros cinéticos.

El modelo de Peleg (Peleg, 1988) (Ecuación 1) fue ajustado a los datos previamente extraídos de los artículos analizados. El ajuste se realizó mediante un algoritmo de gradiente reducido generalizado empleando el complemento Solver de Excel 2016.

$$M(t) = M_0 + t/(k_1 + k_2 * t) \quad (1)$$

$$Meq = M_0 + 1/k_2 \quad (2)$$

El valor $M(t)$ de la ecuación 1 es la humedad en base seca (d.b) en función del tiempo de rehidratación (min), M_0 es el valor de humedad inicial d.b, el parámetro k_1 representa la inversa de la tasa máxima de absorción de agua (min d.b^{-1}) y el parámetro k_2 está relacionada con la inversa de la capacidad de retención de agua (d.b^{-1}). Adicionalmente se calculó el contenido de humedad en equilibrio, Meq , para poder determinar el porcentaje de rehidratación (% de rehidratación) respecto a la humedad inicial de la materia prima analizada (MOF).

$$\% \text{ de rehidratación del alimento} = Meq/MOF \quad (3)$$

2.2.2. Validación de datos

El modelo de Peleg (ecuación 1) se ajustó a los datos experimentales extraídos de los artículos seleccionados, identificando los valores de k_1 y k_2 que minimizan la suma de errores

cuadrados (SSE) entre los valores experimentales y modelados. Para esto, se utilizó una regresión no lineal utilizando el algoritmo de gradiente reducido generalizado implementado en la herramienta "Solver" de Excel 2016. La evaluación de la bondad de ajuste del modelo se realizó mediante el coeficiente de determinación (R^2), los valores de desviación media cuadrática (RMSD, ecuación 4), la RMSD normalizada (NMRSD, ecuación 5), y se graficaron los valores de humedad obtenidos por el modelo (M_{model}) frente a los valores experimentales ($M_{experimental}$) en la ecuación 6:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{experimental} - M_{model})^2}{n}} \quad (4)$$

$$NMRSD = 100 * \frac{RMSD}{(M_{experimental})_{maximum} - (M_{experimental})_{minimum}} \quad (5)$$

$$M_{model} = a \times M_{experimental} + b \quad (6)$$

En donde a es la pendiente lineal y debe tener un valor lo más aproximado a 1, el b debe ser lo más cercano posible a cero y R^2 debe tener valores cercanos a 1.

Se aplicó un Análisis jerárquico de conglomerados (Hierarchical Cluster Analysis) para clasificar los métodos de secado haciendo uso del software IBM SPSS Statistics 23 (IBM), teniendo como variable de análisis los valores calculados del porcentaje de rehidratación respecto a la humedad inicial de la materia prima para cada estudio. La regla de agrupación utilizada fue el enlace único.

2.3. Aspectos éticos

Este estudio realizó un análisis en profundidad de los estudios recogidos para interpretar los datos de la cinética de rehidratación de forma honesta y objetiva, respetando la propiedad intelectual de los investigadores.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se muestra el proceso de cribado de los trabajos de investigación analizados a partir de los 65 artículos identificados (Fig. 2).

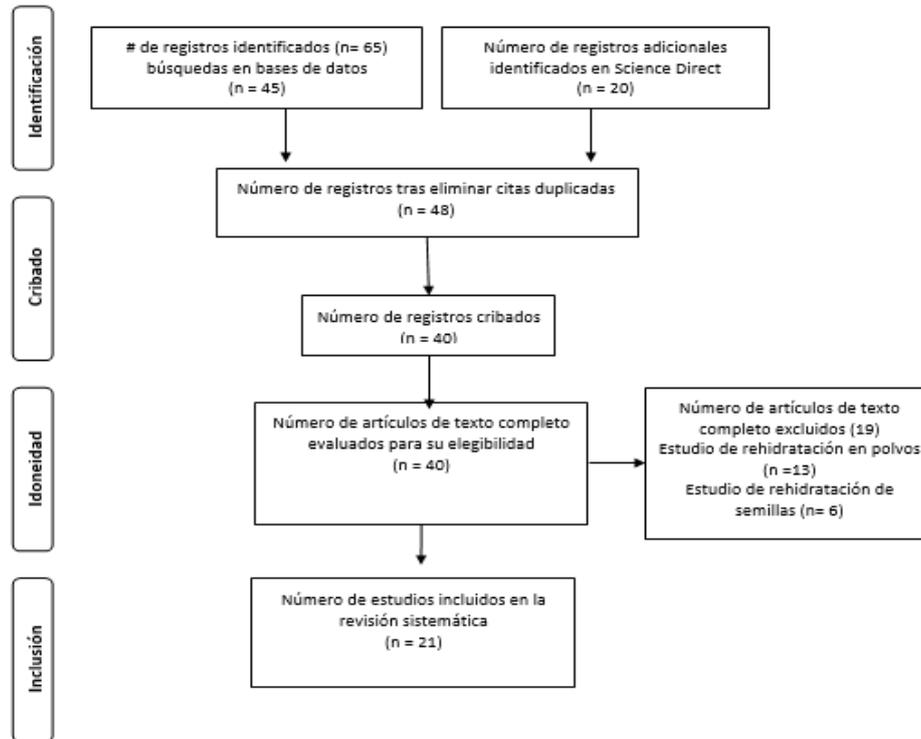


Figura 2. Matriz Prisma de los estudios de rehidratación analizados

Se seleccionaron un total de 21 artículos, que luego fueron analizados, identificando los factores que podrían influir en la cinética de rehidratación, como el método de secado, temperatura de secado, condiciones de secado y las condiciones de rehidratación.

En la Figura 3, se muestra la clasificación de los alimentos que fueron rehidratados y que pudieron ajustarse al modelo de Peleg en base a los datos experimentales. Esta clasificación está dada a partir de la tendencia obtenida de la recopilación bibliográfica en la que el mayor porcentaje de estudios realizados sobre la cinética de rehidratación tienen como producto analizado a alguna hortaliza, abarcando el 66.67%, teniendo como principales productos rehidratados a la calabaza, el tomate y la papa. Mientras que el 33.33% realizó

estudios en frutas como la manzana, arándano, kiwi, entre otros.

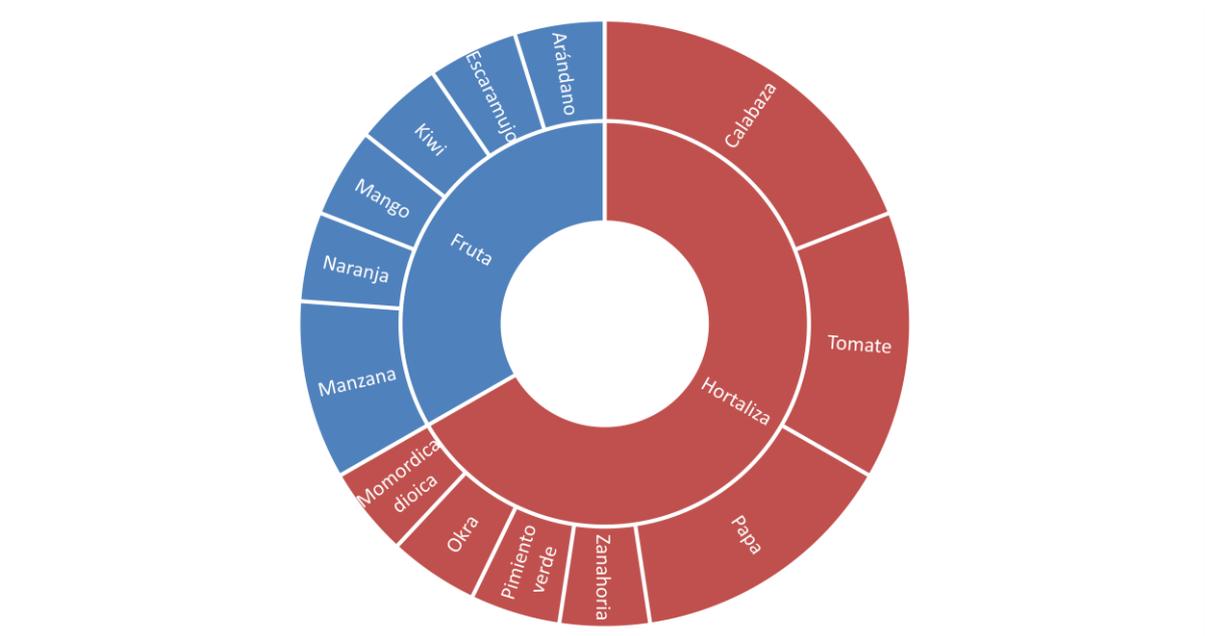


Figura 3. Gráfico solar sobre la materia prima estudiada en los trabajos de investigación recopilados.

Asimismo, en la Tabla 1 se muestran los parámetros cinéticos del modelo de Peleg obtenidos a partir del ajuste de la información extraída de los artículos analizados, tomando en cuenta los métodos de secado, las condiciones del secado y las condiciones de rehidratación de cada estudio. Además, se presenta los valores de los parámetros aplicados para evaluar la bondad de ajuste del modelo de Peleg con los valores de R^2 , RMSD, NMRSD, a y b, de cada fruta y/o hortaliza.

Tabla 1. Matriz de extracción de datos: Parámetros cinéticos y de bondad de ajuste del modelo de Peleg obtenidos del modelado de datos experimentales de los artículos seleccionados.

Fruta y/o Hortaliza	Método de Secado	T °C	Medio de Rehidratación	Tiempo (min)	Parámetros Cinéticos		RMSD	NRMSD	a	b	R ²	Referencia
					k ₁	k ₂						
Arándano (<i>Vaccinium myrtillus</i>)	MOV [0.7 W. g-1, 3-5 kPa]	21	50 mL Agua destilada	180	56.88	0.82	0.008	0.915	0.998	0.002	0.998	Zielinska, M., y Markowski, M. (2016).
	SC [60 ° C, 1 m/s]				19.29	0.66	0.013	0.983	0.999	0.001	0.994	
	SC [80 ° C, 1 m/s]				14.36	0.37	0.073	3.165	0.993	0.013	0.950	
	SC [60°C, 1 m/s] + MO [0.7 W. g-1, 3-5 kPa]				12.67	0.40	0.049	2.246	0.996	0.003	0.971	
	SC [60°C, 1 m/s] + MO [0.7 W. g-1, 3-5 kPa]				13.06	0.35	0.078	2.730	0.993	0.014	0.948	
	SC [80°C, 1 m/s] + MO [0.7 W. g-1, 3-5 kPa]				6.12	0.30	0.016	0.537	1.000	0.000	0.998	
SC [80°C, 1 m/s] + MO [0.7 W. g-1, 3-5 kPa]	6.87	0.27	0.044	1.329	0.999	0.004	0.987					
Calabaza (<i>Cucurbita moschata</i>)	SC [50 ° C, 1 m/s]	24	Agua destilada (0.003:1 p/p)	360	3.46	0.09	0.201	1.987	0.996	0.033	0.994	Carvalho, G. R., Rojas, M. L., Silveira, I., y Augusto, P. E. D. (2020).
Calabaza (<i>Cucurbita moschata</i>)	SC [50 ° C, 1 m/s]	24	Agua destilada	240	16.79	0.11	0.633	0.063	0.999	0.008	0.999	Rojas, M. L., y Augusto, P. E. D. (2018)
Calabaza (<i>Cucurbita moschata</i>)	SC [50 ° C, 0.8 m/s]	25	120 mL de Agua destilada	250	4.89	0.12	2.797	21.188	0.972	15.984	0.990	Rojas, M. L., Silveira, I., y Augusto, P. E. D. (2020).
Calabaza (<i>Cucurbita moschata</i>)	SC [60 ° C, HR 22%, 0,6 m/s]	25	Agua destilada	350	2.43	0.07	0.647	4.569	0.932	0.780	0.973	Monteiro, R. L., Link, J. V., Tribuzi, G., Carciofi, B. A. M., y Laurindo, J. B. (2018).
LF [- 60°C, de 0,002 kPa]	2.27				0.07	0.389	3.008	0.974	0.284	0.992		
SCFM [60 ° C, 3-5 kPa]	5.37				0.22	0.129	2.993	0.993	0.033	0.988		
Calabaza (<i>Cucurbita moschata</i> var. <i>chica brasileña</i>)	MOV [1000W-7min,300W-10min,200 W- 60min, 5 kPa]				6.40	0.48	0.074	3.850	0.911	0.221	0.992	

Fruta y/o Hortaliza	Método de Secado	T °C	Medio de Rehidratación	Tiempo (min)	Parámetros Cinéticos		RMSD	NRMSD	a	b	R ²	Referencia
					k ₁	k ₂						
	MOV [1000W-7min,300W-10min,200 W- 60min, 3 kPa]				7.57	0.48	6.399	3.850	0.911	0.221	0.992	
	SC [70 °C, 5 m/s]	20	Agua destilada	6000	149.14	0.78	0.009	2.036	1.004	-0.002	0.996	
	SC [60 °C, 5 m/s]	40	Agua destilada	6000	50.21	0.48	0.016	1.719	0.999	0.001	0.998	
Escaramujo (<i>Rosa rubiginosa</i> L.)	SC [70 °C, 5 m/s]	40	Agua destilada	6000	13.70	0.76	0.017	1.908	1.008	-0.007	0.997	Ohaco, E. H., Ichiyama, B., Lozano, J. E., y De Michelis, A. (2015).
	SC [80 °C, 5 m/s]	40	Agua destilada	6000	5.47	0.69	0.054	5.556	1.061	-0.057	0.981	
	SC [70 °C, 5 m/s]	60	Agua destilada	6000	40.64	0.40	0.020	1.722	0.998	0.002	0.998	
	SC [70 °C, 5 m/s]	80	Agua destilada	6000	51.03	0.37	0.016	1.472	0.998	0.002	0.998	
	LF [-48 °C, 1.33 kPa]		(1: 50)		0.01	0.28	0.118	3.106	1.017	-0.061	0.983	
Kiwi (<i>Actinida</i>)	LF [-48 °C, 1.33 kPa]		(1: 125)		0.10	0.18	0.225	3.988	1.073	-0.367	0.977	Ergün, K., Çalışkan, G., y Dirim, S. N. (2016).
	LF [-48 °C, 1.33 kPa]	18	(1: 75)	30	0.08	0.21	0.160	3.189	0.998	0.008	0.981	
	LF [-48 °C, 1.33 kPa]		(1: 100)		0.06	0.23	0.184	3.916	0.999	0.006	0.971	
	LF [-48 °C, 1.33 kPa]		(1: 25)		0.09	0.24	0.237	5.151	1.104	-0.411	0.955	
	SC [60 °C, 3,5 m/s]	25			20.65	0.43	0.105	6.689	1.109	-0.273	0.961	
Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	SC [60 °C, 3,5 m/s]	60	Agua destilada 30:1 p / p	125	13.68	0.31	0.119	5.277	1.084	-0.253	0.984	Maldonado, S., Arnau, E., y Bertuzzi, M. A. (2010).
	SC [60 °C, 3,5 m/s]	40			18.11	0.36	0.154	8.765	1.108	-0.289	0.915	
	SC [60°C, 2 m /s]	20			10.84	0.10	0.007	0.088	0.999	0.007	0.996	
Manzana (<i>Granny Smith</i>)	SC [60°C, 2 m /s]	40	Agua destilada	300	5.03	0.09	0.316	3.015	1.024	-0.193	0.993	Zura-Bravo, L., Ah-Hen, K., Vega-Gálvez, A., García-Segovia, P., y Lemus-Mondaca, R. (2013).
	SC [60°C, 2 m /s]	60			4.29	0.07	0.390	3.131	1.034	-0.334	0.994	
	SC [50 °C, 1 m/s]	25	0.0125 g Sample/mL Agua destilada	60	0.69	0.19	0.060	1.209	0.993	0.031	0.998	
Calabaza espinosa	SC [60 °C, 2 m/s]	27	Agua destilada	250	3.39	0.18	0.194	3.744	1.072	-0.328	0.983	Kumar, Y., Sharanagat, V. S., Singh, L., y Nema, P. K. (2019).
	SC [70 °C, 2 m/s]				4.66	0.16	0.170	2.928	1.058	-0.282	0.991	

Fruta y/o Hortaliza	Método de Secado	T °C	Medio de Rehidratación	Tiempo (min)	Parámetros Cinéticos		RMSD	NRMSD	a	b	R ²	Referencia
					k ₁	k ₂						
<i>(Momordica dioica)</i>	SC [50 °C, 2 m/s]				6.75	0.18	0.149	2.975	1.057	-0.234	0.994	
	SC [40 °C, 2 m/s]				5.88	0.17	0.180	3.520	1.050	-0.220	0.990	
Naranja <i>(Citrus X sinensis)</i>	SCV [60°C. 30 KPa]	30	Agua destilada	660	27.01	0.39	0.076	3.121	1.018	-0.039	0.987	Özkan-Karabacak, A., Açoğlu, B., Yolci Ömeroğlu, P., y Çopur, Ö. U. (2020).
Okra <i>(Abelmoschus esculentus)</i>	SC [70 °C, 0.3 m/s]	60	Agua destilada	240	6.30	0.16	0.195	3.685	1.018	-0.156	0.989	Tüfekçi, S., y Özkal, S. G. (2017).
	SC [60 °C, 0.3 m/s]				10.56	0.17	0.225	5.103	1.061	-0.335	0.984	
Papa <i>(Solanum tuberosum)</i>	SC [40°C, 1 m/s]	24	0,072: muestra seca: agua (p / p).	1 800	27.77	0.35	0.049	1.864	0.981	0.040	0.995	Guedes, J. S., Santos, K. C., Castanha, N., Rojas, M. L., Matta Junior, M. D., Lima, D. C., y Augusto, P. E. D. (2021).
Papa <i>(Solanum tuberosum)</i>	IR [100°C]	25	Agua destilada	200	10.22	0.38	0.025	1.065	0.998	0.004	0.998	Rojas, M. L., Silveira, I., y Augusto, P. E. D. (2019).
Papa <i>(Solanum tuberosum)</i>	IR [100°C]	24	50 mL de Agua destilada	400	7.30	0.25	0.069	1.867	0.989	0.034	0.994	Rojas, M. L., y Augusto, P. E. D. (2018).
Pimiento verde <i>(Capsicum annuum)</i>	MOV [100 W, 53.329 KPa]	30	Agua destilada	600	30.35	0.11	0.201	3.736	0.984	0.068	0.986	Kumar, V., Devi, M. K., Panda, B. K., y Shrivastava, S. L. (2019)
	MOV [300 W, 53.329 KPa]				11.99	0.13	0.160	2.459	0.995	0.029	0.994	
	MOV [200 W, 53.329 KPa]				12.22	0.08	0.145	1.590	0.993	0.054	0.998	
Tomate <i>(Solanum lycopersicum)</i>	LF [-110°C, 0.01 KPa]	20	Agua destilada	50	0.10	0.17	0.393	6.433	0.875	0.721	0.955	Lopez-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P. J., Norton, I. T., y Bakalis, S. (2019).
	LF [-110°C, 0.01 KPa]	50			0.05	0.13	0.521	6.950	0.803	1.457	0.983	
	LF [-110°C, 0.01 KPa]	40			0.06	0.11	0.686	7.461	0.848	1.321	0.943	
	SC [60°C, 2 m/s]	25			4.55	0.19	0.140	2.865	1.024	-0.110	0.980	
Tomate <i>(Solanum lycopersicum)</i>	SC [60°C, 2 m/s]	40	Agua destilada	600	4.49	0.20	0.049	1.014	1.008	-0.039	0.998	Goula, A. M., y Adamopoulos, K. G. (2009).
	SC [60°C, 2 m/s]	80			3.70	0.21	0.129	2.695	0.986	0.064	0.970	
	SC [60°C, 2 m/s]	60			3.71	0.21	0.252	5.380	0.978	0.094	0.913	

Fruta y/o Hortaliza	Método de Secado	T °C	Medio de Rehidratación	Tiempo (min)	Parámetros Cinéticos		RMSD	NRMSD	a	b	R ²	Referencia
					k ₁	k ₂						
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	SC [40 °C, 1 m/s]	25	Agua destilada	240	6.24	0.18	0.110	2.369	0.993	0.033	0.988	Gaware, T. J., Sutar, N., y Thorat, B. N. (2010).
	SCS [52.5°C, 1 m/s]				0.68	0.15	0.155	2.991	0.990	0.045	0.974	
	SCB [41°C, 1 m/s]				5.01	0.16	0.119	2.214	0.986	0.063	0.986	
	MOV [42.5 °C, 300-600W, 8 KPa]	100	Agua destilada	25	0.74	0.13	0.075	1.306	0.999	0.007	0.991	
	SCS [52.5°C, 1 m/s]				4.34	0.12	1.263	20.043	1.019	-0.102	0.987	
	SC [40 °C, 1 m/s]				0.47	0.13	0.240	4.054	1.016	-0.087	0.959	
	SCB [41°C, 1 m/s]				1.94	0.14	0.117	1.881	0.993	0.040	0.985	
MOV [42.5 °C, 300-600W, 8 KPa]	0.25	0.14	0.184	3.005	1.065	-0.360	0.985					
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	SC [40 °C, 2 m/s]	25	400 mL Agua destilada	75	6.07	0.14	0.124	2.831	1.003	-0.007	0.988	Ricce, C., Rojas, M. L., Miano, A. C., Siche, R., y Augusto, P. E. D. (2016).
	SC [60 °C, 2 m/s]	25	400 mL Agua destilada	75	3.92	0.17	0.166	3.993	1.021	-0.070	0.977	

Nota: SC: Secado Convectivo; SCV: Secado convectivo al vacío; SCS: Secado Convectivo Solar; SCB: Secado Convectivo asistido con una Bomba de Calor; SCFM: Secado Convectivo Flash Múltiple; MOV: Microondas al vacío; MO: Microondas; LF: Liofilizado; IR: Infrarrojos.

Los parámetros de bondad de ajuste mostrados en la Tabla 1 demuestran que el modelo tiene un adecuado ajuste, siendo válido para realizar el análisis del comportamiento de la cinética de rehidratación tanto en frutas y/o hortalizas. Por ejemplo, los coeficientes de determinación son superiores al 92%, los valores de RMSD Y NMRSD relativamente bajos, los valores de “a” cercanos a uno y valores de “b” cercanos a cero.

La cinética de rehidratación se encuentra influenciada por la temperatura de rehidratación (Benseddik et al., 2019). Inclusive, se ha demostrado que la rehidratación a menos de 40 °C puede conservar la estructura original de las pectinas presentes en la pared celular del alimento, mejorando la capacidad de absorción de agua por el tejido (Marín B et al., 2006). A partir de estos hallazgos se analizó la cinética de rehidratación de los distintos productos mediante la formación de dos grupos según la temperatura de rehidratación. El primer grupo se conformó con experimentación a temperatura baja, de 18°C a 30°C, mientras que el segundo grupo estuvo conformado por estudios a temperatura alta, de 30°C a 100°C. Este análisis se centró en los parámetros del modelo de Peleg, k_1 y k_2 .

La Figura 4 muestra la influencia de los métodos de secado en la velocidad de absorción de agua (k_1), en el rango de temperatura de rehidratación de 18°C a 30°C de las diferentes frutas y/o hortalizas de los estudios analizados. Se observa tres grupos marcados, los que obtuvieron una tasa de rehidratación alta, intermedia y baja. Cabe recordar, que mientras menor sea el valor de k_1 , mayor será la velocidad de rehidratación.

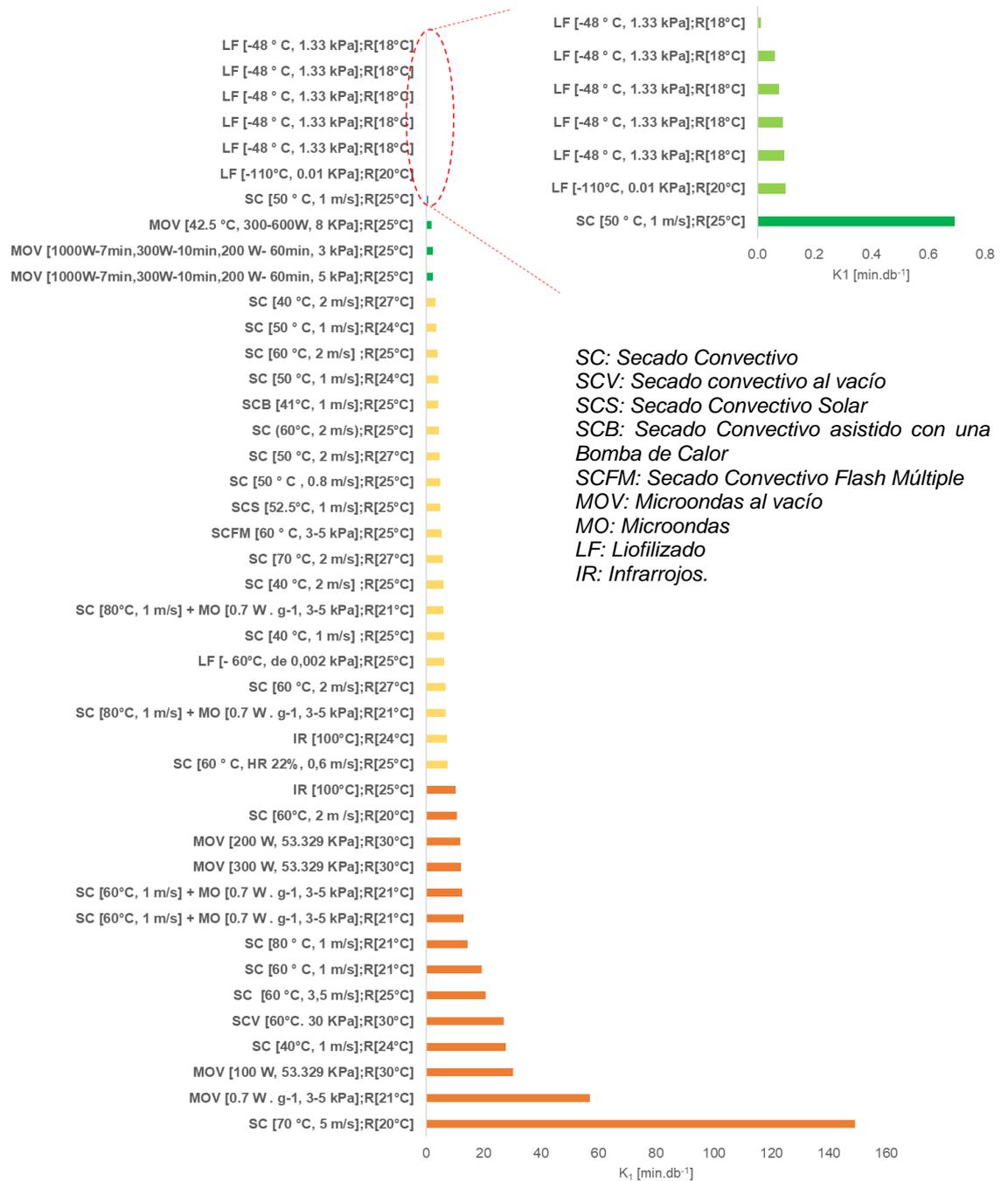


Figura 4. Gráfico de barras del parámetro k_1 para las temperaturas de rehidratación de 18°C a 30°C.

Como se puede observar en la Figura 4, los valores de k_1 más bajos están representados por los estudios que realizaron el proceso de secado a través de la liofilización (barras de color verde claro), los cuales tienen una rehidratación más rápida, lo que indica que el producto

que fue secado por este método tiene una mayor tasa de rehidratación. El estudio realizado por Ergün, et. al., (2016), mostraron que el método de secado a kiwis por liofilización permite que el producto tenga una estructura preservada, causando la formación de una porosidad alta en la estructura de la fruta, implicando una alta tasa rehidratación. Otro de los métodos con menor k_1 (barras de color verde oscuro), es el secado de calabaza por microondas al vacío realizado en tres etapas, ocasionando un gran cambio en la estructura del alimento y creando poros grandes, por ende, facilita la absorción de agua durante la rehidratación (Monteiro, et al., 2018). Por otro lado, también se observa una tendencia de la velocidad de rehidratación intermedia (barras amarillas) en los métodos de secado convectivo a temperaturas de 40°C y 60°C. Por último, el método que tiene un valor de k_1 mayor, es el secado convectivo a 70 °C, en el cual se da una rehidratación muy lenta, ya sea por la estructura natural del producto (escaramujo, el cual presenta una cutícula muy dura y cerosa), como también del método de secado a una temperatura alta (Mabellini et al., 2011; Ohaco, et al., 2014).

Por lo tanto, en cuanto a los factores que afectan a la rehidratación del alimento se encuentran: el tipo de sólido a secar, el método de secado y las condiciones de esta. Dentro las condiciones del método de secado, está involucrada la temperatura y la velocidad de secado. Ambas condiciones cuando son altas, tanto la temperatura y la velocidad de aire causa el endurecimiento y contracción de la superficie del alimento, por lo cual, estos efectos ocasionan la formación de una estructura densa en el alimento, y posteriormente ocasiona una rehidratación lenta, como también la pérdida de la capacidad para la reconstitución del alimento. Además, la velocidad de absorción de cada alimento depende de la estructura interna de las piezas secas y de la medida en que los componentes como las proteínas que retienen agua se hayan dañado (Krokida, MK y Philippopoulos, C., 2005).

Y, por último, el estudio realizado por Zielinska, et. al, (2016), demuestra que el

secado por microondas al vacío, tienen un proceso muy lento de rehidratación con el arándano. Con esto se demuestra que, a pesar de usar el mismo método de secado (convectivo, microondas al vacío, u otro) la tasa de rehidratación del producto es muy dependiente de las condiciones del proceso del secado, al comparar el mismo producto.

En la Figura 5, se muestra el análisis del parámetro k_1 , del modelo de Peleg, para las temperaturas de rehidratación entre 40 °C y 100 °C según el método de secado y sus condiciones.

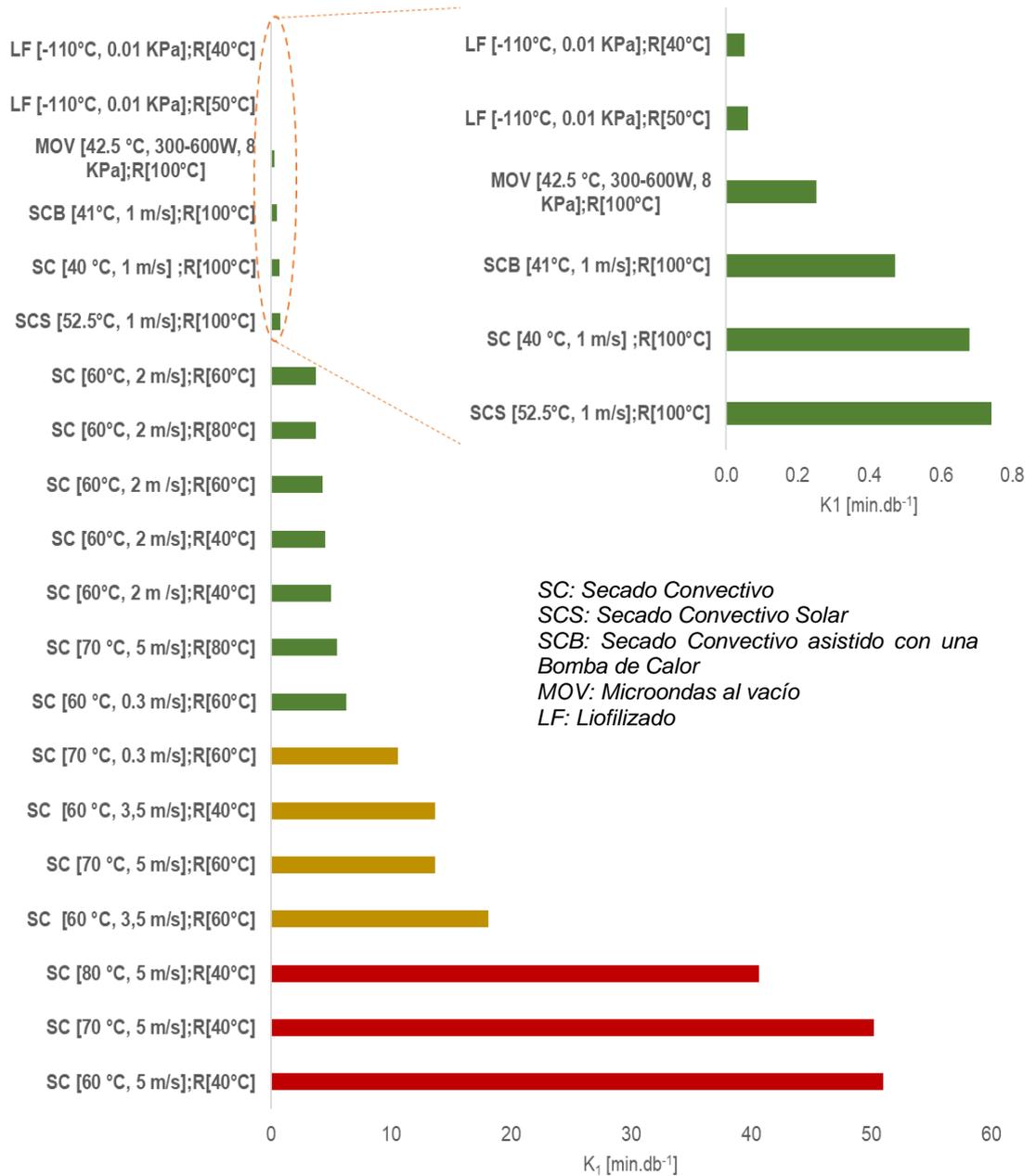


Figura 5. Gráfico del parámetro k_1 (min/d.b) obtenido para productos rehidratados a temperaturas en el rango de 40°C a 100°C

En la Figura 5 se clasificaron 3 grupos de acuerdo con la velocidad de rehidratación. El primer grupo (barras rojas) fue el más lento, el segundo (barras amarillas) fue el segundo más lento; mientras que el tercer grupo (barras verdes) fue el más rápido. Este comportamiento está fuertemente influenciado por la temperatura de rehidratación, pues la tasa de rehidratación aumenta directamente proporcional al aumento de la temperatura del medio de rehidratación (Gaware et al., 2010; Maldonado et al., 2010; Marín B et al., 2006;

Ohaco et al., 2015; Pei et al., 2014; Ricce et al., 2016; Tüfekçi & Özkal, 2017). El comportamiento se puede explicar por los cambios de temperatura realizados en el medio, principalmente por el gradiente de calor interno del alimento y el que se presenta en el medio de rehidratación (Markowski et al., 2009). Además de ello, la presión elevada que se genera a altas temperaturas facilita la entrada del líquido de inmersión al lugar intercelular de los gases (Marín B et al., 2006; Zura-Bravo et al., 2013).

Por otro lado, al igual que en el rango de temperaturas estudiado anteriormente, el método de secado por liofilización realizado en tomate demostró tener la mayor velocidad de rehidratación. Incluso, llegando a superar a procesos de rehidratación a 100°C en tomate secado con métodos convectivos y convectivos asistidos al vacío (Gaware et al., 2010). Akar y Mazi (2019) argumentan que, en productos liofilizados, la temperatura de rehidratación no tiene efecto y que la alta tasa de rehidratación que se produce en este proceso se debe a la transformación de la estructura intrínseca del alimento en una estructura lisa y esponjosa. El secado por microondas asistido al vacío realizado en el tomate presentó la segunda mayor velocidad de rehidratación, debido a la modificación estructural durante el secado que permitió la rápida imbibición de agua a las cavidades y capilares de la superficie del alimento hasta llegar al equilibrio (Gaware et al., 2010; Lewicki, 1998; Monteiro et al., 2018). El secado convectivo de escaramujo (barras rojas) presentó la menor velocidad de rehidratación debido a su estructura compleja descrita anteriormente (Mabellini et al., 2011; Ohaco et al., 2015).

La Figura 6, muestra la influencia de los métodos de secado en el parámetro k_2 . El parámetro k_2 , es la constante de capacidad de Peleg, relacionada con la capacidad de retención de agua y el contenido máximo de humedad después de un largo tiempo de rehidratación (Marques et al., 2009; Ricce et al., 2016). Este parámetro está inversamente relacionado con la ganancia máxima de masa total a lo largo del proceso de rehidratación.

El método con el mayor valor de k_2 , es el método de secado por microondas al vacío de arándano (Zielinska y Markowski, 2016). Esto puede deberse a que cuando el método de secado es muy severo (alta temperatura y potencia) puede ocasionar un gran cambio a la estructura y composición del producto, lo cual causa que pierda su capacidad para reabsorber agua. Asimismo, Monteiro et al. (2018), realizó el secado de calabaza con el mismo método por microondas al vacío, el cual arrojó un valor mínimo de k_2 , lo que quiere decir que las condiciones de secado influyen en los parámetros de rehidratación a pesar de ser el mismo método de secado. Una diferencia entre ambos estudios es la forma de aplicación del método, ya que en el estudio del arándano se aplica el método de secado por microondas al vacío en sucesivas etapas de calentamiento, a lo que ello genera una estructura con poros grandes en el alimento, mientras que en el estudio de la calabaza se da la aplicación del secado en una sola etapa. Y, por último, otra diferencia entre ambos estudios es el tipo de alimento (la estructura y composición) a secar.

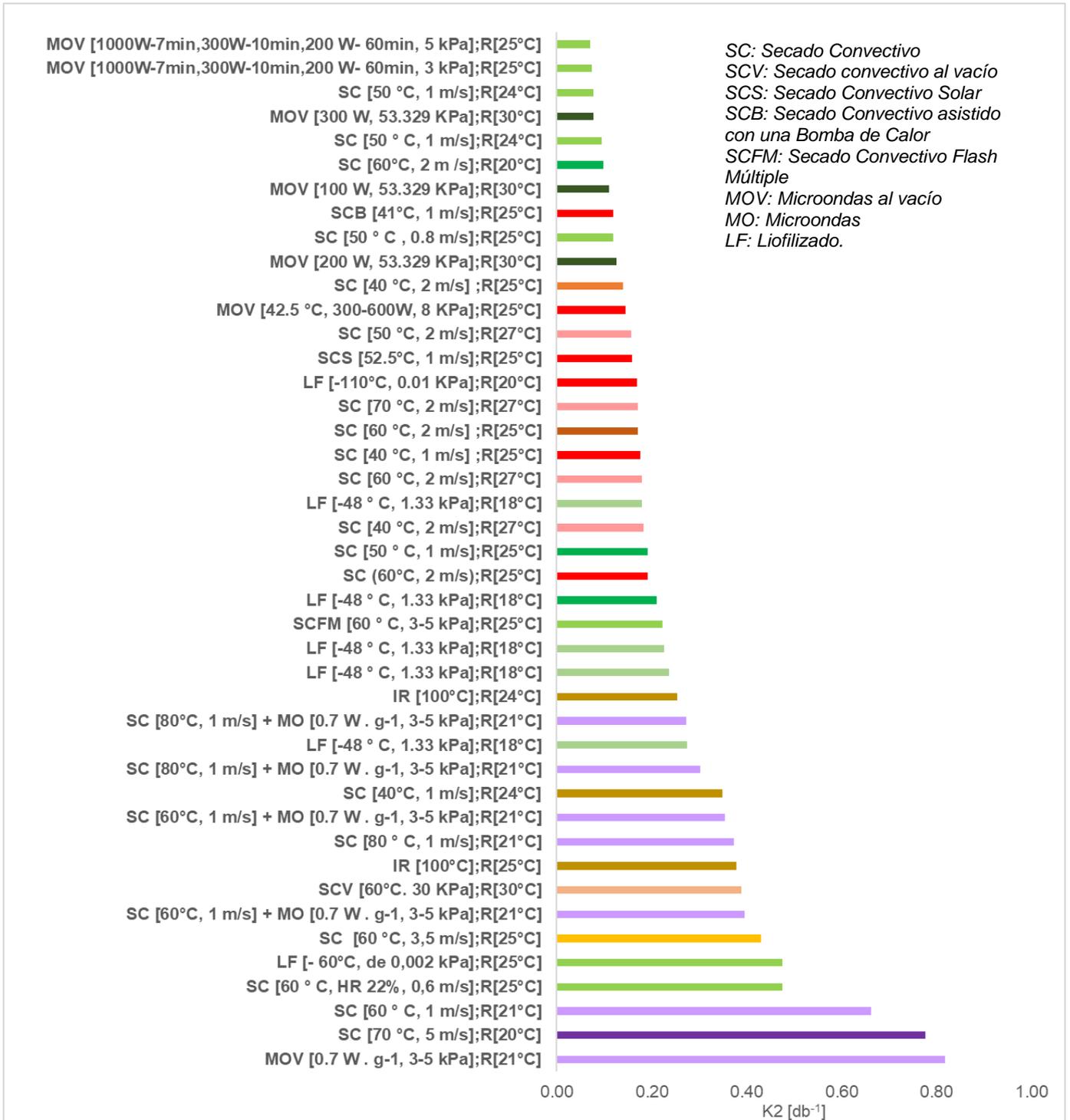


Figura 6. Valores del parámetro k_2 para muestras secadas con diferentes métodos de secado y rehidratados a temperaturas de 18°C a 30°C

En la figura 7 se muestra el análisis del parámetro k_2 , del modelo de Peleg, para las temperaturas de rehidratación entre 40°C y 100°C según el método de secado y sus condiciones.

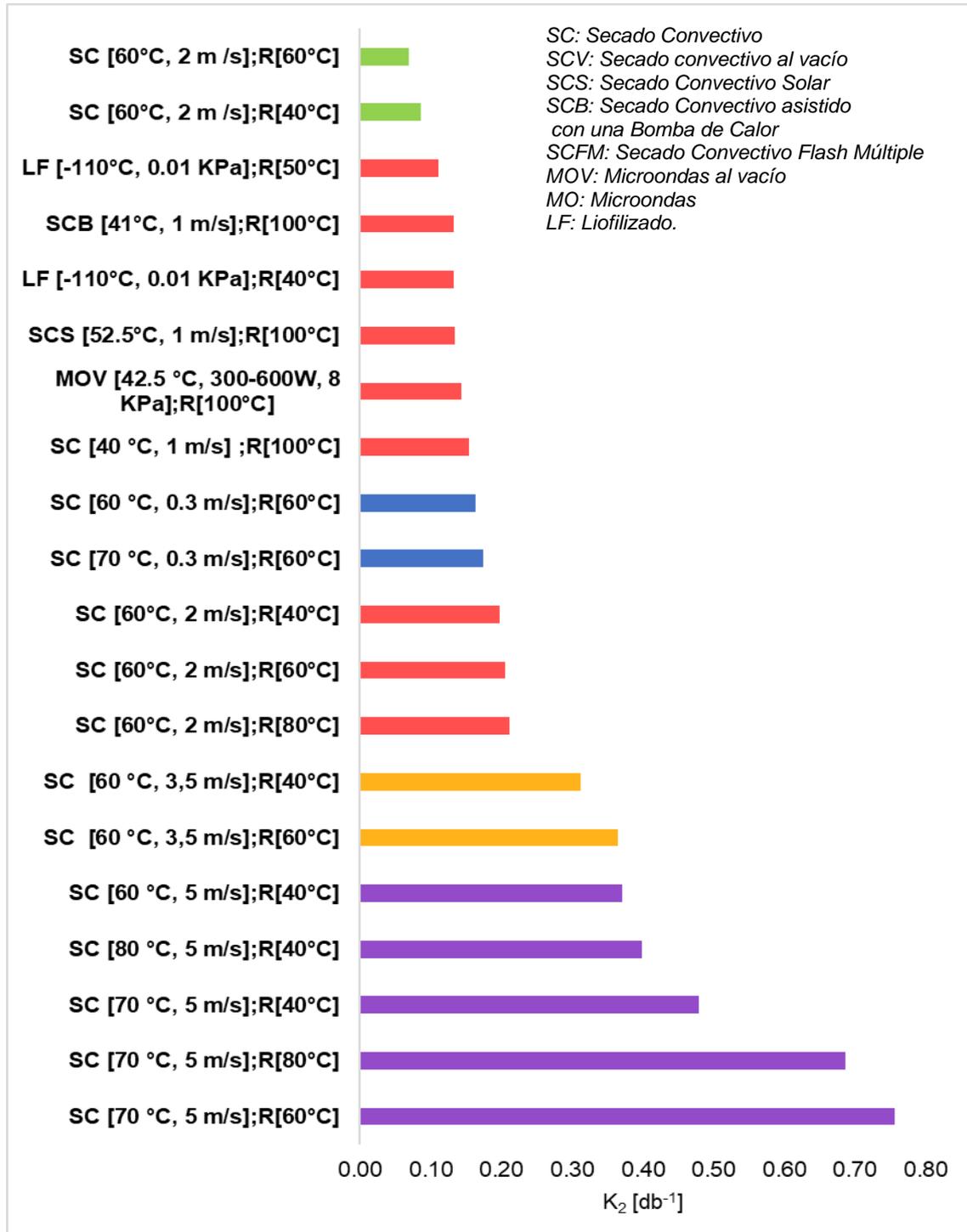


Figura 7. Valores del parámetro k_2 para muestras secadas con diferentes métodos de secado y rehidratados a las temperaturas de 40°C a 100°C.

En la figura 7 se clasificaron 5 grupos considerando que la estructura del alimento es el principal factor por considerar para analizar el parámetro k_2 (Goula & Adamopoulos, 2009; Ohaco et al., 2015; Wang et al., 2019). Precisamente es este factor el que ha hecho posible la formación de grupos, al tener como similitud sus propiedades estructurales y composición. El primer grupo (barras moradas) representa al escaramujo que es el producto rehidratado que tiene menor capacidad de retención de agua, el segundo grupo (barras anaranjadas) representa al mango, el tercer grupo (barras rojas) representa al tomate, el cuarto grupo (barras azules) representa a las okras, y el quinto grupo (barras verdes) representa a la manzana que es el producto rehidratado con mejor capacidad de retención de agua. Los valores altos de k_2 para el escaramujo se debieron principalmente a su estructura, ya que este fruto presenta una capa externa impermeable que evita la entrada del agua al alimento (Mabellini et al., 2011). Sin embargo, una vez penetrada esa capa, el agua entra a los espacios vacíos de la estructura, llegando a contenidos de humedad superiores al producto en fresco (Ohaco et al., 2015; Pashazadeh et al., 2020). Mientras que la elevada capacidad de rehidratación de la manzana probablemente se debe a la desintegración de la laminilla media y la estructura abierta fragmentada producida por el aumento de la temperatura (Zura-Bravo et al., 2013).

Por otro lado, en los productos que han sido secados bajo el mismo método y condiciones de secado se evidencia la influencia de la temperatura de rehidratación, la cual es directamente proporcional al valor del parámetro de capacidad de Peleg, k_2 . Lo que quiere decir que, al usar temperaturas altas de rehidratación, evita que el producto absorba agua de forma adecuada. Por ejemplo, el tomate (barras rojas) secado mediante secado convectivo a 60°C , presentó menores valores de k_2 cuando se rehidrató a una temperatura de 40°C (0.19 db^{-1}) en comparación a la rehidratación 80°C (0.21 db^{-1}). También se puede apreciar el mismo fenómeno en el mango deshidratado mediante secado convectivo

a 60°C, que tuvo una mejor capacidad de rehidratación a 40 °C (0.31 db⁻¹) que a 60°C (0.37 db⁻¹). Incluso el escaramujo secado mediante secado convectivo a 70 °C mejoró su capacidad de rehidratación cuando se rehidrató a 40°C (0.48 db⁻¹) que a 80 °C (0.69 db⁻¹). Meda y Ratti (2005) explican que cuando la temperatura de rehidratación es superior a la temperatura de transición vítrea del alimento, el riesgo de colapso estructural (pérdida de estructura, reducción del tamaño de los poros, contracción volumétrica, etc.) aumenta considerablemente, lo que provoca una menor absorción de agua a temperaturas elevadas.

En la Figura 8 se muestra el análisis del porcentaje de rehidratación de los alimentos rehidratados entre las temperaturas de 18°C y 100°C según el método de secado y sus condiciones.

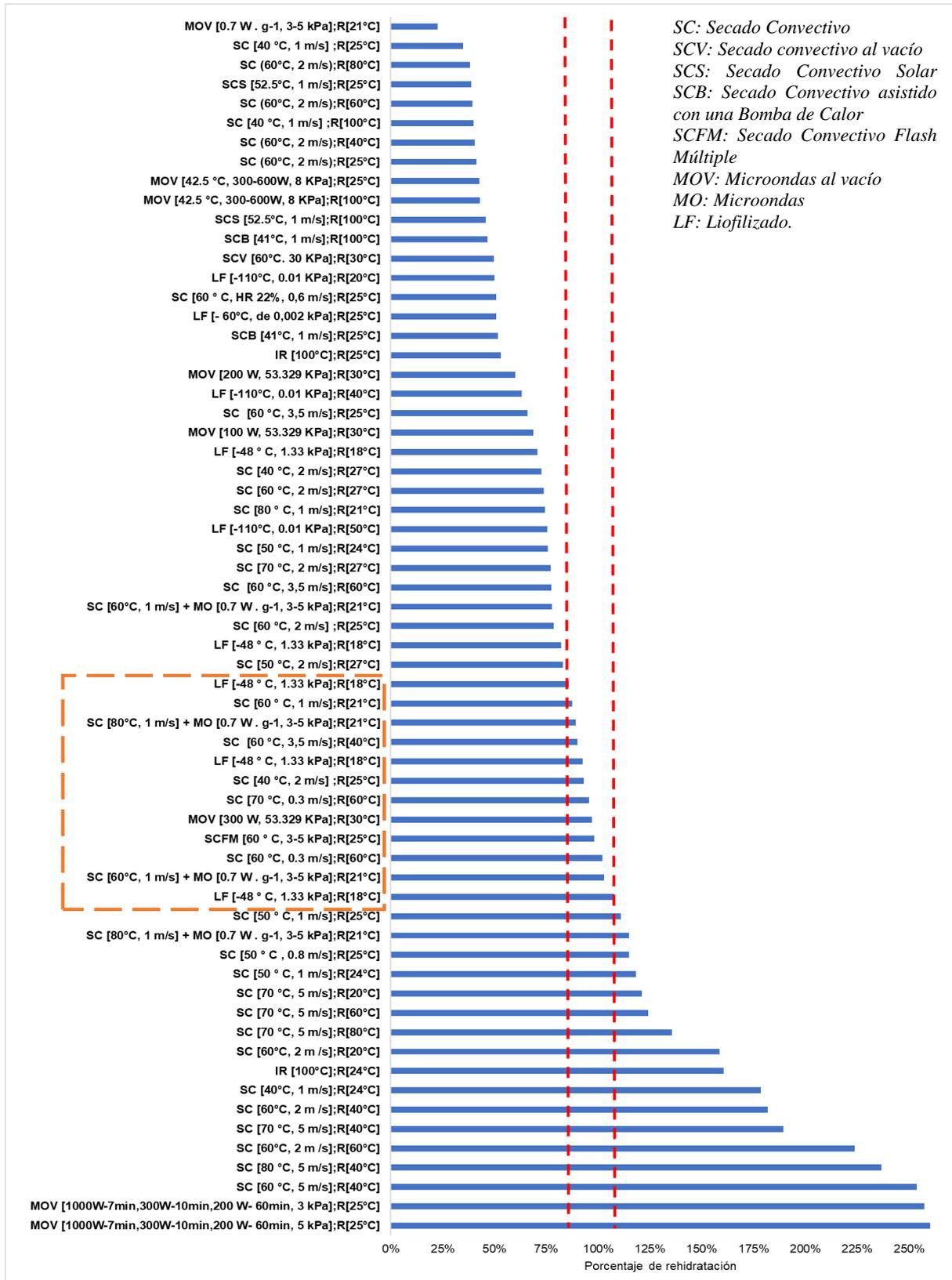


Figura 8. Porcentaje de rehidratación de los productos a temperaturas entre 18°C y 100°C.

Nota: Las líneas verticales rojas indican una banda de valores entre 90 % y 110%. Los métodos incluidos en ese rango están indicados en el cuadrado de líneas discontinuas anaranjadas.

En la Figura 8 se puede apreciar que se ha establecido un rango de porcentaje de rehidratación óptimo de $100\% \pm 10\%$ (cuadrado anaranjado) y se han excluido aquellos alimentos con porcentaje de rehidratación entre 23% y 90%, y aquellos que tienen un porcentaje de rehidratación entre 110% y 268%. Es necesario señalar que los métodos de secado con valores más altos, a pesar de haber llegado a rehidratar hasta un 268% respecto a su humedad inicial no significa necesariamente un aspecto positivo. Esto debido a la posibilidad de que el producto no haya mantenido sus componentes característicos y que por ende no se pueda reconstituir sus características deseadas. En otras palabras, el alimento tendría más agua de lo normal que sólidos como azúcares, vitaminas, entre otros que pudieron haber sido perdidos durante el secado y/o la rehidratación. Estos valores de rehidratación fueron reportados por Monteiro (2018), Ohaco et al. (2015) y Zura-Bravo et al. (2013) quienes estudiaron calabaza, escaramujo y manzana respectivamente. En el primer caso, la alta presión de vapor interna generada por el calentamiento por microondas y la baja presión de la cámara producida por el vacío hicieron que la estructura del alimento se expandiera e hinchara (Chen et al., 2013; Monteiro et al., 2018). El segundo caso está influenciado fuertemente por la incorporación de agua en los espacios generados, ocupados inicialmente por semillas y capilares (Mabellini et al., 2011; Ohaco et al., 2015). En el último estudio se observa un comportamiento similar al primer estudio analizado, pues se genera una expansión en el producto luego del secado, debido a los cambios estructurales en el alimento (Zura-Bravo et al., 2013). Asimismo, los estudios con porcentajes de rehidratación entre 23% y 90%, como el arándano secado por MOV y el kiwi secado por LF, tienen este comportamiento debido a las características intrínsecas del alimento (principalmente la composición y estructura) que delimitarán el rango de temperaturas de rehidratación que se pueden aplicar después del secado (Meda & Ratti, 2005; Zura-Bravo et al., 2013). Finalmente, el rango de rehidratación entre 90% y 110%

(definido como el rango de mejor calidad de rehidratación), indica que los productos rehidratados presentan una humedad similar al de los productos frescos. En este rango predominan los secados convectivos con temperaturas de 40°C a 70°C y con velocidades de aire menores a 2 m/s. Asimismo, la temperatura de rehidratación debe estar entre 18 °C y 30 °C para obtener este resultado óptimo en productos como arándano, okra, calabaza, zanahoria y mango.

El presente estudio estuvo limitado por la variabilidad de los métodos de secado y sus condiciones. Sin embargo, se pudo identificar, en los estudios analizados, que el secado convectivo fue el predominante. Por lo que se hizo una comparación específica considerando solo los productos que fueron deshidratados por método del secado convectivo. Para poder identificar la existencia de alguna similitud entre los efectos de las condiciones de secado convectivo a diferentes temperaturas sobre los resultados del porcentaje de rehidratación calculado, se realizó un análisis de clúster representado en la Figura 9.

En la Figura 9 se muestra la clasificación en cinco grupos para todos los estudios que realizaron secado convectivo. El primer grupo presenta porcentajes de rehidratación entre el rango de 65% y 102%, el segundo 111% y 135%, el tercero entre 34% y 50%, el cuarto entre 224% y 253%, el quinto entre 158% y 189%. Esta clasificación toma en cuenta principalmente las diferencias estructurales de cada alimento secado con el método convectivo, pues es la estructura el factor que determina la constante de capacidad de rehidratación (k_2) del alimento (Planinić et al., 2005). Asimismo, se ve un efecto de la temperatura de secado inversamente proporcional al porcentaje de rehidratación. Este resultado también fue observado por Wang (2019), quien señala que el comportamiento se debe a la formación de una capa superficial que impide la capacidad de reconstitución del alimento. Asimismo se observa una ligera influencia de la velocidad de aire, que al igual

que la temperatura de secado, produce deformación celular (Marín B et al., 2006).

Dependiendo del daño estructural del alimento y de su temperatura de transición vítrea,

generará cambios en la cinética de rehidratación ya sea incrementando, si es que la

temperatura de rehidratación es inferior a la temperatura de transición vítrea; o en su

defecto disminuirá, si la temperatura de rehidratación es mayor a la temperatura de

transición vítrea (Meda & Ratti, 2005; Zura-Bravo et al., 2013). Este fenómeno se

encuentra marcado en los secados convectivos realizados en tomate, que se vieron

limitados por su contenido de humedad inicial, pues es este factor el determinante de la

temperatura de transición vítrea (Gaware et al., 2010; Goula & Adamopoulos, 2009; Meda

& Ratti, 2005).

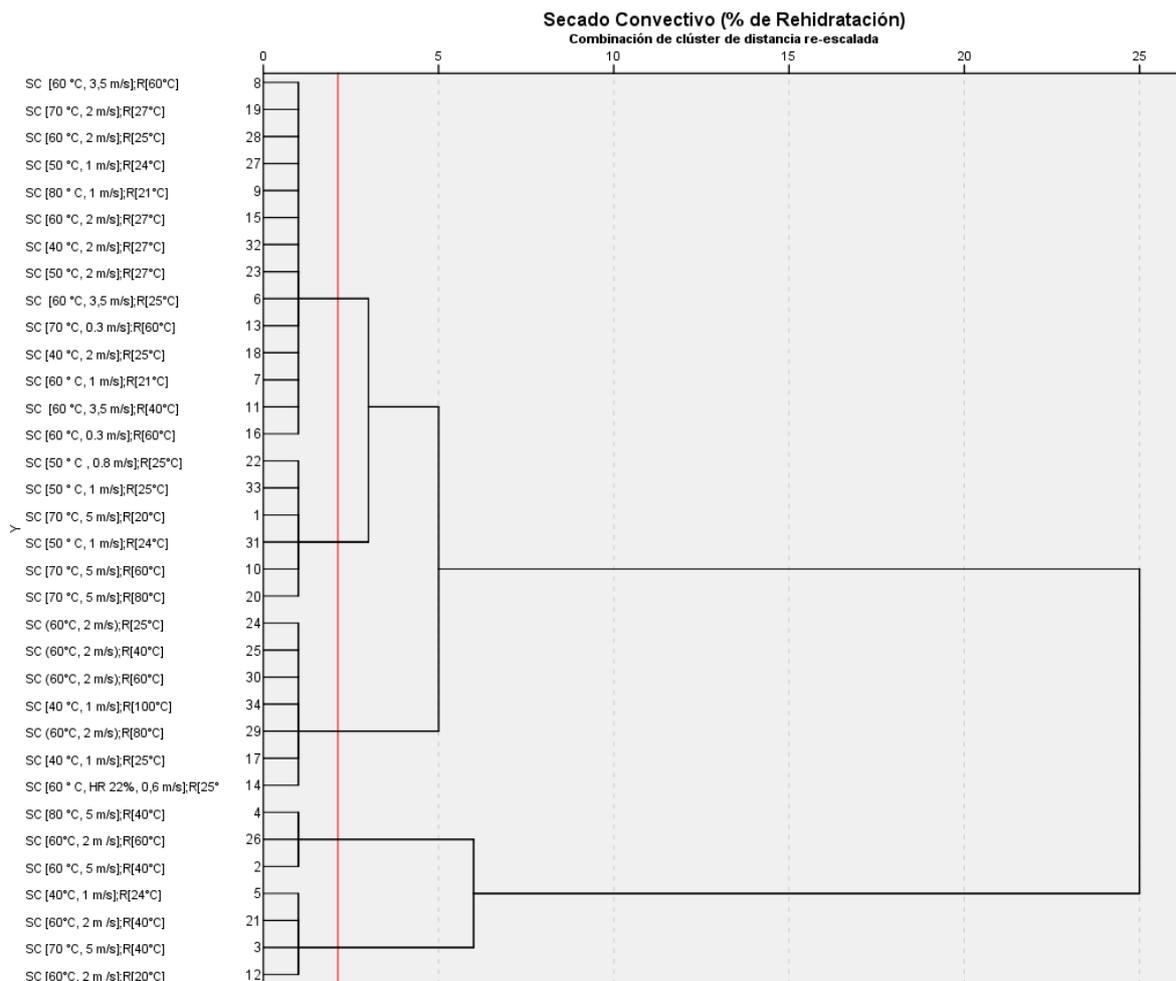


Figura 9. Dendrograma de los trabajos que realizaron secado convectivo a diferentes condiciones y rehidratación a diferentes temperaturas.

Consideraciones Finales

Cabe señalar que entre las limitaciones encontradas al llevar a cabo la presente investigación fueron el número limitado de artículos disponibles que cumplieron con los criterios de selección definidos y que presentaron datos idóneos para ser extraídos y analizados. No todos los estudios de secado de alimentos estudian la cinética de rehidratación del producto como análisis de calidad final. Un producto con buena capacidad de rehidratación nos puede indicar que el método de secado aplicado fue adecuado.

Los resultados del presente estudio implican por tanto en que la existencia de un método y una temperatura de secado óptima se encontrará en función de las características intrínsecas (estructura y composición) del alimento analizado. Por otro lado, en cuanto a capacidad de rehidratación, los métodos de secado por liofilización y el de microondas al vacío en tres etapas, generan propiedades favorables en la estructura del alimento obteniendo alimentos porosos. Por lo que, en estudios futuros sería recomendable su aplicación en productos aún no estudiados como aguaymanto, camu-camu y chirivía. Además, se podría evaluar si el método de secado de microondas al vacío en tres etapas sería una alternativa económica a la liofilización.

Adicionalmente al tipo de método de secado, las diferentes condiciones del proceso como temperatura de secado, velocidad de aire, potencia, humedad relativa, entre otros, afectan de alguna manera la velocidad y la capacidad de rehidratación de los vegetales. Por otro lado, los resultados del presente estudio pueden generar implicaciones como la existencia de una temperatura de secado convectiva óptima ya que se ha verificado que esta variable es la que más afecta al proceso, considerando los efectos positivos en la rehidratación se sugiere un rango de temperaturas de secado convectivo de 40 a 70 °C. Sin embargo, es importante recalcar que las condiciones óptimas de secado estarán en función

de las características físicas e intrínsecos del alimento a procesar. Incluso, se debe considerar incluir para futuros trabajos el cálculo de la temperatura de transición vítrea para cada alimento según su contenido de humedad en fresco. Por otro lado, de los resultados se pudo observar que entre los métodos de secado más prometedores para estudios futuros con otros productos son los métodos por liofilización y el de microondas al vacío en tres etapas. Aunque este último es más novedoso y es el que genera propiedades favorables en la estructura del alimento obteniendo un alimento poroso, esto se pudo observar en el estudio de secado de la calabaza.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

El presente estudio se evaluaron los distintos métodos de secado aplicados en frutas y/o hortalizas que permitan mejorar la capacidad de rehidratación. En primer lugar, se pudo identificar que la calabaza secada por microondas al vacío en tres etapas tiene grandes perspectivas por sus valores de ratio (k_1 de $2.27 \text{ min}\cdot\text{d}\cdot\text{b}^{-1}$ a $2.43 \text{ min}\cdot\text{d}\cdot\text{b}^{-1}$) y capacidad de rehidratación ($0.071 \text{ d}\cdot\text{b}^{-1}$ a $0.074 \text{ d}\cdot\text{b}^{-1}$), este método llegó a tener un porcentaje de rehidratación mayor a diferencia de los demás métodos. Por otro lado, el kiwi secado por liofilización, a pesar de ser más rápido (k_1 de $0.001 \text{ min}\cdot\text{d}\cdot\text{b}^{-1}$), tiene un menor valor de capacidad de rehidratación (k_2 de $0.28 \text{ d}\cdot\text{b}^{-1}$), incluso el producto liofilizado solo pudo llegar a un porcentaje de rehidratación de 71%, a comparación del 268% de rehidratación de la calabaza secada por microondas. Adicionalmente, se identificó al secado convectivo en manzana como prospecto prometedor debido a los valores de sus parámetros cinéticos k_1 ($4.29 \text{ min}\cdot\text{d}\cdot\text{b}^{-1}$) y k_2 ($0.07 \text{ d}\cdot\text{b}^{-1}$). Finalmente, se determinaron las condiciones para el método de secado convectivo que tienen mejor impacto en la rehidratación, al ser el predominante en la literatura científica. Dentro del efecto del método de secado convectivo y las condiciones del proceso correspondiente, se encontró que el factor principal que afecta la cinética de rehidratación es la temperatura y velocidad del aire. Siendo el rango recomendado de temperatura de secado convectivo de 40°C a 70°C , y velocidades de aire menores o iguales a 2 m/s .

REFERENCIAS

- Álvarez, A., Luna, G., y, Ramírez, A. (2018). The drying and rehydration process of chayote (*Sechium edule*). México.
- Arredondo, A., y Landa, E. (2014). Herramienta pico para la formulación y búsqueda de preguntas clínicamente relevantes en la psicooncología basada en la evidencia. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Beigi, M. (2017). Thin layer drying of wormwood (*Artemisia absinthium L.*) leaves: dehydration characteristics, rehydration capacity and energy consumption. Universidad Islámica de Azad. Irán.
- Benseddik, A., Azzi, A., Zidoune, M. N., Khanniche, R., & Besombes, C. (2019). Empirical and diffusion models of rehydration process of differently dried pumpkin slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 401-410.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.01.003>
- Berk, Z. (2018). *Food Process Engineering and Technology*. San diego, Estados Unidos. Elsevier Science Publishing Co Inc.
- Botella, J. y Zamora, Á. (2017). *El meta-análisis: una metodología para la investigación en educación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España.
- Carvalho, G. R., Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2020). Drying Accelerators to Enhance Processing and Properties: Ethanol, Isopropanol, Acetone and Acetic Acid as Pre-treatments to Convective Drying of Pumpkin. *Food and Bioprocess Technology*, 13(11), 1984-1996. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02542-6>
- Chen, H., Zhang, M., Fang, Z., & Wang, Y. (2013). Effects of Different Drying Methods on the Quality of Squid Cubes. *Drying Technology*, 31(16), 1911-1918.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2013.783592>
- Contreras, C., Martín-Esparza, M. E., & Martínez-Navarrete, N. (2012). Influence of Drying

- Method on the Rehydration Properties of Apricot and Apple. *Journal of Food Process Engineering*, 35(2), 178-190. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00579.x>
- Demiray, E., y Tulek, Y. (2016). Effect of temperature on water diffusion during rehydration of sun-dried red pepper (*Capsicum annuum L.*). Universidad de Pamukkale. Turquía.
- Ergün, K., Çalışkan, G., y, Dirim, S. (2016). Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (*Actinidia deliciosa*) slices. Universidad del Egeu. Turquía.
- Gaware, T. J., Sutar, N., & Thorat, B. N. (2010). Drying of Tomato Using Different Methods: Comparison of Dehydration and Rehydration Kinetics. *Drying Technology*, 28(5), 651-658. <https://doi.org/10.1080/07373931003788759>
- Geankopolis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (3ra ed.). CECSA. <https://fenomenosdetransporte.files.wordpress.com/2008/05/geankopolis.pdf>
- Gökçe Kocabay, Ö., y İsmail, O. (2017). Investigation of rehydration kinetics of open-sun dried okra samples. Universidad Método de Yıldız. Turquía.
- Goula, A., & Adamopoulos, K. (2009). Modeling the Rehydration Process of Dried Tomato. *Drying Technology*, 27, 1078-1088. <https://doi.org/10.1080/07373930903218677>
- Guedes, J. S., Santos, K. C., Castanha, N., Rojas, M. L., Matta Junior, M. D., Lima, D. C., & Augusto, P. E. D. (2021). Structural modification on potato tissue and starch using ethanol pre-treatment and drying process. *Food Structure*, 29, 100202. doi:10.1016/j.foostr.2021.100202
- Hebda, T., Brzywczyk, B., Lapczynska, B., y, Styks, J. (2019). Influence of pre-treatment and drying methods on process of rehydration of dried apple. Universidad de Agricultura de Cracovia. Polonia.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill Interamericana.
- IBM Corp. Released 2015. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0*. Armonk, NY: IBM

Corp.

- Krokida, MK y Philippopoulos, C. (2005). Rehydration of Dehydrated Foods. Universidad de Atenas. Grecia.
- Kumar, V., Devi, M. K., Panda, B. K., & Shrivastava, S. L. (2019). Shrinkage and rehydration characteristics of vacuum assisted microwave dried green bell pepper. *Journal of Food Process Engineering*, e13030. doi:10.1111/jfpe.13030
- Kumar, Y., Sharanagat, V. S., Singh, L., & Nema, P. K. (2020). Convective drying of spine gourd (*Momordica dioica*): Effect of ultrasound pre-treatment on drying characteristics, color, and texture attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(9), e14639. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14639>
- Leo-Amador, G. E. (2014). PARADIGMAS EN LA INVESTIGACIÓN. ENFOQUE CUANTITATIVO Y CUALITATIVO. <https://core.ac.uk/reader/236413540>
- Lewicki, P. P. (1998). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties*, 1(1), 1-22. <https://doi.org/10.1080/10942919809524561>
- López, E., Prosapio, V., Fryer, P., Norton, I., y, Bakalis, S. (2019). A model-based study of rehydration kinetics in freeze-dried tomatoes. Universidad de Nottingham. Reino Unido.
- Lopez-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P. J., Norton, I. T., & Bakalis, S. (2020). Model discrimination for drying and rehydration kinetics of freeze-dried tomatoes. *Journal of Food Process Engineering*, 43(5), e13192. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13192>
- Mabellini, A., De Michelis, A., Lozano, J., & Ohaco, E. (2011). Pretratamientos para acelerar el secado de frutos de Rosa Mosqueta. <https://inta.gob.ar/documentos/pretratamientos-para-acelerar-el-secado-de-frutos-de-rosa-mosqueta>
- Maldonado, S., Arnau, E., & Bertuzzi, M. A. (2010). Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering*,

96(3), 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.017>

Marín B, E., Lemus M, R., Flores M, V., & Vega G, A. (2006). LA REHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS DESHIDRATADOS. *Revista chilena de nutrición*, 33(3), 527-538.

<https://doi.org/10.4067/S0717-75182006000500009>

Markowski, M., Bondaruk, J., & Błaszczak, W. (2009). Rehydration Behavior of Vacuum-Microwave-Dried Potato Cubes. *Drying Technology*, 27(2), 296-305.

<https://doi.org/10.1080/07373930802606600>

Marques, L. G., Prado, M. M., & Freire, J. T. (2009). Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT - Food Science and Technology*, 42(7), 1232-1237.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.02.012>

Mayor, L., y Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. Universidad de Porto. Portugal.

Meda, L., & Ratti, C. (2005). Rehydration of Freeze-Dried Strawberries at Varying Temperatures. *Journal of Food Process Engineering*, 28(3), 233-246. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.00404.x>

Monteiro, R. L., Link, J. V., Tribuzi, G., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2018). Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 232, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015>

Ohaco, E. H., Ichiyama, B., Lozano, J. E., & De Michelis, A. (2015). Rehydration of Rosa rubiginosa Fruits Dried with Hot Air. *Drying Technology*, 33(6), 696-703. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.981638>

Özkan-Karabacak, A., Acoğlu, B., Yolci Ömeroğlu, P., & Çopur, Ö. U. (2020). Microwave pre-treatment for vacuum drying of orange slices: Drying characteristics, rehydration capacity and quality properties. *Journal of Food Process Engineering*. doi:10.1111/jfpe.13511

Pashazadeh, H., Zannou, O., & Koca, I. (2020). Modeling of drying and rehydration kinetics of

- Rosa pimpinellifolia fruits: Toward formulation and optimization of a new tea with high antioxidant properties. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), e13486. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13486>
- Pei, F., Shi, Y., Mariga, A. M., Yang, W., Tang, X., Zhao, L., An, X., & Hu, Q. (2014). Comparison of Freeze-Drying and Freeze-Drying Combined with Microwave Vacuum Drying Methods on Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Slices. *Food and Bioprocess Technology*, 7(6), 1629-1639. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1199-0>
- Peleg, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216-1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>
- Planinić, M., Velić, D., Tomas, S., Bilić, M., & Bucić, A. (2005). Modelling of drying and rehydration of carrots using Peleg's model. *European Food Research and Technology*, 221(3), 446-451. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1200-x>
- Ricce, C., Rojas, M. L., Miano, A. C., Siche, R., & Augusto, P. E. D. (2016). Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89, 701-708. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.030>
- Rojas, M. L., & Augusto, P. E. D. (2018). Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties. *Journal of Food Engineering*, 233, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.028>
- Rojas, M. L., Augusto, P. E. D., & Cárcel, J. A. (2020). Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 102328. doi:10.1016/j.ifset.2020.102328
- Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2019). Improving the infrared drying and rehydration of potato slices using simple approaches: Perforations and ethanol. *Journal of Food Process Engineering*, e13089. doi:10.1111/jfpe.13089

- Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2020). Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 20–30. doi:10.1016/j.fbp.2019.10.008
- Tüfekçi, S., & Özkal, S. G. (2017). Enhancement of drying and rehydration characteristics of okra by ultrasound pre-treatment application. *Heat and Mass Transfer*, 53(7), 2279-2286. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-1983-x>
- Urrútia, G., y Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.
- Wang, J., Bai, T.-Y., Wang, D., Fang, X.-M., Xue, L.-Y., Zheng, Z.-A., Gao, Z.-J., & Xiao, H.-W. (2019). Pulsed vacuum drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices: Effects on drying characteristics, rehydration ratio, water holding capacity, and microstructure. *Drying Technology*, 37(3), 301-311. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1423325>
- Zielinska, M., y Markowski, M. (2016). The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). Universidad de Varmia y Masuria. Polonia.
- Zura-Bravo, L., Ah-Hen, K., Vega-Gálvez, A., García-Segovia, P., & Lemus-Mondaca, R. (2013). Effect of Rehydration Temperature on Functional Properties, Antioxidant Capacity and Structural Characteristics of Apple (Granny Smith) Slices in Relation to Mass Transfer Kinetics. *Journal of Food Process Engineering*, 36(5), 559-571. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12018>

ANEXOS

 Anexo 1. **Matriz de consistencia**

Problema	Objetivos	Variables	Metodología	Población
¿Cómo influye el método de secado en los parámetros cinéticos del modelo Peleg durante la rehidratación?	Objetivo general	Variable independiente	Tipo de investigación	Frutas y/o Hortalizas
	Demostrar la influencia de los métodos de secados de frutas y/o hortalizas en los parámetros de rehidratación del modelo de Peleg	Métodos de secado	Cuantitativa	
			Diseño	
			Meta-análisis	
	Objetivos específicos	Variable dependiente	Método	
	Seleccionar los artículos que cumplan con los criterios	Parámetros cinéticos del modelo de Peleg	Análisis de datos de cinética de rehidratación	
	Extraer y reajustar los datos matemáticos de los artículos seleccionados		Instrumento	
			XY Extract SPSS	
Analizar estadísticamente para ver si existe o no el efecto en las diferentes frutas y/o hortalizas	Método de análisis de datos			
	Extracción de datos Ajuste de datos a modelo matemático			

Anexo 2. Matriz de Operacionalización

Variables de análisis		Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente	Métodos de secado	Separación de líquidos volátiles casi siempre agua de los materiales sólidos (Geankoplis, 1998).	Mecanismo físico empleado para acelerar el fenómeno de transferencia de materia y calor con el fin de extraer el agua de un alimento	Secado por Estufa	Nominal
				Secado por Microondas	
				Liofilización	
				Secado al sol	
Variable dependiente	Constante de velocidad (k_1)	Constante que tiene relación con la capacidad de rehidratación o la tasa de absorción (Ricca et al., 2016).	Ratio de absorción de humedad del sólido seco por unidad de tiempo	$\text{min} \cdot \text{d} \cdot \text{b}^{-1}$	Razón
	Constante de capacidad (k_2)	Se relaciona con el contenido de humedad en el equilibrio y con la capacidad de retención de agua (Rojas & Augusto, 2018).	Contenido máximo de humedad alcanzable	$\text{d} \cdot \text{b}^{-1}$	Razón