






Mathematical Modeling for Pectin Extraction in Melon Waste

M. Laura Montoro , M. Nadia Pantano , Cecilia Fernández , M. Fabiana Sardella , and Gustavo Scaglia 

Abstract— This article proposes a novel model for the extraction of pectin in melon peels and seeds. The methodology is based on the extraction of pectin in an acid medium for 180 minutes at 70 °C, 80 °C, and 90 °C, evaluating the performance of the product at each temperature. The kinetics of pectin extraction from melon peels and seeds, regardless of the working temperature, presents three stages: rapid release, then a plateau, followed by smooth growth until reaching the maximum amount of the product extracted. This process can be assimilated as a sequence of subprocesses, each with its own delay time and constants time. Based on the experimental results, each stage or period is mathematically modeled as a second-order linear with delay time. This dynamic model takes into account the work matrix, as well as the extraction mechanism used. The deviation of the model concerning to the experimental data is minimal, compared to the empirical and mechanistic models found in the literature for pectin extraction. The latter are based on oversimplified assumptions, leading to significant disparities between experimentally obtained and mathematically simulated results.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/9027>

Index Terms—Melon waste, Mathematical Model, Pectin, Second order, order dynamical system.

I. INTRODUCCIÓN

Durante el año 2020 la producción de melón a nivel mundial batió récord superando los 28 millones de kilos. EEUU y Países Bajos son los mayores importadores de melón en el mundo. El melón, además de ser comercializado como fruta fresca, también se ofrece como producto procesado ya sea en mermeladas o zumo concentrado. Estas alternativas de industrialización, producen como desechos cáscaras y semillas de melón, a esto se le suma pérdidas postcosecha que generan cantidades significativas de melón residual, que en algunos casos se destina a la alimentación animal o en otros, simplemente son desechados contribuyendo a la contaminación ambiental. Conscientes de esta problemática, varias investigaciones se han dedicado a

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Javier Moreno-Valenzuela (Corresponding author: María Laura Montoro).

El Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y el Instituto de Ingeniería Química (IIQ) perteneciente a la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) brindaron apoyo financiero para esta investigación.

L. Montoro, N. Pantano, C. Fernández, F. Sardella, y G. Scaglia están con el Instituto de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina (e-mails: mmontoro@unsj.edu.ar, npantano@unsj.edu.ar, mcfernandez@unsj.edu.ar, mfs@unsj.edu.ar, gscaglia@unsj.edu.ar).

evaluar las características y posibles usos de estos materiales con el fin de mitigar el impacto ambiental, representando un valor económico su aplicación industrial [1, 2].

Subproductos del melón, como la cáscara y las semillas, son fuente de muchos compuestos naturales importantes, como pectina, flavonoides, carotenoides, limoneno, polimetoxiflavonas, ácido linoleico, oleico, y palmítico. Particularmente, la pectina es un heteropolisacárido complejo contenido en las paredes de las células primarias de las plantas y sus frutos[1]. Posee amplios usos en la industria alimentaria, es utilizada como agente gelificante, estabilizante, emulsionante y espesante en mermeladas, jaleas, caramelos y jugos de frutas. También es empleada para reducir la grasa en sangre, aliviar el dolor, reducir las enfermedades cardíacas y los cálculos biliares [3, 4]. Por su acción protectora sobre el sistema gastrointestinal, se utiliza en el tratamiento de gastritis y úlceras, ya que sirve como agente desintoxicante, anti colesterol y antihemorrágico, [5, 6]. Otro consumo de la pectina es la terapia contra el cáncer y la administración controlada de fármacos [7].

En la actualidad existen diferentes formas de extraer la pectina, el proceso de extracción más empleado, independientemente de la materia prima, es mediante ácidos preferentemente orgánicos a temperaturas menores a 100 °C aproximadamente. Las propiedades fisicoquímicas de la pectina están influenciadas por diferentes condiciones de extracción. Las investigaciones han demostrado que los factores más importantes que afectan el rendimiento y las propiedades químicas y funcionales de la pectina son: la temperatura de extracción, el tiempo, el pH, la proporción de disolvente a muestra (L: S) y el tipo de ácido [7]. Por lo tanto, es fundamental establecer la relación entre las caracterizaciones de la materia prima, los parámetros del proceso y los atributos del producto final. El estudio de la dinámica del proceso, a través de la cinética del mismo, ayuda a comprender conceptualmente el proceso de extracción, como las interacciones analito-matriz, la velocidad de reacción química (tasa de difusión y tasa de desorción), el equilibrio de fases, etc. El modelado de la cinética de extracción ha sido ampliamente investigado, debido a su capacidad predictiva en la evaluación de procesos para optimizar el rendimiento de pectina y la bioactividad, sin embargo, los antecedentes bibliográficos reportan la adaptación de los modelos empíricos a datos experimentales, haciendo uso de supuestos o simplificaciones, con objeto de adecuarlos a los datos experimentales, careciendo en muchos casos de significado físico.

Este trabajo aborda el modelado del proceso de extracción de pectina en cáscaras y semillas de melón, a partir de datos

experimentales, obtenidos a tres temperaturas de extracción (70, 80 y 90 °C). El modelo propuesto, es lineal de segundo orden más retardo, tiene en cuenta cada las etapas de liberación de pectina observadas en los resultados experimentales, proporcionando una descripción más precisa del proceso real. Para la identificación paramétrica del modelo se propone una estrategia híbrida basada en algoritmo de Monte Carlo combinado con algoritmos genéticos, originalmente diseñado en Fernandez *et. al.* [8].

Este trabajo está organizado en cuatro secciones. La Sección I presenta una introducción al tema de investigación. En la Sección II, se describen los materiales y métodos el proceso de extracción. El modelado del proceso empleando un modelo empírico y un nuevo modelo propuesto se detalla en la Sección III. Los resultados obtenidos y la discusión de los mismos se muestran en la sección IV. Finalmente, en la sección V se exponen las conclusiones y los posibles trabajos futuros.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El rendimiento de pectina esta influenciado por las condiciones de extracción (pH, tiempo, temperatura, tipo de ácido), las cuales juegan un papel clave en el rendimiento del producto y en sus características fisicoquímicas. Para determinar las variables más influyentes en este proceso, se llevó a cabo un diseño experimental (Box-Behnken), evaluando la influencia de la temperatura, tiempo y pH en el rango de trabajo estudiado. Los resultados mostraron que la variable más significativa es la temperatura. Por esta razón, se decidió fijar el valor de tiempo y pH óptimo que arrojó el diseño experimental y modelar el proceso de extracción de pectina, considerando únicamente la influencia de la temperatura.

Para el modelado, se realizaron corridas experimentales de extracción de pectina a: 70, 80 y 90 °C, usando como materia prima cáscaras y semillas de melón, manteniendo constante el pH (1.10), tiempo (180 min) y relación S:L (1:10 p/v). La estructura del modelo propuesto por los autores en el presente trabajo, evidencia la validez del mismo, en el rango de temperaturas ensayadas (70-90 °C).

A. Proceso de Extracción

Las cáscaras y semillas de melón, fueron secadas en estufa de vacío a 70 °C, posteriormente, se pusieron en contacto con una solución de ácido cítrico suave, ajustando a un pH 1.10. La extracción de pectina, se llevó a cabo en un reactor termostatzado con agitación mecánica. Los ensayos se realizaron a 70, 80 y 90 °C, durante 180 minutos.

Después de la extracción de la pectina, la solución resultante se enfrió a temperatura ambiente y luego se filtró usando una tela de muselina. Al líquido resultante, se le añadió etanol al 96% en una proporción de 1:1% v/v, y se dejó durante 24 horas a 10 °C para permitir que precipitara la pectina. Posteriormente se recogió el precipitado y el resto del sobrenadante se centrifugó durante 15 minutos a 2000 rpm, para luego filtrarse a través de un filtro de papel de flujo rápido. El total del precipitado de pectina se lavó dos veces con etanol al 96% y luego se secó en estufa de vacío a 50 °C durante 24 horas.

Finalmente se pesó el sólido obtenido para cuantificar el rendimiento alcanzado.

En la Fig. 1 se pueden observar los resultados para las tres condiciones de temperatura experimentadas.

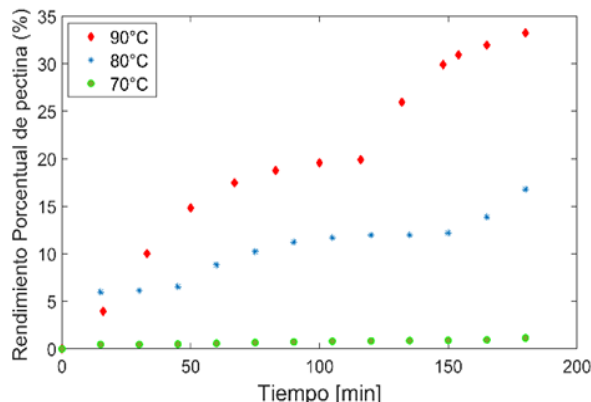


Fig. 1: Datos experimentales de extracción de pectina a 70 °C, 80 °C y 90 °C.

III. MODELADO

En la producción de pectina, como en la mayoría de los procesos, es necesario contar con un modelo matemático que describa fielmente la dinámica del sistema en estudio. Si bien en la literatura existen modelos mecanicistas para la extracción sólido-líquido de pectina [9-11], pocos han investigado acerca de la influencia activa de la temperatura sobre la cinética de extracción de pectina. En este trabajo, se propone trabajar con dos modelos, a fin de evaluar el desempeño de los mismos y seleccionar el más adecuado. En primer lugar, se ensaya empleando un modelo empírico de Peleg modificado y, en segundo lugar, se desarrolla un modelo lineal de segundo orden con retardo.

A. Modelo de Peleg Modificado

El modelo empírico de Peleg [12] ha sido ampliamente utilizado en cinéticas de deshidratación y extracción de compuestos bioactivos. Wai *et al.* [13], determinó que el modelo más adecuado para describir la cinética de extracción de pectina en cáscaras de fruta del dragón fue el modelo de Peleg, alcanzando un ajuste a los datos experimentales significativo, respecto a otros modelos empíricos.

El modelo empírico de Peleg está dado por la siguiente ecuación:

$$P(t) = P_0 + \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad (1)$$

donde, $P(t)$ es el rendimiento porcentual instantáneo, $P_0 = P(0)$, t es el tiempo [min], y k_1 la constante de Peleg [min g/gseco], y k_2 constante de capacidad de Peleg [g/gseco].

La derivada de (1), está dada por:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k_1}{[k_1 + k_2 t]^2} \quad (2)$$

Cuando el $t \rightarrow \infty$ el rendimiento porcentual final de pectina esta dado por la Ecuación (3):

$$P = P_0 + \frac{1}{k_2} \quad (3)$$

Considerando los datos experimentales, en la Fig. 1 se observa que independientemente de la temperatura de trabajo, la cinética de extracción de pectina de cáscaras y semillas de melón presenta 3 etapas: la liberación rápida, luego una meseta, seguido de un crecimiento suave hasta llegar a la máxima cantidad de producto extraído.

Teniendo en cuenta la respuesta del sistema en tres condiciones diferentes de temperatura, se propone modelar cada etapa de la curva siguiendo la Ecuación (1) propuesta por Peleg [12], pero representando los incrementos para cada una de las etapas, por lo que dicha ecuación matemática se modifica, tal como se muestra a continuación:

$$\Delta P_g = \Delta P_0 + \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad (4)$$

Donde ΔP_g es el rendimiento porcentual en cada etapa. De este modo la Ecuación (4), se escribe como una superposición de las ecuaciones de cada etapa corridas en el tiempo.

$$P_g = \Delta P_{g1} + \Delta P_{g2} H(t - t_{01}) + \Delta P_{g3} H(t - t_{02}) \quad (5)$$

Donde $H(t)$ es la función Heaviside definida según [14] como:

$$H(t-a) = \text{Heaviside}(t-a) \begin{cases} 1 & \text{si } t \geq a \\ 0 & \text{si } t < a \end{cases}$$

Siendo ΔP_{g1} , ΔP_{g2} y ΔP_{g3} son los rendimientos de pectina en cada una de las etapas, t es el tiempo, t_{01} y t_{02} son los tiempos en el que se produce el segundo y tercer escalón y P_g el rendimiento porcentual total de pectina alcanzado al finalizar el proceso, utilizando el modelo de Peleg modificado.

B. Modelo de Segundo Orden con Retardo

Teniendo en cuenta, las observaciones mencionadas anteriormente respecto a la dinámica del proceso en tres etapas, se propone desarrollar un modelo lineal de segundo orden con retardo, para cada una de las etapas observadas en la Fig.1. Este proceso se puede asimilar a una secuencia de subprocesos, cada uno con su propio tiempo de retardo, y con su propia dinámica.

Independientemente de la temperatura empleada en cada ensayo de extracción, se modeló matemáticamente cada etapa o período como un sistema lineal de segundo orden con retardo, expresado en las Ecuaciones (6), (7) y (8).

$$\Delta \ddot{P}_1 + \frac{t_{11} + t_{12}}{t_{11} t_{12}} \Delta \dot{P}_1 + \frac{\Delta P_1}{t_{11} t_{12}} = \frac{K_1}{t_{11} t_{12}} T(t - t_{01}) \quad (6)$$

$$\Delta \ddot{P}_2 + \frac{t_{22} + t_{21}}{t_{22} t_{21}} \Delta \dot{P}_2 + \frac{\Delta P_2}{t_{22} t_{21}} = \frac{K_2}{t_{21} t_{22}} T(t - t_{02} - t_{RET2}) \quad (7)$$

$$\Delta \ddot{P}_3 + \frac{t_{31} + t_{32}}{t_{31} t_{32}} \Delta \dot{P}_3 + \frac{\Delta P_3}{t_{31} t_{32}} = \frac{K_3}{t_{31} t_{32}} T(t - t_{03} - t_{RET3}) \quad (8)$$

$$T(t-a) = T * \text{Heaviside}(t-a) \begin{cases} T & \text{si } t \geq a \\ 0 & \text{si } t < a \end{cases}$$

Siendo ΔP_1 , ΔP_2 y ΔP_3 los rendimientos porcentuales en cada etapa, $\Delta \dot{P}_1$, $\Delta \dot{P}_2$, $\Delta \dot{P}_3$, $\Delta \ddot{P}_1$, $\Delta \ddot{P}_2$ y $\Delta \ddot{P}_3$ son las derivadas primeras y segundas de ΔP_1 , ΔP_2 y ΔP_3 respecto del tiempo, T es la temperatura de extracción de pectina (70, 80 y 90 °C), K_1 , K_2 y K_3 son parámetros del modelo para cada etapa, que relacionan la temperatura con el rendimiento máximo en cada etapa. Mientras que, t_{01} , t_{02} y t_{03} son los tiempos de retardo de cada etapa. Los términos t_{RET2} y t_{RET3} son los tiempos donde comienza cada etapa y t_{11} , t_{12} , t_{21} , t_{22} , t_{31} y t_{32} representa las dos constantes de tiempo de cada etapa.

La Ecuación (9), exhibe el modelo general para el proceso completo de extracción de pectina en melón. Donde P_m es el rendimiento porcentual total de pectina, obtenido con el modelo de segundo orden y ΔP es la solución de las Ecuaciones (6), (7) y (8), que representa el incremento del rendimiento de pectina en cada etapa.

$$P_m = \Delta P_1 + \Delta P_2 H(t - t_{RET2}) + \Delta P_3 H(t - t_{RET3}) \quad (9)$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos al emplear la Ecuación (5) correspondiente al modelo de Peleg modificado, se observan en la Fig. 2, junto a los datos experimentales para cada temperatura. En las gráficas obtenidas con el modelo de Peleg, se observa que, la velocidad inicial es máxima en el instante cero de iniciado el tratamiento. Es decir, presupone un efecto instantáneo del tratamiento ácido. En la práctica esto no sucede, dado que es necesario el tiempo de contacto, para que ocurra la reacción, la cual involucra una serie de etapas en cuanto a la transferencia de masa: penetración del solvente en la superficie del sólido, difusión a través del sólido, hidrólisis de la proto-pectina (es decir, el polisacárido péctico in situ, unido a otros compuestos de la pared celular como la celulosa), solubilización de la pectina en el disolvente, difusión de la pectina a la superficie sólida y transferencia externa del producto a la solución a granel.

El modelo propuesto por Peleg, corresponde a un sistema de primer orden, y el sistema de extracción de pectina, se corresponde a un modelo lineal de segundo orden, que contempla el tiempo necesario para que, el sistema responda ante el estímulo.

El modelo lineal de segundo orden con retardo propuesto en la sección anterior, es un modelo dinámico, que tiene en cuenta la matriz de trabajo como así también, el mecanismo de extracción utilizado. Los valores de los parámetros del presente modelo, se presentan en la Tabla I. La Fig. 3 exhibe el ajuste de los datos experimentales con dicho modelo. Puede observarse que, en el inicio, el modelo contempla el tiempo de retardo, para dar lugar comienzo de la reacción.

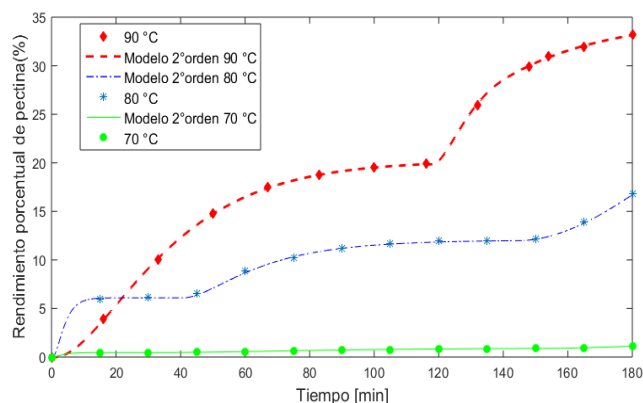


Fig. 2: Modelo de Peleg vs datos experimentales de extracción de pectina a 70 °C, 80 °C y 90 °C.

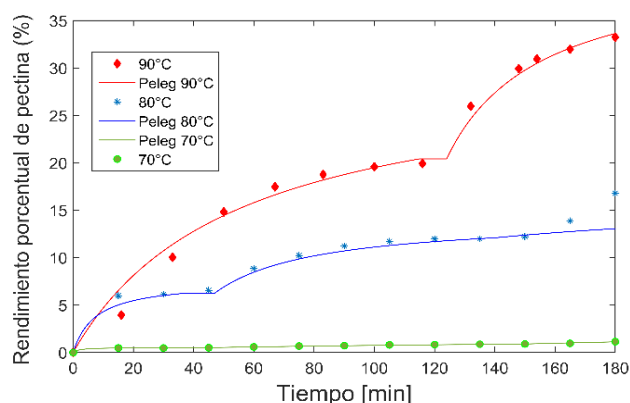


Fig. 3: Modelo de segundo orden con retardo vs. datos experimentales de extracción de pectina a 70, 80 y 90 °C.

TABLA I

| PARÁMETROS DEL MODELO SEGUNDO ORDEN CON RETARDO | | | |
|---|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Parámetros | 70 °C | 80 °C | 90 °C |
| K_1 | 6.59×10^{-3} | 76.25×10^{-3} | 224.4×10^{-3} |
| K_2 | 6.78×10^{-3} | 74.35×10^{-3} | 122.2×10^{-3} |
| K_3 | 7.86×10^{-3} | 0.65 | 43.3×10^{-3} |
| t_{RET2} | 34 | 35.8 | 115 |
| t_{RET3} | 150 | 140 | 140 |
| t_{01} | 0 | 0.35 | 1 |
| t_{02} | 0 | 5 | 3 |
| t_{03} | 5 | 4.9 | 0.96 |
| t_{11} | 2 | 11 | 18 |
| t_{12} | 2 | 2.1 | 20 |
| t_{21} | 30.5 | 7 | 10 |
| t_{22} | 30 | 21 | 5 |
| t_{31} | 30 | 60 | 14 |
| t_{32} | 10 | 82 | 25 |

A. Ajuste de los Datos Experimentales

Para el ajuste de ambos modelos se empleó una metodología híbrida que combina Monte Carlo con algoritmos genéticos, que fue originalmente diseñada por nuestro grupo de trabajo [15], y ha sido ampliamente utilizada en diferentes procesos de optimización [16] [17],[18],[19]. Los parámetros que se optimizaron son: k_1 y k_2 para el modelo de Peleg modificado, mientras que en el modelo de segundo orden con retardo fueron K_i y t_{ij} . Para la simulación, se llevaron a cabo 500 corridas de Montecarlo, de las cuales se

seleccionaron los mejores 50 resultados, es decir, aquellos conjuntos de parámetros cuyo índice de ajuste Ecuación (10) era menor. Una vez seleccionados los mejores 50 individuos se comenzó con el desarrollo del algoritmo genético. En primer lugar, se tomaron los primeros diez mejores individuos como “padres”, con los cuales se llevaron a cabo las operaciones de mutación, cruzamiento y se completó la nueva generación con un conjunto aleatorio de individuos. La Fig. 4 a, b y c, muestra el ajuste a los datos experimentales al modelo lineal de 2° orden con retardo y el modelo de Peleg modificado, para los ensayos a 70, 80 y 90 °C. Si bien, anteriormente se observó que la velocidad es máxima al inicio de la extracción por parte del modelo de Peleg modificado, es importante destacar que, al incrementar la temperatura de extracción, este modelo difiere considerablemente del camino de los datos experimentales.

Para evaluar el ajuste de cada modelo Peleg modificado y el lineal de 2° orden con retardo propuesto por los autores, se calculó el error de ajuste como se muestra a continuación:

$$J = \|P_{Exp} - P_{Sim}\|^2 \tag{10}$$

Siendo J la norma del error entre el valor del rendimiento porcentual de pectina experimental P_{Exp} y el simulado P_{Sim} .

El error calculado para cada modelo y para cada temperatura se exhibe en la Tabla II. Estos resultados ponen en manifiesto, que el modelo lineal de segundo orden con retardo propuesto ajusta apropiadamente a los datos experimentales. A medida que se incrementa la temperatura, el error obtenido con el modelo de Peleg modificado crece significativamente a diferencia del modelo desarrollado en el presente trabajo de investigación. Es decir, el modelo empírico se desvía de los resultados experimentales al extraer pectina a mayores temperaturas. Posiblemente, esto es consecuencia de que los modelos empíricos usados comúnmente en varias investigaciones, no describen correctamente el proceso, y no consideran las variables involucradas y los atributos de la materia prima.

TABLA II

| COMPARACIÓN DE AJUSTE PARA CADA MODELO | | |
|--|--------------------|-------------|
| Temperatura[°C] | Error mod. 2°orden | Error Peleg |
| 70 | 0.0298 | 0.0823 |
| 80 | 0.3310 | 0.8859 |
| 90 | 0.3273 | 3.7885 |

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se desarrollaron dos modelos matemáticos para la extracción de pectina en cáscaras y semillas de melón en medio ácido, a tres temperaturas de trabajo diferentes (70, 80 y 90 °C). Por un lado, se empleó el modelo de Peleg modificado y por el otro, se diseñó un modelo lineal de segundo orden con retardo específicamente para el proceso en estudio. Éste último, considera la liberación de pectina en tres etapas diferenciadas, como consecuencia de un efecto acumulativo del pretratamiento y la temperatura. Esto proporciona una representación más precisa del proceso en comparación con investigaciones previas, que se basan en supuestos excesivamente simplificados. La optimización paramétrica se

llevó a cabo con un método de optimización híbrida que combina Monte Carlo con algoritmos genéticos. El modelo lineal de segundo orden con retardo ha demostrado tener un error de ajuste significativamente menor en comparación con el modelo Peleg modificado en todas las temperaturas evaluadas. Además, el modelo desarrollado proporciona una descripción conceptual más realista del proceso, al considerar explícitamente el mecanismo de extracción y las interacciones analito-matriz. En cuanto a los parámetros presentes en el mismo tienen un significado físico claro, relacionado con los tiempos característicos de cada etapa. El modelo propuesto puede adaptarse fácilmente a diferentes condiciones de proceso, permitiendo predecir el rendimiento de la pectina extraída. Contar con un modelo que represente fielmente el proceso es de vital importancia para poder optimizarlo, y de esta manera, lograr la valorización integral de este residuo agroindustrial, con importantes beneficios ambientales y económicos.

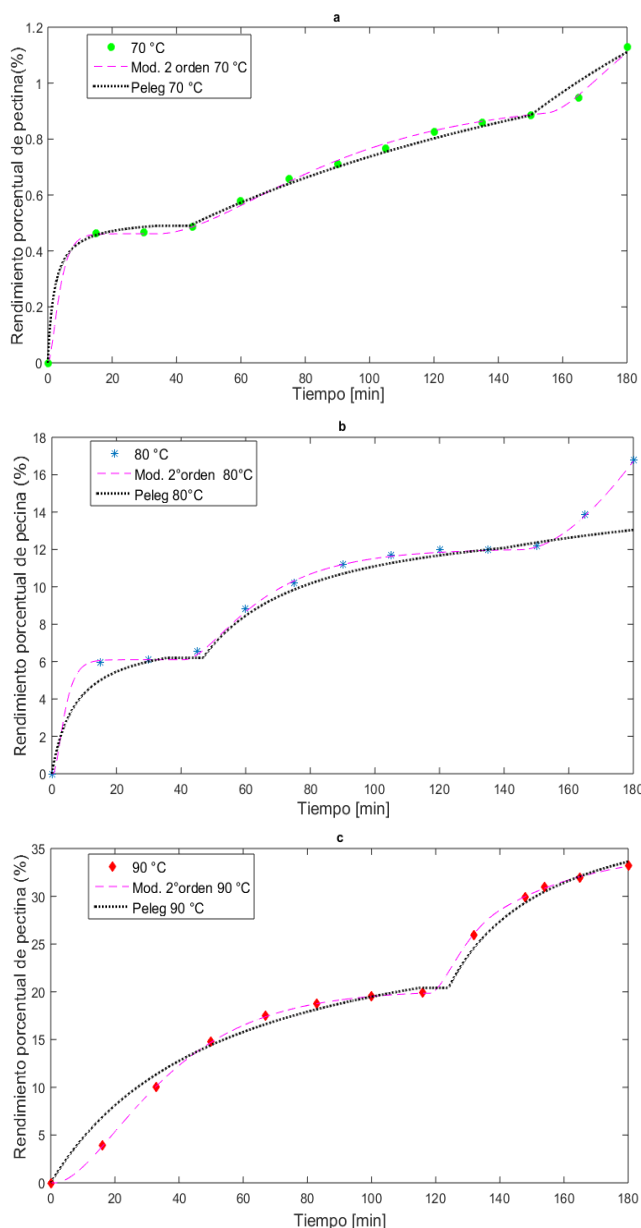


Fig. 4: Ajuste a los datos experimentales de extracción de pectina del modelo de Peleg y el modelo de segundo orden con retardo a) 70 °C, b) 80 °C c) 90 °C.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por las siguientes instituciones argentinas: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y Universidad Nacional de San Juan (UNSJ).

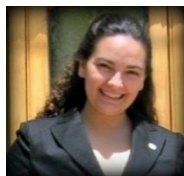
REFERENCIAS

- [1] Z. Raji, F. Khodaiyan, K. Rezaei, H. Kiani, and S. S. Hosseini, "Extraction optimization and physicochemical properties of pectin from melon peel," *Int J Biol Macromol.*, vol. 98, pp. 709-716, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.146>.
- [2] Z. Raji, H. Kiani, "Kinetic modeling of pectin extraction by ultrasound assisted and conventional methods," *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 121-127, 2020, <https://doi.org/10.22059/jfabe.2020.308224.1061>.
- [3] F. Jafari, F. Khodaiyan, H. Kiani, and S. S. J. C. p. Hosseini, "Pectin from carrot pomace: Optimization of extraction and physicochemical properties," *Carbohydrate Polymers*, vol. 157, no. 1, pp. 1315-1322, 2017, doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.013.
- [4] C. Petkowicz, L. Vriesmann, and P. A. Williams, "Pectins from food waste: Extraction, characterization and properties of watermelon rind pectin," *Food Hydrocolloids*, vol. 65, pp. 57-67, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.040>.
- [5] A. Nagel, C. Winkler, R. Carle, H.-U. Endress, C. Rentschler, and S. Neidhart, "Processes involving selective precipitation for the recovery of purified pectins from mango peel," *Carbohydrate Polymers*, vol. 174, no. 1, pp. 1144-1155, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.005>.
- [6] A. A. Sundarraj and T. V. Ranganathan, "A review-Pectin from Agro and industrial waste," *International Journal of Applied Environmental Sciences*, vol. 12, no. 10, pp. 1777-1801, 2017, <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02062>.
- [7] F. Dranca and M. Oroian, "Extraction, purification and characterization of pectin from alternative sources with potential technological applications," *Food Res Int.*, vol. 113, no. 1, pp. 327-350, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.065>.
- [8] C. Fernández, N. Pantano, S. Godoy, E. Serrano, and G. J. Scaglia, "Optimización de parámetros utilizando los métodos de Monte Carlo y Algoritmos Evolutivos. Aplicación a un controlador de seguimiento de trayectoria en sistemas no lineales," *RIAI*, vol. 16, no. 1, pp. 89-99, 2019, <https://doi.org/10.4995/riai.2018.8796>.
- [9] N. M. Andersen et al., "Dynamic modelling of pectin extraction describing yield and functional characteristics," *Journal of Food Engineering*, vol. 192, no. 1, pp. 6171-2017, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.08.006>.
- [10] O. Sebaoui, R. Moussaoui, H. Kadi, P. Michaud, C. J. W. Delattre, and B. Valorization, "Kinetic Modeling of Pectin Extraction from Wasted Citrus Lemon L," *Food Hydrocolloids*, vol. 8, pp. 2329-2337, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109957>.
- [11] I. Panchev, N. Kirtchev, and C. J. C. p. Kratchanov, "Kinetic model of pectin extraction", *Carbohydrate polymers*, vol. 11, no. 3, pp. 193-204, 1989, [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(89\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0144-8617(89)90050-7).
- [12] M. Peleg, "An empirical model for the description of moisture sorption curves", *Journal of Food science*, vol. 53, no. 4, pp. 1216-1217, 1988, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>.
- [13] W. Wai, A. F. Alkarkhi, A. Easa, and B. Processing, "Effect of extraction conditions on yield and degree of esterification of

- durian rind pectin: An experimental design," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 88, no. 2-3, pp.209-214, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.01.010>.
- [14] M. Su, Z. Yang, and B. Chen, "Set pair analysis for urban ecosystem health assessment" *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, vol.14, no. 4, pp.1773-1780, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.07.019>.
- [15] C. Fernández, N. Pantano, S. Godoy, E. Serrano, and G. J. Scaglia, "Parameters optimization applying Monte Carlo methods and evolutionary algorithms. Enforcement to a trajectory tracking controller in non-linear systems," vol. 16, no. 1, pp. 89-99, 2019. <https://doi.org/10.4995/riai.2018.8796>
- [16] M. N. Pantano, M. C. Fernández, O. A. Ortiz, G. J. Scaglia, J. Vega, and C. Engineering, "A Fourier-based control vector parameterization for the optimization of nonlinear dynamic processes with a finite terminal time," *Computers&ChemicalEngineering*, vol.134, no. 1, pp.106721, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106721>.
- [17] M. N. Pantano, M. C. Fernández, A. Amicarelli, G. J. Scaglia, and Design, "Evolutionary algorithms and orthogonal basis for dynamic optimization in L2 space for batch biodiesel production," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 177, no. 1, pp. 354-364, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.11.001>.
- [18] G. Scaglia, M. E. Serrano, and P. Albertos, *Linear Algebra Based Controllers*. Springer, 2020.
- [19] M. N. Pantano, M. C. F. Puchol, F. G. Rossomando, and G. J. Scaglia, "Open-loop dynamic optimization for nonlinear multi-input systems. application to recombinant protein production," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 8, pp. 1307-1314, 2021, <https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9475861>.



M. Laura Montoro received the Chemical Engineering degree from the National University of San Juan - Argentina, in 2010. Then the Doctorate in Chemical Engineering - Mention Clean Processes degree from the National University of San Juan - Argentina, in 2020. Actually, it is dedicated to the area of new materials, specifically the reuse of waste to generate materials with added value. His main research interests include biofuels, extraction of bioactive compounds, extraction kinetics, modeling.



M. Nadia Pantano received the Chemical Engineering degree from the National University of San Juan - Argentina, in 2008. Then the Doctorate in Chemical Engineering - Mention Clean Processes degree from the National University of San Juan - Argentina, in 2019. At this time, she is dedicated to process engineering, specifically to optimization and control of multivariable non-linear processes. Her main research interests include modeling, optimization, and trajectory tracking control of biochemical processes.



M. Cecilia Fernández received the Food Processing Engineering degree from the National University of San Juan - Argentina, in 2014. Then the Doctorate in Chemical Engineering-Mention Clean Processes degree from the same University, in 2019. At this time, she works as CONICET Assistant Researcher, her specialty is process engineering, mainly optimization and control of multivariable non-linear processes. Her main research interests include modeling, state estimation, optimization, and trajectory tracking control of biochemical processes.



M. Fabiana Sardella received a bachelor in Chemical Engineering from Universidad Nacional de San Juan in 1996. She graduated as Msc in Environmental Technologies in 2004 and achieved the doctoral degree in 2021. She is professor at Universidad Nacional de San Juan since 2003. Her main research interests are in the field of Agroindustrial Residues Valorization and Porous Solids production.



Gustavo Scaglia received the Ing. degree in Electronic Engineering with orientation in Control Systems from the National University of San Juan, Argentina, in 1999, and the Ph.D in Control Systems from the Institute of Automatic Control at the Instituto de Automática, Argentina in 2006, his work was about a new tracking trajectories algorithms. He is a Research Fellow of the Council for Scientific and Technological Research, Argentina, since 2011. He leads different technological projects and his current scientific research at the Engineering Chemical Institute from National University of San Juan. His main interests are algorithms for tracking trajectories, nonlinear and adaptive control theory, and mechanical and chemical process.