



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES ENES-JURIQUILLA

**Nuevo modelo matemático para predecir
el contenido de humedad en un proceso
de secado de alimentos.**

T E S I S

Que para obtener el título de
Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

Jennifer Reyna Guillén

Asesor de Tesis:

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya

Co-asesora de Tesis:

Dra. Anabel López Ortiz

Temixco, Mor., 21 de Mayo de 2021





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

OF/IER/LIER/051/2021

ASUNTO: Notificación de jurado y fecha para examen profesional mediante aula virtual.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente.

Por medio de la presente le informo que el día viernes 21 de mayo de 2021, a las 16:00 h, mediante Aula Virtual del Instituto de Energías Renovables, habilitada por la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación de la UNAM, la **C. JENNIFER REYNA GUILLÉN**, con número de cuenta 314036999 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

“Nuevo modelo matemático para predecir el contenido de humedad en un proceso de secado de alimentos”

Debido a que la alumna ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE:	DRA. HAILIN ZHAO HU
VOCAL:	MTRA. BLANCA HILDA VÁZQUEZ GÓMEZ
SECRETARIO:	DR. JORGE ALEJANDRO WONG LOYA
SUPLENTE:	DRA. ADRIANA MARGARITA LONGORIA HERNÁNDEZ
SUPLENTE:	DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 19 de mayo de 2021



Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp.



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

Índice general

Índice de figuras	5
Índice de tablas	8
Agradecimientos	11
Resumen	13
1. Antecedentes	14
1.1. Tipos de Secadores	14
1.1.1. Secador de bucle convectivo	15
1.1.2. Secador solar de invernadero	15
1.1.3. Secador solar de armario o gabinete	16
1.1.4. Secador solar directo	17
1.2. Modelos de cinética de secado	17
1.3. Modelos análogos de la Ley de Enfriamiento de Newton	20
1.3.1. Modelo Lewis (L)	20
1.3.2. Modelo Page (P)	20
1.4. Modelos derivados de la segunda Ley de Difusión de Fick's	21
1.4.1. Modelo Henderson y Pabis (HP)	21
1.4.2. Modelo Logarítmico (Log)	21
1.4.3. Modelo Two-term (TT)	21
1.4.4. Modelo Two-term exponenciales (TTE)	22
1.4.5. Modelo Midilli y Kucuck (MK)	22
1.5. Modelos empíricos	23
1.5.1. Modelo Wang y Singh (WS)	23
1.6. Método Racional Polinomial (RP)	23
2. Metodología	25
2.1. Base de datos	26
2.1.1. Experimentos con secador de bandeja de bucle convectivo	26
2.1.2. Experimentos con secador solar de invernadero (GSD)	27
2.1.3. Experimentos con secador solar de armario o gabinete	28
2.1.4. Experimentos de secado solar directo	28
2.2. Descripción de la base de datos.	29

2.2.1. Ajo	29
2.2.2. Albahaca	30
2.2.3. Zarzamora	31
2.2.4. Fresa	32
2.3. Aplicación del método RP a la base de datos.	35
2.4. Comparación de los datos experimentales con los métodos	36
3. Resultados	38
3.1. Aplicación del método RP	38
3.1.1. Serie AJ1	38
3.1.2. Serie AB1	41
3.1.3. Serie ZR1	44
3.1.4. Serie FR5	47
3.1.5. Serie AJ2	49
3.1.6. Serie AB5	51
3.1.7. Serie ZR3	54
3.1.8. Serie FR20	57
3.1.9. Serie AB2	59
3.1.10. Serie ZR4	61
3.1.11. Serie FR7	64
3.1.12. Serie FR12	66
3.2. Comparación entre métodos y datos experimentales	73
4. Conclusiones	93
4.1. Trabajo a Futuro	93
A. Código en Mathematica	94
Bibliografía	97

Índice de figuras

1.1.	Esquema de secador convectivo.	15
1.2.	Esquema de secador solar de invernadero.	16
1.3.	Esquema de secador solar de armario.	16
1.4.	Esquema de secador solar con filtro UV-Azul.	17
1.5.	Comportamiento del contenido de humedad en hojas de menta.	18
1.6.	Comportamiento del contenido de humedad en semillas de Niger	19
1.7.	Comportamiento del contenido de humedad en filetes de pescado (Tilapia Zilli) salado.	19
2.1.	Diagrama de flujo que muestra la metodología que se siguió en el presente trabajo.	25
2.2.	Secador de bandeja de bucle convectivo usado para el ajo.	27
2.3.	Secador de invernadero (GSD), vista sin cubierta plástica y con calentadores solares de aire.	27
2.4.	Sistema de secador solar de gabinete usado en experimentos con rodajas de fresa recubiertas y sin recubrimiento.	28
2.5.	Experimentos de secado solar con filtro UV-Azul y sin filtro.	29
2.6.	Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series de ajo a una temperatura de 60°C y 40°C.	30
2.7.	Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series de las series de albahaca.	31
2.8.	Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series de las series de zarzamora.	32
2.9.	Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series fresa.	34
2.10.	Algoritmo seguido en el programa de Wolfram <i>Mathematica</i>	35
3.1.	Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ1.	39
3.2.	Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ1.	41
3.3.	Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB1.	42
3.4.	Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB1.	44

3.5. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR1.	45
3.6. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR1.	46
3.7. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR5.	47
3.8. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR5.	48
3.9. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ2.	49
3.10. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ2.	51
3.11. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB5.	52
3.12. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB5.	54
3.13. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR3.	55
3.14. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR3.	56
3.15. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR20.	57
3.16. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR20.	58
3.17. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB2.	59
3.18. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB2.	61
3.19. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR4.	62
3.20. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR4.	63
3.21. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR7.	64
3.22. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR7.	65
3.23. Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR12.	66
3.24. Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR12.	67
3.25. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AJ1.	78
3.26. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AB1.	79

3.27. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie ZR1.	80
3.28. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR5.	81
3.29. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AJ2	82
3.30. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AB5.	83
3.31. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie ZR3.	84
3.32. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR20.	85
3.33. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AB2.	86
3.34. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie ZR4.	87
3.35. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR7.	88
3.36. Comparación entre lo métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR12.	89
3.37. Resultados de la aplicación de los 9 métodos (segundo orden, primer orden, Lewis, Page, página modificada, Henderson y Pabis, logarítmico, dos términos, exponencial de dos términos, Midilli y Kucuck y modelos de Wang y Singh) a las 39 series de datos.	91
3.38. Probabilidad de tener un buen ajuste por método.	92
3.39. Porcentaje de mejor ajuste por método.	92

Índice de tablas

2.1. Condiciones de secado para las series de ajo.	29
2.2. Condiciones de secado para las series de albahaca.	30
2.3. Condiciones de secado para las series de zarzamora.	31
2.4. Condiciones de secado para las series de fresa.	33
2.5. Resumen de la base de datos utilizada	34
3.1. Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie AJ1. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9858 para el modelo FO y 0.9997 para el modelo SO.	40
3.2. Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie AB1. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9692 para el modelo FO y 0.9899 para el modelo SO.	43
3.3. Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie ZR1. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9791 para el modelo FO y 0.9987 para el modelo SO.	46
3.4. Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie FR5. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9515 para el modelo FO y 0.9956 para el modelo SO.	48
3.5. Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie AJ2. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9919 para el modelo FO y 0.997 para el modelo SO.	50
3.6. Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie AB5. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.998 para el modelo FO y 0.9983 para el modelo SO.	53
3.7. Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie ZR3. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9968 para el modelo FO y 0.9969 para el modelo SO.	56
3.8. Resultados obtenidos de los métodos FO y SO a la serie FR20. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de correlación al cuadrado de 0.9948 para el modelo FO y 0.9948 para el modelo SO.	58
3.9. Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie AB2. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación 0.9803 para el modelo FO y 0.9930 para el modelo SO.	60

3.10. Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie ZR4. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9886 para el modelo FO y 0.9916 para el modelo SO.	63
3.11. Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie FR7. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de detereminación de 0.9648 para el modelo FO y 0.9868 para el modelo SO.	65
3.12. Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie FR12. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9391 para el modelo FO y 0.9830 para el modelo SO.	67
3.13. Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series AJ1 a AJ6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de ajo.	68
3.14. Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series AJ1 a AJ6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de ajo.	68
3.15. Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series AB1 a AB5. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de albahaca.	69
3.16. Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series AB1 a AB5. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de albahaca.	69
3.17. Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series ZR1 a ZR6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de zarzamora.	70
3.18. Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series ZR1 a ZR6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de zarzamora.	70
3.19. Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series FR1 a FR22. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de fresa.	71
3.20. Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series FR1 a FR22. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de fresa.	72
3.21. Valores de función de mérito para cada método en las series de ajo.	73
3.22. Valores de función de mérito para cada método en las series de albahaca.	74
3.23. Valores de función de mérito para cada método en las series de zarzamora.	75
3.24. Valores de función de mérito para cada método en las series de fresa.	76
3.25. Resumen de la aplicación de los 9 modelos de ajuste a las 39 series de datos.	90

*A mi mamá...
quien en su inigualable apoyo,
puso todas su fuerzas en lograr
que hoy estuviera aquí.*

*A Annie...
mi fiel compañera*

Agradecimientos

Cuando comencé la universidad nunca pensé en todos los retos que uno debe de enfrentar para llegar a este punto, desde un terremoto en el 2017 (sí, justo cuando estudiaba mi tercer semestre de la ingeniería, y al menos todos los que estudiamos en la LIER sabemos que significa eso), un esguince de tobillo en 4to semestre (ya saben, ese donde tienes que subir muchas escaleras al día por ir a los laboratorios); hasta una pandemia en mi año de graduación, sin embargo, aprendí que todos estos “retos” o como los quieran llamar se superan estando rodeados de la gente adecuada, la gente de la que aprendes, que te apoya y que te impulsa a ser mejor cada día, es por ello que esto va a dedicado a cada una de esas personas que hicieron esto posible.

Gracias a Rosaura Guillén Ayala (mi mamá), por ser ese motor que me impulsa a dar lo mejor de mi día con día y que obviamente lo aprendí de ti, si hay una persona que sea muestra de trabajo duro y perseverancia en mi vida, sin duda alguna eres tú y creo que nunca me va a alcanzar el tiempo para darte las miles de “**gracias**” que te debo por ser quien eres y por que gracias a ti, hoy estoy aquí cumpliendo una meta más a pesar de un terrible cáncer en medio de mi carrera, hoy estamos aquí y es gracias a ti. Gracias a mis tías, sobre todo a Elvira quienes te cuidaron cuando yo no podía y que me siempre me decían que estabas bien para que yo no me preocupara.

Gracias a mi mejor amiga Astrid por las inmemorables pláticas, los sueños alcanzados, las metas cumplidas, las aventuras, los proyectos juntas (**claro que todos siempre vamos a recordar nuestra máquina de movimiento perpetuo**, jaja), gracias por estos cuatro años y por los que siguen.

Gracias a Israel por haberme escuchado hasta largas horas de la noche cuando algo me causaba conflicto, por poner atención cuando le hablaba de algo respecto a mi carrera, por haber sido una persona llena de apoyo a lo largo de este tiempo, por darme la mano y por tranquilizarme cuando mi ansiendad no debaja que lo hiciera sola.

Gracias al Dr. Jorge Alejandro Wong Loya, o como yo le digo “Wong”; por haber sido no solo un súper asesor, sino profesor, coordinador de carrera, *CEO* de proyectos y sobre todo amigo, he aprendido mucho de ti, y estoy segura que aun me queda mucho por aprender, gracias por haberme acompañado en este viaje, por los regaños, por las risas, enseñanzas y por sí leer la tesis jajaja.

Gracias a los Dres. Memo Barrios y Miguel Robles, por mostrarme mi amor por la ciencia de datos, por recibirme en su cubículo cada vez que llegaba y decía “No, es que no entiendo”, por haber tenido paciencia para explicarme y por hacer que lo lograra. En realidad gracias a todos los profesores que me acompañaron estos cuatro años, de todos y cada uno de ustedes

aprendí algo y desaprendí una que otra cosa también. Me di cuenta que de eso se trata, cada vez que aprendes algo nuevo, notas que ignoras 20 cosas más, y que bueno, porque eso despierta el interés en nosotros y nos lleva más lejos.

Gracias a mis compañeros de la 6G, a Mariana, Zyanya, Iván, Demián por las noches de desvelos, las tardes de juegos, los cumpleaños sorpresa, las risas, los enojos, las tareas en equipo y todas las enseñanzas que me dejaron, son personas increíbles con un gran futuro, aprendí mucho de ustedes, les agradezco esta travesía y les deseo lo mejor.

Gracias a Maribel y Magali por “consentirnos” tanto, como dicen por ahí; por hacer los trámites un poco más llevaderos, por responder nuestras dudas, y por estar ahí.

Gracias a la UNAM por todas las oportunidades que me brindó, por todos los conocimientos que me permitió adquirir, gracias por enseñarnos que en México hay gente con muchísima capacidad, gracias por dejarme conocer y gracias por ser la máxima casa de estudios, estoy orgullosa de ser una PUMA y siempre lo estaré.

Por último, gracias a mí, por creer que podía hacerlo, por atreverme a decir “yo voy a estudiar lo que quiera, y no importa si me tengo que ir de casa”; porque esas palabras me llevaron a conocer Temixco, Canadá, Noruega, a vivir n cantidad de aventuras, tener amigos espectaculares, a conocerme a mi misma y a saber que puedo llegar a hacer cosas increíbles.

Gracias...

Resumen

En esta tesis se presenta el desarrollo de un nuevo modelo matemático para analizar el comportamiento de contenido de humedad relativa durante un proceso de secado de alimentos.

Para determinar el comportamiento de contenido de humedad, se propuso el método Racional Polinomial para primer y segundo orden, este método permite realizar un ajuste que describe el comportamiento de contenido de humedad, con coeficientes de determinación mayores a 0.9948 para las series de datos experimentales analizadas.

El proceso de aplicación se automatizó mediante el uso de un script en lenguaje Wolfram. Este nuevo método se comparó con los métodos más comúnmente utilizados para analizar el comportamiento de contenido de humedad, de acuerdo con la literatura que son Henderson y Pabis (HP), Logarítmico (Log), Midilli y Kucuck (MK), Lewis (L), Two-term (TT), Two-term exponencial (TTE), Wang y Sighn (WS) y Page (P).

Se aplicaron tanto los métodos mencionados anteriormente, como el nuevo método propuesto a 39 series de datos experimentales y se compararon entre ellos para todas las series. Se utilizó una función de mérito para determinar cuáles ajustes eran buenos y cuáles no.

El método RP para el segundo orden (SO) tuvo un buen ajuste en el 82.05% de las series analizadas, siendo el mejor ajuste en el 61.5% de todas las series de datos, por otro lado para el primer orden muestra un buen ajuste en el 30.77% de la series analizadas.

Capítulo 1

Antecedentes

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), alrededor de 1300 millones de toneladas de alimentos para consumo humano se pierde o se desperdicia (Benítez, 2019). Es por ello que es necesario implementar métodos para conservar los alimentos. El secado de alimentos es el método más antiguo para la conservación de alimentos (Jayas, 2016). Este método de conservación se utiliza en la industria alimentaria (Menon et al., 2020) para minimizar las pérdidas poscosecha y la degradación de la calidad, al reducir el contenido de humedad de los productos, provocar una reducción de la degradación enzimática y oxidativa y ampliar su almacenamiento o su vida útil (Chasiotis et al., 2020).

La deshidratación de alimentos nos puede conducir a la transformación de un alimento en una forma más conveniente de almacenar, empaquetar, transportar y usar (Jayas, 2016). Hoy en día, los productos secos son populares entre los consumidores. El creciente número de compradores representa un desafío para que los fabricantes de alimentos desarrollen opciones para diversificar y acelerar la producción de alimentos (Lusas and Rooney, 2001; Demarchi et al., 2018).

Por secado de alimentos se entiende a la eliminación casi completa (de una escala del 1 % al 100 %) del agua contenida en ellos llevando a cabo una migración de la humedad contenida hacia la atmósfera. Condiciones externas, como la temperatura y la humedad relativa del aire, la velocidad del aire y la presión son las variables de mayor influencia durante el secado (Mujumdar, 2014; López-Ortiz et al., 2018).

La importancia de predecir el contenido de humedad durante estos procesos de secado se debe a que los modelos de predicción ayudan a mejorar las condiciones de secado lo que nos lleva a un ahorro de energía.

1.1. Tipos de Secadores

A continuación se mencionan algunos tipos de secadores utilizados comúnmente en la industria, los cuales se clasifican de acuerdo con el procedimiento utilizado para transmitir el calor (Fito et al., 2016).

1.1.1. Secador de bucle convectivo

En este tipo de secador, se utilizan gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección y que el vapor generado es arrastrado fuera del secador.

En la figura 1.1 se puede observar un esquema de este tipo de secador, para un mejor entendimiento.

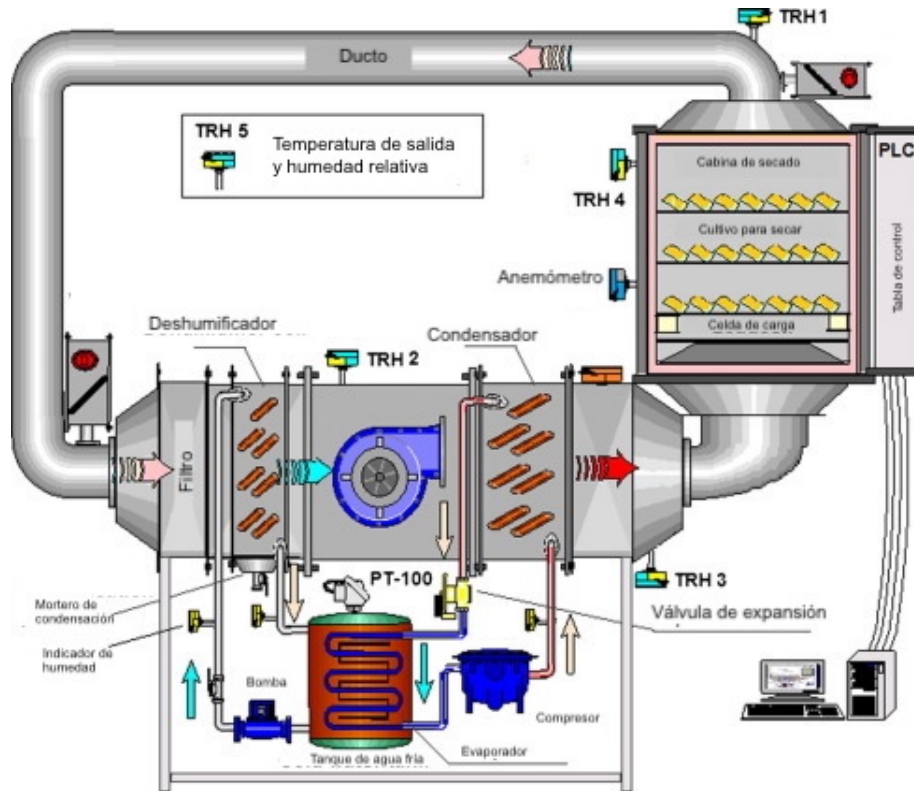


Figura 1.1: Esquema de secador convectivo. Tomada y modificada de: (Mustafa et al., 2016).

1.1.2. Secador solar de invernadero

Generalmente, su estructura es de barras de hierro galvanizadas, y la cubierta y paredes son de policarbonato. La pared frontal tiene entradas de aire. Se coloca una capa fina de productos sobre bandejas localizadas en plataformas elevadas de un solo nivel para facilitar la carga y descarga. La radiación solar al pasar por la cubierta calienta el aire, los productos y el piso de concreto. El aire caliente pasa a través de y sobre el producto absorbiendo su humedad. El aire húmedo, normalmente, se remueve del secador mediante extractores (Garduño et al., 2020).

En la figura 1.2 se puede observar un esquema de este tipo de secador, para un mejor entendimiento.

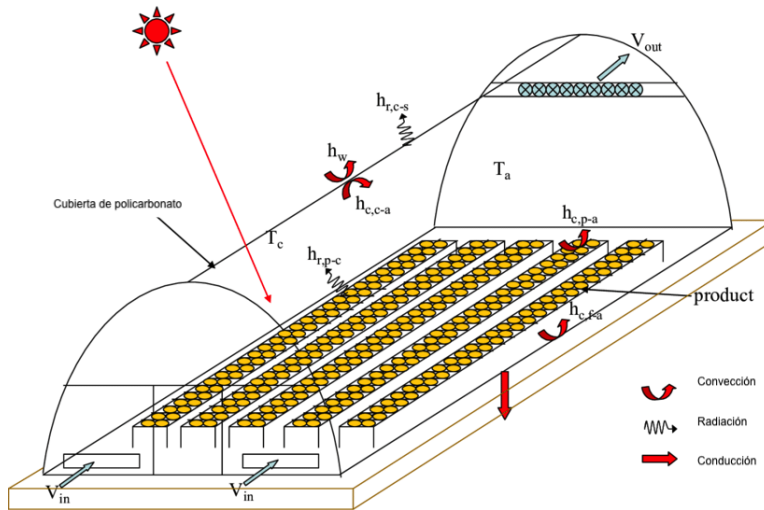


Figura 1.2: Esquema de secador solar de invernadero. Tomada y modificada de: (Janjai, 2012).

1.1.3. Secador solar de armario o gabinete

Este tipo de secadores funcionan en un régimen intermitente, es decir, que se interrumpen o cesan y prosigue o se repite (ESPAÑOLA, 2020). Están formados por una cámara metálica rectangular, la cual tiene soportes móviles sobre los que apoyan los bastidores, dichos bastidores, llevan un cierto número de bandejas puestas unas sobre otras.

Se hace circular aire caliente entre las bandejas por medio de un ventilador acoplado a un motor. Por medio del conducto de salida se evacua continuamente aire húmedo y a través de unas aberturas entra el aire fresco (Fito et al., 2016).

En la figura 1.3 se puede observar un esquema de este tipo de secador, para un mejor entendimiento.

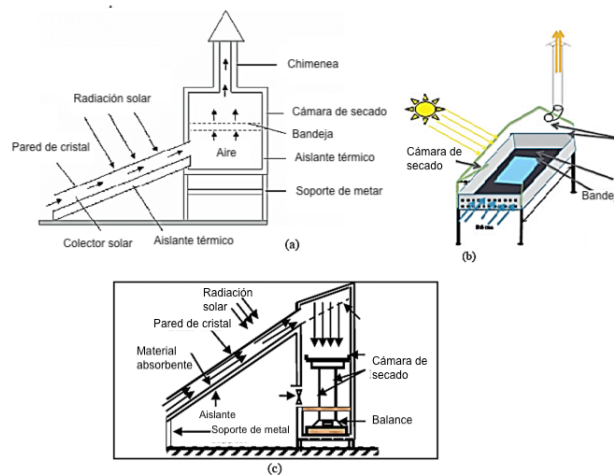


Figura 1.3: Esquema de secador solar de armario. Tomada y modificada de: (Ndukwu et al., 2018).

1.1.4. Secador solar directo

El secador solar directo consiste en, como su nombre lo indica, dejar los alimentos deshidratarse sin ningún equipo especial con la radiación solar incidiendo sobre ellos. A este proceso de secado, se le puede añadir un filtro UV-Azul que consiste en una celda de policarbonato celular comercial (PC) la cual tiene diferentes tamaños de celda de 4-14 mm (espesor de pared, 0.6 mm), extruido de la masa fundida de policarbonato.

Para proporcionar estabilidad ambiental a estas celdas bajo radiación solar (con más de 10 años de garantía), una capa estable a los rayos UV de unos pocos μm de espesor añadidos durante la extrusión forman una capa superior en uno lado de ella. Este lado de la PC está marcado con “UV” para indicar que debe de estar cara al sol para cumplir con la garantía del producto. Este experimento se escribe de manera detallada en (Nair et al., 2020).

En la figura 1.4 se puede observar un esquema de este tipo de secador, para un mejor entendimiento.

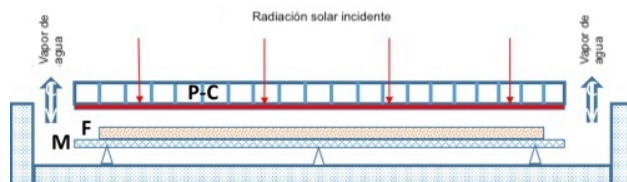


Figura 1.4: Esquema de secador solar con filtro UV-Azul. Tomada y modificada de: (Nair et al., 2020).

1.2. Modelos de cinética de secado

El secado de capa fina generalmente significa secar como una capa de muestras de partículas o rebanadas (Erbay and Icier, 2010; Akpınar et al., 2006).

Los modelos de simulación de los procesos de secado se utilizan para diseñar nuevos sistemas de secado, o mejorar los existentes (Ertekin and Firat, 2017). Las ecuaciones de secado de capa fina son fundamentales para la simulación de secado. Estas ecuaciones representan el intercambio de humedad entre una capa delgada del producto de secado con aire circundante. Desde un punto de vista matemático, una capa delgada representa la dx espacial que se elige infinitesimalmente pequeña dentro de la cual los cambios de humedad y temperatura del aire pueden asumirse lineales (Ertekin and Firat, 2017; Wang et al., 2004).

Recientemente se ha descubierto que las ecuaciones de secado de capa fina tienen una amplia aplicación debido a su facilidad de uso ya que requiere menos datos, a diferencia de los modelos distribuidos complejos (como los coeficientes fenomenológicos y de acoplamiento) (Erbay and Icier, 2010).

De acuerdo con la literatura, se han desarrollado distintos métodos, tanto teóricos como empíricos para estudiar el comportamiento de la cantidad de humedad. Estos métodos son análogos a la ley de enfriamiento de Newton, derivados de la segunda ley de difusión de Fick y también modelos empíricos que se pueden hallar en la literatura (Diamante and Munro, 1993; Gulcimen et al., 2016; Azaizia et al., 2017; Sonmete et al., 2017; Zhu et al., 2020).

Si bien existen varios métodos para analizar el comportamiento del contenido de humedad relativa (MR) durante el proceso de secado, estos no han podido ajustarse adecuadamente a la mayoría de los casos analizados, por lo que el desarrollo de métodos sigue siendo una tarea en la cual trabajar.

La cinética de secado normalizada generalmente se representa usando el contenido de humedad adimensional o la proporción de humedad (MR) como se representa en la ecuación 1.1

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (1.1)$$

donde M es el contenido de humedad de la muestra en cualquier tiempo de secado, M_0 es el contenido de humedad inicial y M_e es el contenido de humedad de equilibrio. En muchos experimentos, el peso final registrado se utiliza para el cálculo de M_e .

Al comienzo del secado, cuando $t = 0$, el contenido de humedad $M = M_0$. Cuando el secado termina $M = M_e$, entonces, los últimos datos en la cinética de secado normalizada deben ser 0.

A continuación se presentan las gráficas de el contenido de humedad a lo largo del tiempo para diferentes cultivos agropecuarios, con el fin de mostrar el comportamiento de este.

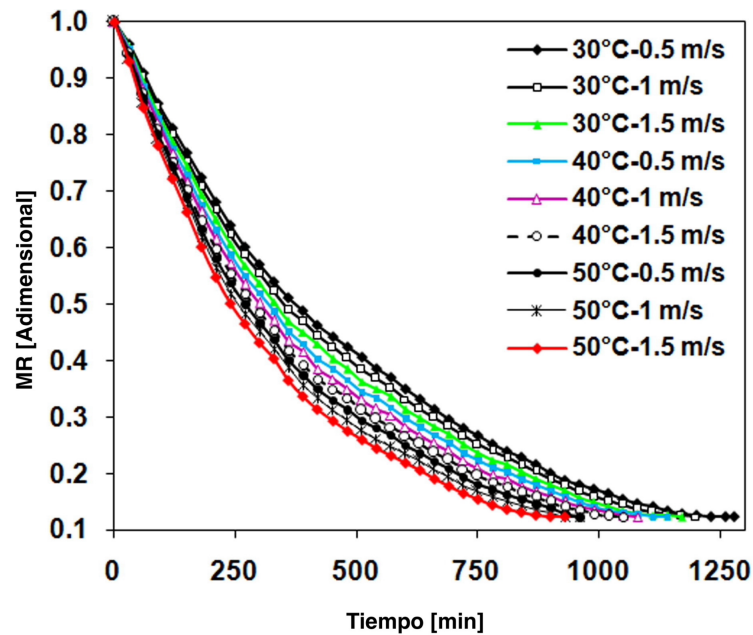
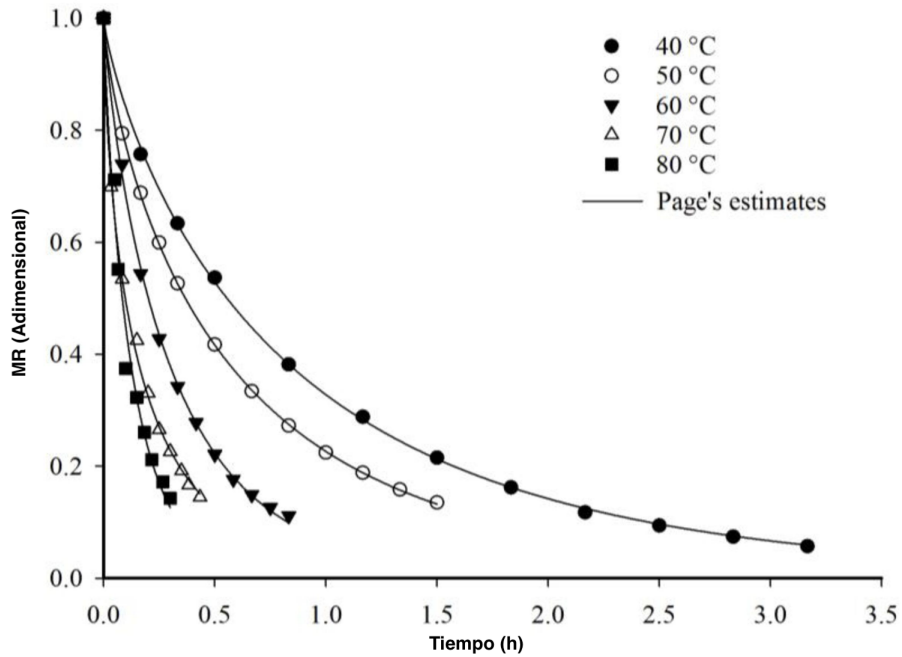


Figura 1.5: Comportamiento del contenido de humedad en hojas de menta. Tomada y modificada de: (Seyed-Hassan et al., 2017).



La *Guizotia abyssinica* es una planta herbácea anual, cuya semilla y el aceite extraído de la misma son comestibles. Tiene otros nombre como nigrillo, niger o ramtil (Gómez and Montes, 2007).

Figura 1.6: Comportamiento del contenido de humedad en semillas de Niger. Tomada y modificada de: (Da Silva et al., 2017).

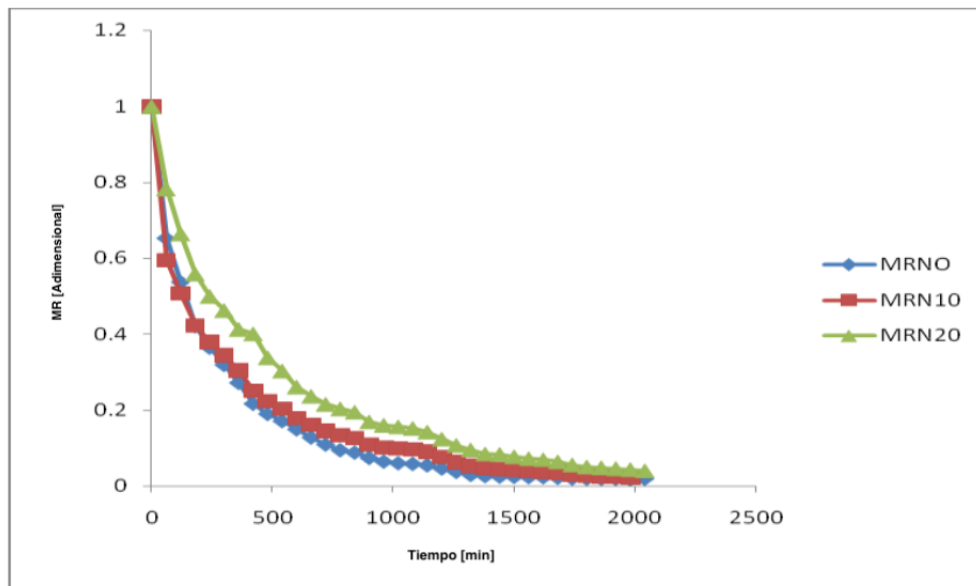


Figura 1.7: Comportamiento del contenido de humedad en filetes de pescado (Tilapia Zilli) salado. Tomada y modificada de: (Ikrang et al., 2014).

En las figuras anteriores se muestra el comportamiento de humedad en un proceso de secado, a continuación se describen los modelos comúnmente utilizados en la literatura.

1.3. Modelos análogos de la Ley de Enfriamiento de Newton

Estos métodos son una analogía simple a ley de enfriamiento de Newton, donde suponen que hay una resistencia interna al movimiento de la humedad, por lo tanto, los gradientes de humedad dentro del material son insignificantes. Solo considera la resistencia superficial (Madamba, 2003).

1.3.1. Modelo Lewis (L)

Lewis describió un modelo que se puede comparar con la Ley de enfriamiento de Newton, donde la velocidad de secado es proporcional a la diferencia en el contenido de humedad del producto y su contenido de humedad de equilibrio:

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e)$$

Después de resolver la ecuación diferencial, obtenemos (Panchariya et al., 2002; Ertekin and Firat, 2017):

$$MR = \exp(-kt) \tag{1.2}$$

Donde k es la constante de secado (s^{-1}). Este es uno de los modelos más simples para describir el contenido de humedad en los productos alimenticios. El inconveniente más importante de este modelo es que, por lo general, subestima las últimas etapas y sobreestima las primeras etapas del proceso de secado (Madamba, 2003; Ertekin and Firat, 2017).

1.3.2. Modelo Page (P)

El modelo de Page es una modificación del modelo de Lewis, para controlar las fallas se agrega una constante empírica (n) al término de tiempo. Esto nos lleva a un modelo que ofrece mejores predicciones (Madamba, 2003; Ertekin and Firat, 2017).

$$MR = \exp(-kt^n) \tag{1.3}$$

Donde k es la constante de secado (s^{-1}) y n , como ya se mencionó es una constante empírica.

Este modelo ha sido utilizado por muchos investigadores para describir la tasa de pérdida de humedad durante el secado en la superficie de los productos alimenticios, en condiciones de secado constantes.

1.4. Modelos derivados de la segunda Ley de Difusión de Fick's

Cuando en un sistema termodinámico multicomponente hay un gradiente de concentraciones, se origina un flujo irreversible de materia, desde las altas concentraciones a las bajas. A este flujo se le llama difusión.

La segunda ley de Fick nos dice que la tasa de cambio de la concentración en un momento y una posición específicos es proporcional al gradiente de concentración. La representación matemática de esta Ley viene dada por la siguiente ecuación (ver eq.1.4) (Oudenaarden, 2009).

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}$$

1.4.1. Modelo Henderson y Pabis (HP)

El modelo de Henderson y Pabis es el primer término de la solución general de la segunda Ley de Difusión de Fick (eq. 1.4) (Ertekin and Firat, 2017).

$$MR = a \exp(-kt) \quad (1.4)$$

Donde a se define como constante del modelo (adimensional). Esta constante se obtiene a partir de datos experimentales (Erbay and Icier, 2010) y la pendiente de este modelo, k , está relacionada con la difusividad efectiva cuando el proceso de secado tiene lugar solo en el período de la tasa de caída y la difusión del líquido controla el proceso (Panchariya et al., 2002).

Este modelo parece ser más efectivo para predecir la velocidad de secado al comienzo del proceso de secado, aunque a veces es menos eficiente para las últimas etapas del proceso (Dissa et al., 2008).

1.4.2. Modelo Logarítmico (Log)

El modelo Logarítmico es la forma logarítmica del modelo de Henderson y Pabis, con una adición de un término empírico (Erbay and Icier, 2010; Ertekin and Firat, 2017).

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (1.5)$$

Donde c es una constante empírica adimensional (Erbay and Icier, 2010).

1.4.3. Modelo Two-term (TT)

Este modelo se obtiene de las soluciones en serie generales de la ecuación de difusión de la ley de Fick 1.4, donde se utilizan los dos primeros términos de dicha solución y que deriva a la siguiente forma: (Panchariya et al., 2002; Erbay and Icier, 2010; Ertekin and Firat, 2017).

$$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1 t) \quad (1.6)$$

Donde a y b se definen como los indicadores de la forma y generalmente se denominan como constantes del modelo (adimensionales), y k , k_1 son las constantes de secado (s^{-1}). Estas constantes se obtienen a partir de datos experimentales (Erbay and Icier, 2010).

Esta solución se aplica independientemente de la geometría de las partículas y las condiciones de frontera, sin embargo, requiere una temperatura constante del producto y asume una difusividad constante (Panchariya et al., 2002).

1.4.4. Modelo Two-term exponenciales (TTE)

El modelo Two-term exponencial es una modificación del modelo two-term (TT), donde se reduce el número constante y se reorganiza el indicador de la forma del segundo término exponencial b en el modelo de two-term (TT), este tiene que cambiarse a un término empírico (Panchariya et al., 2002; Erbay and Icier, 2010; Ertekin and Firat, 2017).

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-k_1t) \quad (1.7)$$

Se enfatizó que, el coeficiente b en el TT tiene que ser $(1 - a)$ en $t=0$ para obtener $MR=1$ (Ertekin and Firat, 2017).

1.4.5. Modelo Midilli y Kucuck (MK)

El modelo MK utilizado para un proceso de secado de una sola capa, toma en consideración dos escenarios:

1. Si las muestras se secan en condiciones de fluctuación continua de la humedad relativa del aire de secado, el contenido de humedad relativa del producto se puede definir como:

$$MR = M_t/M_0$$

2. Si las muestras se secan en condiciones con una proporción constante de humedad relativa del aire de secado, el contenido de humedad relativa del producto se puede definir como:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

El modelo MK fue la combinación de un término exponencial y un término lineal. Aplicaron este nuevo modelo al secado de polen, hongos y pistacho sin cáscara para diferentes métodos de secado (Erbay and Icier, 2010).

Entonces, el modelo MK usa la ecuación matemática que se muestra a continuación:

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (1.8)$$

Donde b es una constante empírica (s^{-1}), de acuerdo con (Midilli et al., 2002).

1.5. Modelos empíricos

Los modelos empíricos, generalmente, se obtienen del ajuste de datos experimentales mediante un modelo matemático, en este caso se busca obtener un modelo que ajuste el cambio en el contenido de humedad a lo largo del tiempo de secado. Estos modelos no se basan en los fenómenos físicos involucrados, por lo que los coeficientes del modelo obtenido en principio no tiene relación con las variables físicas involucradas, pero el modelo describe el comportamiento y la relación entre las variables experimentales (Panchariya et al., 2002).

1.5.1. Modelo Wang y Singh (WS)

Este modelo propuso una ecuación cuadrática para ajustar los datos de una sola capa de arroz en bruto (Ertekin and Firat, 2017).

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (1.9)$$

Donde a (s^{-1}) y b (s^{-2}) son constantes obtenidas de datos experimentales. Este método ha demostrado ser útil en diferentes investigaciones para describir el comportamiento de humedad en el plátano, perejil y rodajas de árboles de bambú (Ertekin and Firat, 2017).

1.6. Método Racional Polinomial (RP)

En la ingeniería tanto en la ciencia, algunos de los procesos fisicoquímicos y termodinámicos pueden describirse (física y matemáticamente) mediante comportamientos asintóticos típicos. El comportamiento del contenido de humedad relativa durante el proceso de secado puede modelarse utilizando funciones racionales polinomiales ya que exhibe un comportamiento de este tipo.

En este estudio, se utilizó un nuevo método práctico basado en una función racional polinomial para describir el comportamiento del contenido de humedad durante el proceso de secado de alimentos, que es una tarea importante para la descripción y modelado cinético de secado adecuados. En este trabajo, se describe el desarrollo de la metodología, su aplicación y evaluación de la precisión del modelo. El método propuesto se aplicó a 39 series de datos y se comparó con los métodos más comúnmente utilizados por la literatura para obtener mejores resultados. El objetivo de esta propuesta es analizar una nueva estrategia para formular modelos que describan el proceso de secado de alimentos a través del MR, preservando relaciones analíticas sencillas y prácticas y la auto consistencia.

En tales condiciones, hay varias funciones matemáticas que podrían ajustarse a las tendencias asintóticas resultantes que se pueden observar en las figuras 1.5, 1.6 y 1.7. Una de estas funciones es la conocida función RP, que se ha utilizado con éxito en una amplia variedad de aplicaciones de ingeniería para modelar datos experimentales que exhiben una tendencia asintótica (Wuytack, 1979; Del Río et al., 1998; Kumar et al., 2000; Nunez-Santiago et al., 2003; Wong-Loya et al., 2012, 2015a,b; Del Río-Portilla et al., 2018, Número de Patente: MX 359968 B; Andaverde et al., 2019; Molina-Rodea et al., 2020). La función RP se basa en el método conocido como aproximantes de Padé (Owen and Orville, 1995), tal aproximación es en realidad una función RP que podría proponerse como una generalización

del modelo polinomial de Taylor, donde la función matemática viene dada por el cociente de dos polinomios

La ecuación generalizada de una función RP viene dada por la siguiente expresión matemática (eq. 1.10):

$$y(x) = \frac{p_0 + p_1x^2 + \dots + p_kx^k}{q_0 + q_1x^2 + \dots + q_jx^j} \quad (1.10)$$

Los coeficientes p_1 y q_1 , (de $i = 0, 1, 2, \dots, k$, y $r = 0, 1, 2, \dots, j$ respectivamente) en la ecuación (eq. 1.10) pueden tener especificaciones distintas, lo que lleva a enfoques diferentes, y pueden ser coeficientes enteros o fracciones.

Para obtener los valores y en sus correspondientes datos x , es necesario determinar numéricamente los coeficientes p_1 y q_1 .

Para esta aplicación en particular, la variable dependiente (y) ha sido definida por las mediciones de MR , mientras que la variable independiente (x) viene dada por el tiempo de secado. Luego de aplicar los fundamentos matemáticos de la función RP, se propuso el coeficiente q_0 con valor 1, con el fin de evitar indeterminaciones en el modelo:

$$MR = \frac{p_0 + p_1t + \dots + p_kt^k}{1 + q_1t + \dots + q_jt^j} \quad (1.11)$$

Según la ecuación (eq. 1.11), el número total de coeficientes vendrá dado por la siguiente suma: $n = k + j + 1$. Para que este modelo matemático describa un comportamiento asintótico, es necesario que k sea igual a j . Por lo tanto, se requieren n pares de datos (t, MR) para obtener n ecuaciones, que deben resolverse numéricamente para determinar sus coeficientes (Owen and Orville, 1995).

Para resolver las tendencias asintóticas exhibidas en las mediciones de humedad relativa MR (t) durante el proceso de secado, ver figuras 1.5, 1.6 y 1.7, se deben proponer funciones RP de primer y segundo orden para ajustar los conjuntos de datos MR .

Esta condición matemática implica que los exponentes k y j más altos de las funciones RP adoptan valores que deben de ser iguales, es decir, un valor de 1 para primer orden y un valor de 2 para segundo orden. La ecuación (eq. 1.11) se redujo, por lo tanto a dos funciones matemáticas (eqs. 1.12 y 1.13) que dependen directamente del grado de polinomio:

$$MR = \frac{p_0 + p_1t}{1 + q_1t} \quad (1.12)$$

$$MR = \frac{p_0 + p_1t + p_2t^2}{1 + q_1t + q_2t^2} \quad (1.13)$$

Las ecuaciones (eqs. 1.12 y 1.13) pueden usarse para ajustar varios conjuntos de datos experimentales usando los métodos de mínimos cuadrados y es la base del método aquí propuesto. A partir de aquí, llamaremos a este modelo matemático el método racional polinomial (RP) para el primer orden (eq. 1.12) y el segundo orden (eq. 1.13) se denominarán FO y SO respectivamente.

Capítulo 2

Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo, se propuso la metodología que se presenta en el siguiente diagrama de flujo 2.1, y que se explica detalladamente más adelante.

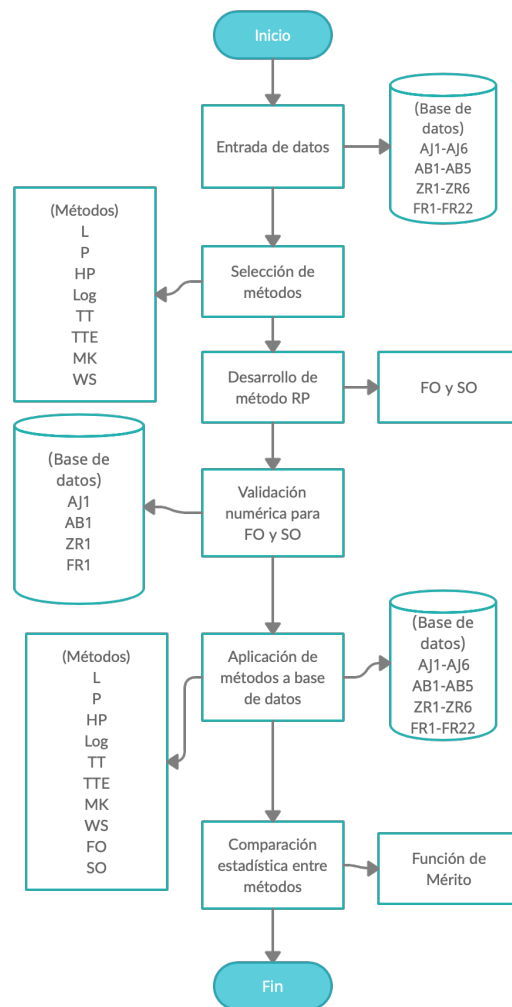


Figura 2.1: Diagrama de flujo que muestra la metodología que se siguió en el presente trabajo.

-
- a) Compilación de una base de datos de trabajo.
 - b) Selección de métodos comúnmente utilizados en la literatura para el modelado del comportamiento de contenido de humedad: modelos análogos de la Ley de Enfriamiento de Newton: Lewis (eq. 1.2) y Page (eq. 1.3); aquellos modelos de la Segunda Ley de Difusión de Fick: Henderson y Pabis (eq. 1.4), Logarítmico (eq. 1.5), Two-term (eq. 1.6), Two-term exponencial (eq. 1.7), y Midilli y Kucuck (eq. 1.8) así como también el modelo empírico de Wang y Singh (eq. 1.9).
 - c) Desarrollo del método RP para primer **FO** y segundo orden **SO**, cuyos modelos matemáticos se pueden ver en 1.12 y 1.13 respectivamente.
 - d) Validación de la aplicabilidad de los modelos propuestos.
 - e) Aplicación del método RP para primer y segundo orden a toda la base de datos.
 - f) Comparación estadística entre los datos experimentales y los datos obtenidos después de aplicar el método RP para primer y segundo orden. Obtención del coeficiente de determinación (R^2) para cada una de las series, el valor de diferencia absoluta (VDA) entre los datos experimentales y los modelos de FO y SO, así como el valor de su función de mérito (N).
 - g) Aplicación de los modelos más comúnmente utilizados a toda la base de datos.
 - h) Comparación estadística del ajuste obtenido por el método RP y los métodos más comúnmente usados mediante la función de mérito.

2.1. Base de datos

La base de datos de secado se obtuvo de la recopilación de datos de diferentes trabajos reportados en la literatura así como de algunos experimentos realizados y proporcionados por distintos estudiantes del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, cabe recalcar que estos presentan resultados experimentales obtenidos de diferentes tipos de secadores y con distintas condiciones de secado. A continuación se describen los procedimientos experimentales que se siguieron para la obtención de datos, estos se presentan divididos por tipo de secador (ver secciones: 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3 y 2.5).

2.1.1. Experimentos con secador de bandeja de bucle convectivo

En este experimento, se utilizó un secador de bandeja de bucle convectivo (patente MX-PA06008850), el cual fue descrito previamente por (López-Ortiz et al., 2013, 2018). La materia prima que se utilizó para secar en este ensayo, fue ajo en rodajas (*Allium sativum*, L.) (Fig. 2.2). El experimento tuvo condiciones de secado a diferentes temperaturas de 40 y 60°C.



Figura 2.2: Secador de bandeja de bucle convectivo usado para el ajo.

2.1.2. Experimentos con secador solar de invernadero (GSD)

Para llevar a cabo este experimento, se utilizó el secador solar de invernadero (GSD, por sus siglas en inglés), este se conectó a tres colectores solares para calentar el aire (Fig. 2.3) y este experimento fue descrito previamente por Román-Roldán (Román-Roldán et al., 2019). Cabe mencionar que para este experimento no se tuvieron condiciones de secado específicas, es decir, no se presenta una temperatura constante de secado.

En este ensayo se utilizó como materia prima, la albahaca Nufar (*Ocimum basilicum*) cultivada en Tequesquitengo, Morelos, México. Solo se utilizaron las hojas y se colocaron de una manera separada y cuidando de no encimar una hoja sobre otra. Se utilizó un área de 16 m² para las bandejas.

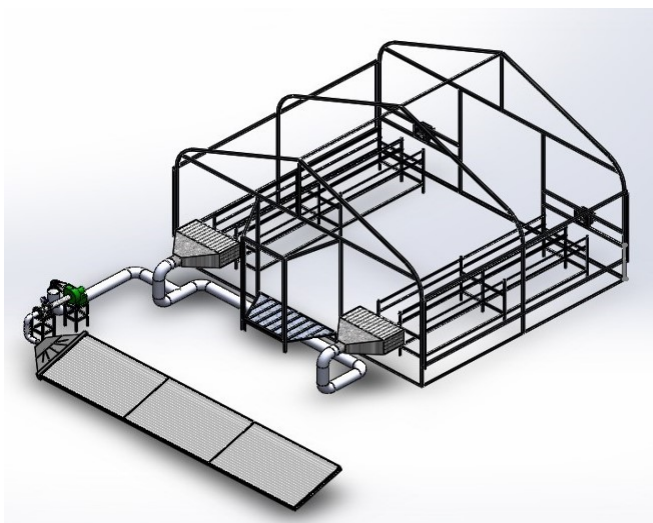


Figura 2.3: Secador de invernadero (GSD), vista sin cubierta plástica y con calentadores solares de aire.

2.1.3. Experimentos con secador solar de armario o gabinete

El secador solar de gabinete se usó para experimentos con fresas y fue descrito previamente por (Castillo-Tellez et al., 2018). Las fresas de maduración comerciales (*Fragraria vesca*) se cortaron en rodajas (2 mm) y se recubrieron con diferentes soluciones de agua para la protección de la radiación solar. El revestimiento se realizó por inmersión durante 3 s. Se probaron cinco soluciones de agua con biopolímeros. Se utilizó Mucílago de nopal (M-N), mucílago de fenogreco (FENO), Xantano (G-X), Arábica (G-A) y Goma guar (G-G). Las muestras recubiertas se colocaron en mallas de plástico y se introdujeron en el secador solar. Todos los experimentos se realizaron simultáneamente. Este experimento tuvo condiciones de secado a diferentes temperaturas de 40, 50 y 60°C.

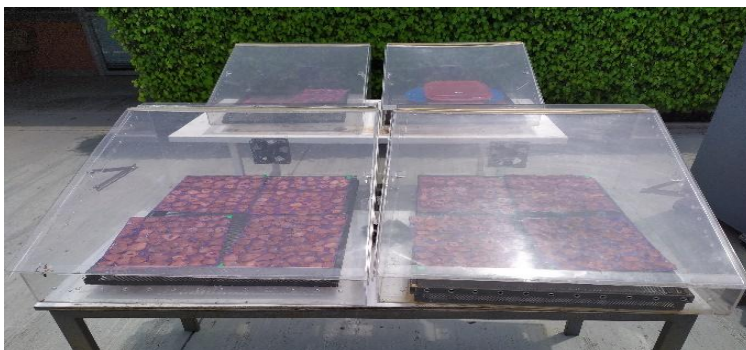


Figura 2.4: Sistema de secador solar de gabinete usado en experimentos con rodajas de fresa recubiertas y sin recubrimiento.

2.1.4. Experimentos de secado solar directo

En este experimento, como su nombre lo dice, se dejaron las especies, tanto de fresas como zarzamoras en bandejas, secando al sol directamente; en algunas bandejas se utilizó un filtro solar de UV-Azul como material de cobertura en el secado. Este experimento fue descrito previamente por (Nair et al., 2020).

Se utilizaron productos congelados comerciales del mercado local de Temixco, Morelos. Las fresas y las zarzamoras se trituraron y las pulpas obtenidas se transfirieron a bandejas de plástico de 35x50x0.5 cm. El promedio del espesor de la pulpa fue de 3 mm. Se ocuparon cuatro bandejas: dos para secado directo al sol y dos para secado con filtro UV-Azul.

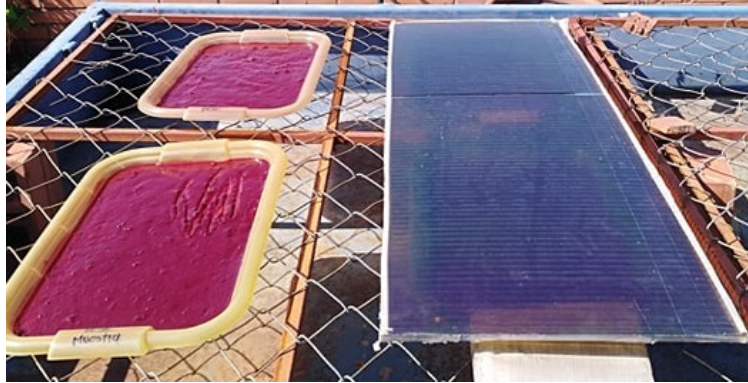


Figura 2.5: Experimentos de secado solar con filtro UV-Azul y sin filtro.

2.2. Descripción de la base de datos.

Con los datos recopilados de los experimentos mencionados anteriormente, se creó una base de datos de trabajo. Esta base de datos consta de 39 series de datos, las cuales se presentan por tipo de alimento utilizado en el proceso de secado y que se muestran en la secciones 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 y 2.2.4.

2.2.1. Ajo

Las series AJ1-AJ6 fueron obtenidas del experimento de secador de bucle convectivo, donde se utilizó ajo en rodajas, la diferencia entre las series se estiba que los experimentos se realizaron a diferentes temperaturas. En la tabla 2.1 se muestran las diferentes condiciones de secado para cada una de las series.

Tabla 2.1: Condiciones de secado para las series de ajo.

Serie	Tipo de secador	Temperatura de secado [°C]	Duración del secado [min]
AJ1	Bucle convectivo	60	415
AJ2			420
AJ3			180
AJ4			615
AJ5		40	420
AJ6			365

En la figura 2.6 se muestra el comportamiento del contenido de humedad a través del tiempo para el cultivo de ajo.

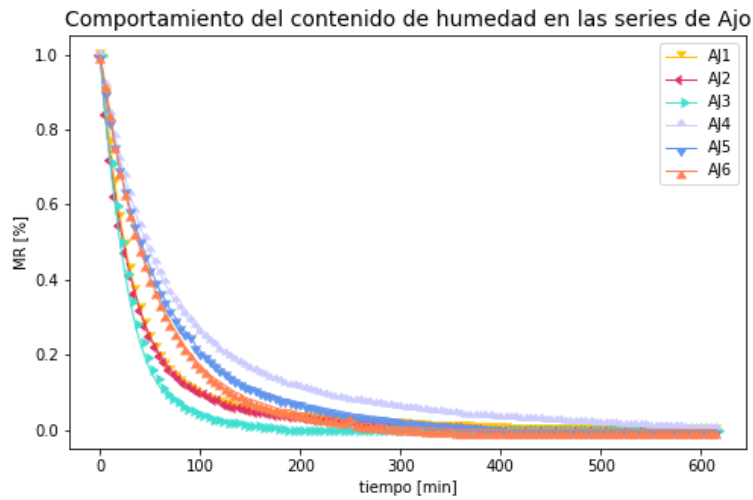


Figura 2.6: Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series de ajo a una temperatura de 60°C y 40°C.

2.2.2. Albahaca

Las series AB1-AB5 fueron obtenidas del experimento de secador solar de invernadero, donde se utilizó albahaca, las hojas se colocaron una por una, sin encimarse en las bandejas. En la tabla 2.2 se muestran las diferentes condiciones de secado para cada una de las series.

Tabla 2.2: Condiciones de secado para las series de albahaca.

Serie	Tipo de secador	Duración del secado [min]
AB1	Secador solar de invernadero	329
AB2		
AB3		
AB4	Secador de bucle convectivo	
AB5		

El comportamiento de contenido de humedad de las series de albahaca se puede ver en la figura 2.7.

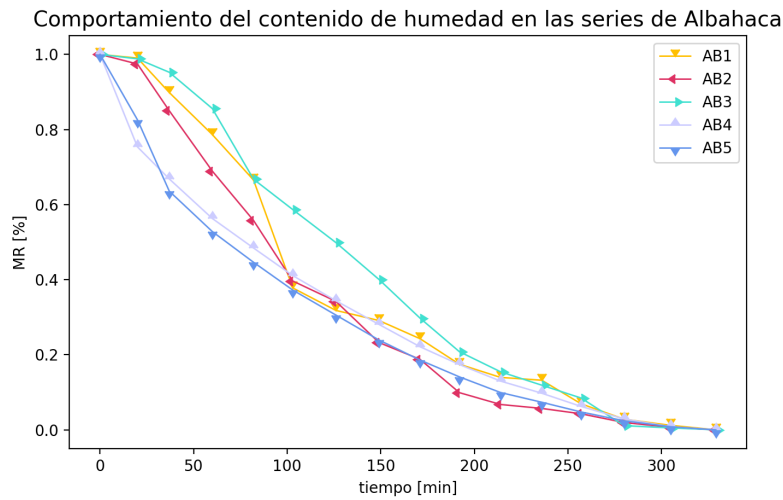


Figura 2.7: Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series de las series de albahaca.

2.2.3. Zarzamora

Las series ZR1-ZR6 fueron obtenidas del experimento de secado solar directo y en algunas de ellas se utilizó filtro UV-Azul, en la tabla 2.3 se muestran las diferentes condiciones de secado para cada una de las series.

Tabla 2.3: Condiciones de secado para las series de zarzamora.

Serie	Tipo de secador	Duración del secado [min]
ZR1	Secado solar con filtro UV-Azul	480
ZR2	Secado solar directo	480
ZR3	Secado solar con filtro UV-Azul	360
ZR4	Secado solar directo	480
ZR5	Secado solar con filtro UV-Azul	480
ZR6	Secado solar directo	360

En la figura 2.8 se muestra el comportamiento del contenido de humedad a través del tiempo para el cultivo de zarzamora.

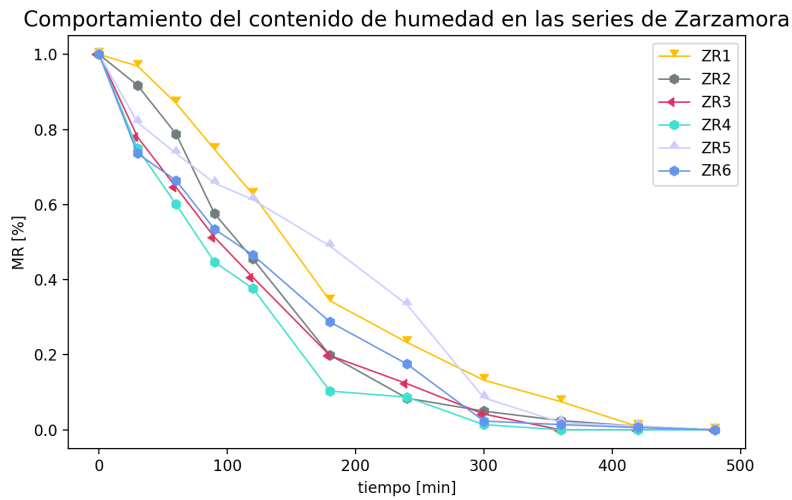


Figura 2.8: Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series de las series de zarzamora.

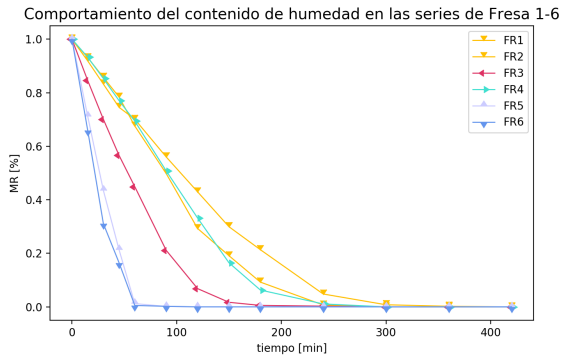
2.2.4. Fresa

Con relación a las series FR1-FR22, los experimentos de esta se llevaron a cabo, tanto en el secador solar de armario, como en el proceso de secado solar directo. En la tabla 2.4 se muestran las diferentes condiciones de secado para cada una de las series.

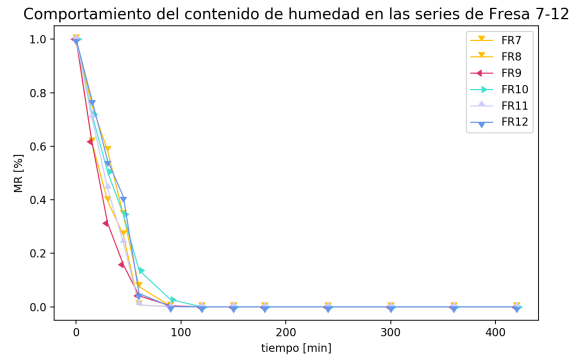
En la figura 2.9 se muestra el comportamiento del contenido de humedad a través del tiempo para el cultivo de fresa.

Tabla 2.4: Condiciones de secado para las series de fresa.

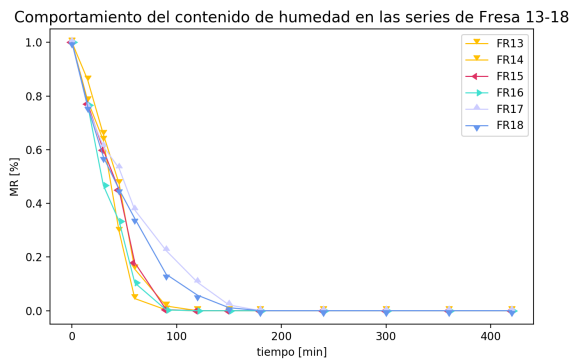
Serie	Tipo de secador	Temperatura de secado [°C]	Duración del secado [min]	Revestimiento	
FR1	Armario	40	420	No aplica	
FR2		50	300		
FR3		60			
FR4		60			
FR5		No aplica	No aplica	360	S-R
FR6					M-N
FR7					FENO
FR8					G-G
FR9					G-A
FR10					G-X
FR11	S-R				
FR12	M-N				
FR13	FENO				
FR14	G-G				
FR15	G-A				
FR16	G-X				
FR17	Solar con filtro UV-Azul	No aplica	360	No aplica	
FR18	Solar directo				
FR19	Solar con filtro UV-Azul				
FR20	Solar directo				
FR21	Solar con filtro UV-Azul				
FR22	Solar directo				



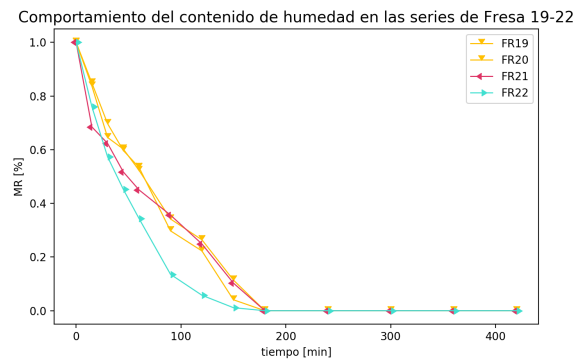
(a) FR1-FR6



(b) FR7-FR12



(c) FR13-FR18



(d) FR19-FR22

Figura 2.9: Gráfica del comportamiento de humedad con tendencia asintótica de las series fresa.

Finalmente, en la tabla 2.5 se presenta un resumen de las series que componen la base de datos y el tipo de alimento utilizado.

Tabla 2.5: Resumen de la base de datos utilizada

Serie de datos (Número de Serie)	Descripción (Tipo de Alimento)
AJ1-AJ6	Ajo en rodajas (<i>Allium sativum,</i>) <i>L.</i>
AB1-AB5	Hojas de albahaca Nufar (<i>Ocimum basilicum</i>)
ZR1-ZR6	Zarzamora triturada (<i>Rubus</i>)
FR1-FR22	Fresa en rodajas (<i>Fragraria vesca</i>)

2.3. Aplicación del método RP a la base de datos.

Para aplicar de manera eficiente el método RP, se creó un script en lenguaje de Wolfram el cuál sigue el algoritmo que se presenta en el siguiente diagrama de flujo (ver fig 2.10); la base de este script se encuentra en el apéndice A de esta tesis.

Es importante recalcar que se explicaron los experimentos con anterioridad para demostrar la aplicabilidad del método RP a distintas condiciones de secado, como son: Tipo de secador, cultivo, temperatura, revestimiento, etc.

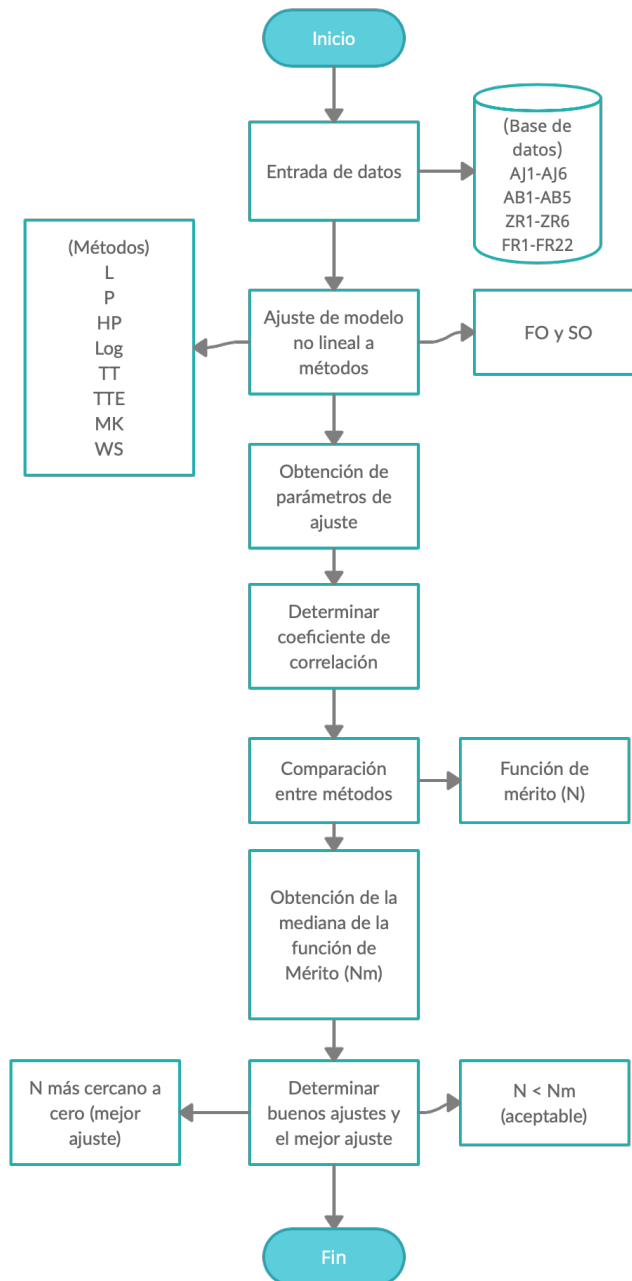


Figura 2.10: Algoritmo seguido en el programa de Wolfram *Mathematica*

-
- a) Lectura de datos en Wolfram.
 - b) Aplicación de los métodos de Lewis (eq. 1.2), Page (eq. 1.3), Henderson y Pabis (eq.1.4), Logarítmico (eq. 1.5), Two-term (eq. 1.6), Two-term exponencial (eq. 1.7), Midilli y Kuckuc (eq. 1.8) y Wang y Singh (eq. 1.9), así como los modelos de FO (eq. 1.12) y SO (eq. 1.13) a las 39 series de datos resumidas en la tabla 2.5.
 - c) Obtención de los parámetros de ajuste para cada método, así como su coeficiente de determinación (R^2) y el máximo valor de la diferencia absoluta (VDA) entre los datos experimentales y los datos calculados para cada métodos.
 - d) Comparación entre métodos mediante la función de mérito.
 - e) Obtención de la mediana de la función de mérito (N_m) para todos los métodos en todas las series.
 - f) Determinación de los métodos que tuvieran un buen ajuste, así como el que fuera el mejor ajuste (ver sección 2.4).

2.4. Comparación de los datos experimentales con los métodos

Para evaluar el ajuste entre los métodos antes mencionados y el modelo matemático presentado en este trabajo, se empleará una **función de mérito** (N), también conocida como función de figura de mérito, es una función que mide el ajuste entre los datos experimentales y el modelo de ajuste para una elección particular de los parámetros. Por convención, la función de mérito tiende a cero cuando el ajuste es bueno (Weisstein, 2021).

Para determinar cuantitativamente la correlación entre los modelos FO y SO y los datos de secado, se propone una función de mérito dada por:

$$N = \sqrt{\frac{\sum_{t_i}^{t_f} (E(t) - M(t))^2}{\sum_{t_i}^{t_f} E(t)^2}} \quad (2.1)$$

Donde $E(t)$ son los datos experimentales, $M(t)$ son los datos calculados. Entre mejor sea el ajuste, el valor de su función de mérito será más cercano a cero. Esta función de mérito se ha utilizado para mostrar el ajuste entre los datos experimentales y simulados por los modelos más comúnmente utilizados en la literatura (mencionados en la sección 1.2) (Estrada-Wiese et al., 2010, 2018; Andaverde et al., 2019; Molina-Rodea et al., 2020).

Finalmente, para analizar la aplicabilidad del método RP, se comparó con los métodos que se utilizan comúnmente para analizar datos de secado (Lewis, Page, Henderson y Pabis, Logarithmic, Two-term, Two-term exponencial y de Wang y Singh) así como los nuevos métodos de Primer y Segundo Orden, aplicando todos los métodos a la misma base de datos de trabajo y luego usando la función de mérito.

Para determinar si un método tenía un buen ajuste, se propuso un parámetro arbitrario, que era la mediana de todos los valores de la función de mérito (N_m) de todos los métodos.

Debido a que la distribución de los valores de N no fue normal, la mediana fue un parámetro adecuado.

Un valor de N **menor que el valor de la mediana** de todos los valores de N obtenidos se consideró como el **valor para un ajuste aceptable** de los métodos, y el método con el valor de N **más cercano a cero**, es el **mejor ajuste** del conjunto de datos analizados.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Aplicación del método RP

Para comparar los resultados, se aplicaron a las series de datos los métodos más utilizados (Lewis, Page, Henderson y Pabis, modelo logarítmico, Two-term, Two-term exponencial y Wang and Singh). Los valores de la función de mérito (eq. 2.1) se calcularon para cada método para determinar el ajuste con las series de datos, así como el coeficiente de determinación al cuadrado (R^2) y el valor de diferencia absoluta (VDA) entre los datos experimentales y los calculados por cada método.

Para demostrar la aplicabilidad del método PR de primer y segundo orden, se analizaron todas las series y a continuación se describen detalladamente 12 de las 39 series y las restantes se presentan de forma resumida en las tablas (ver 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20).

Se describe nuevamente las condiciones de secado para cada serie, con el objeto de mostrar la aplicabilidad del método RP a diferentes condiciones de secado.

3.1.1. Serie AJ1

La serie AJ1 se obtuvo del experimento del secador de bucle convectivo, la especie utilizada fue ajo cortado en rodajas, este experimento se realizó a una temperatura constante de 60°C , y se constituye de 84 pares de datos de contenido de humedad a lo largo de un tiempo de 415 minutos.

En la figura 3.1 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad para esta serie.

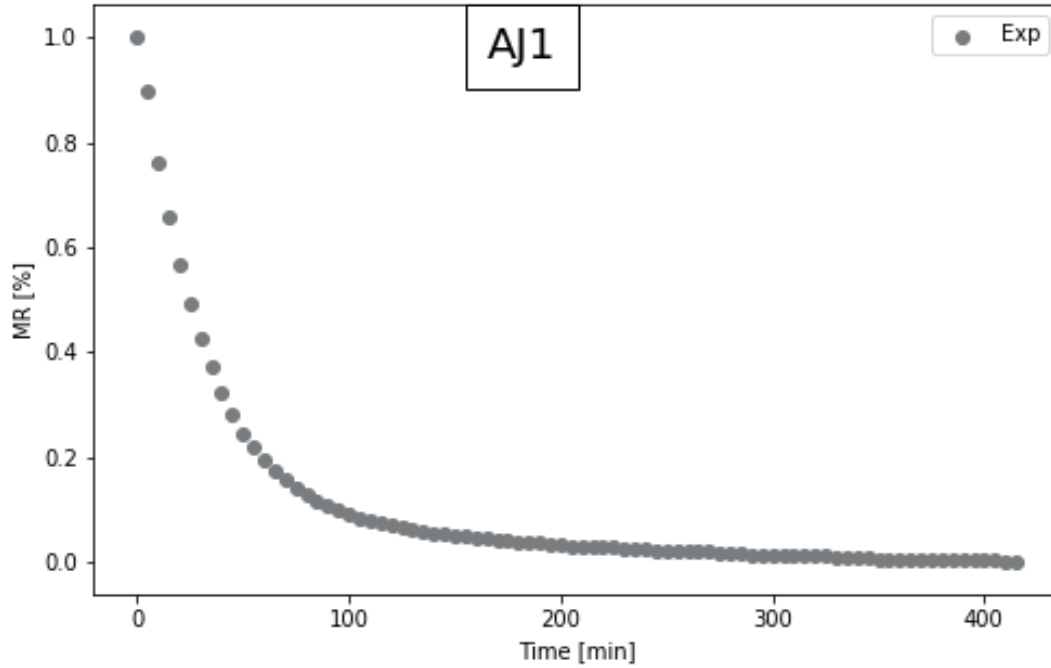


Figura 3.1: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ1.

El modelo matemático obtenido aplicando el método RP para el primer (FO) y segundo (SO) orden se presenta en (eqs. 3.1 y 3.2) respectivamente.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.08358 - 0.003492t}{1 + 0.4913t} \quad (3.1)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{1.00083 + 0.003694t - 9.91177 \times 10^{-6}t^2}{1 + 0.02435t + 0.0009977t^2} \quad (3.2)$$

La tabla 3.1 muestra los resultados de ajuste calculados aplicando la ec. 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1: Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie AJ1. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9858 para el modelo FO y 0.9997 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.08358	0.08358	1.00083	0.00083
5	0.89650	0.85587	0.04063	0.88868	0.00782
10	0.76290	0.70318	0.05972	0.77181	0.00891
15	0.65670	0.59368	0.06302	0.66299	0.00629
20	0.56680	0.51132	0.05548	0.56768	0.00088
25	0.49050	0.44711	0.04339	0.48691	0.00359
30	0.42780	0.39566	0.03214	0.41952	0.00828
35	0.37060	0.35350	0.01710	0.36362	0.00698
40	0.32150	0.31832	0.00318	0.31725	0.00425
45	0.28070	0.28853	0.00783	0.27865	0.00205
50	0.24520	0.26297	0.01777	0.24634	0.00114
100	0.09260	0.12420	0.03160	0.09477	0.00217
150	0.04900	0.06688	0.01788	0.04915	0.00015
200	0.03270	0.03558	0.00288	0.02934	0.00336
250	0.02180	0.01585	0.00595	0.01879	0.00301
300	0.01360	0.00229	0.01131	0.01241	0.00119
350	0.00540	-0.00762	0.01302	0.00820	0.00280
400	0.00270	-0.01517	0.01787	0.00524	0.00254

^a VDA Es el valor de la diferencia absoluta.

^b Debido a la extensa cantidad de datos experimentales, solo se presenta un extracto de los datos de esta serie.

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.2.

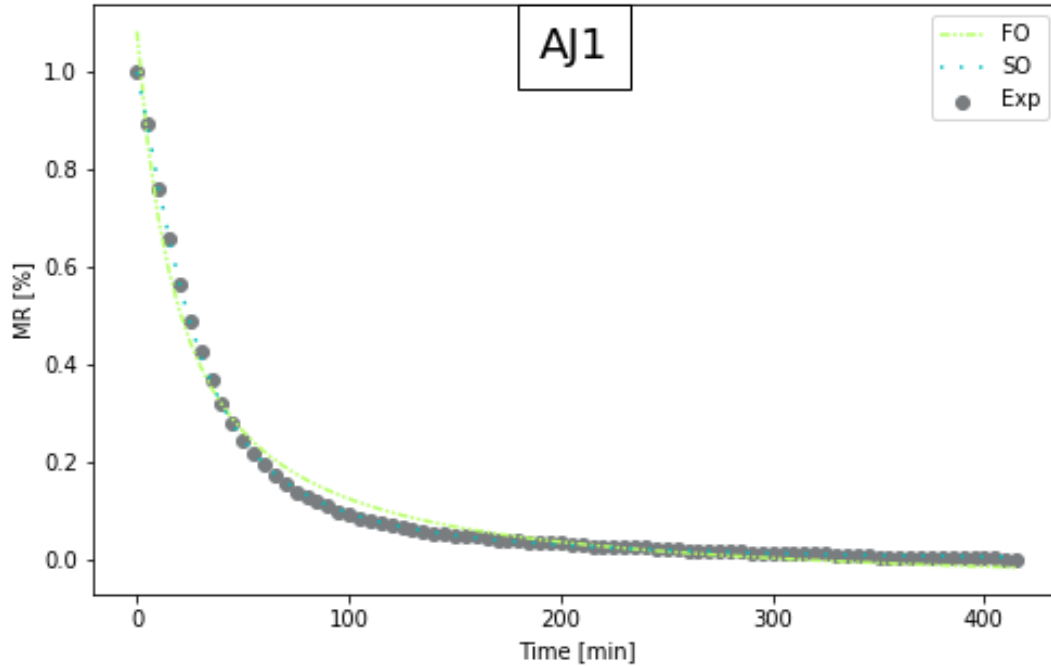


Figura 3.2: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ1.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.0835, para el método de SO el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.00891. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.10454$ para FO y $N_{SO} = 0.01404$ para SO.

3.1.2. Serie AB1

Esta serie se obtuvo a partir del experimento del secador solar de invernadero usando hojas de albahaca Nufar, se constituye de 16 pares de datos de humedad relativa en un tiempo de 329 minutos.

En la figura 3.3 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

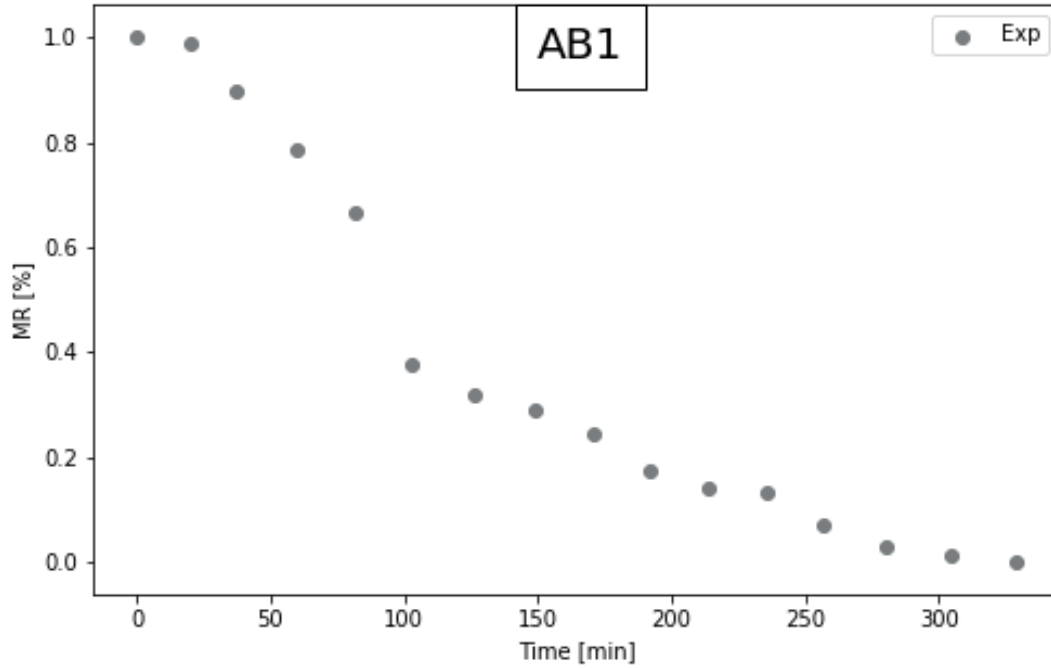


Figura 3.3: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB1.

El modelo matemático obtenido aplicando el método RP para el primer (FO) y segundo (SO) orden se presenta en (eqs. 3.3 y 3.4) respectivamente.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.10161 - 0.00369t}{1 + 0.00461t} \quad (3.3)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.9939 + 0.003691t - 1.868 \times 10^{-5}t^2}{1 + 0.000411t + 0.000137t^2} \quad (3.4)$$

La tabla 3.2 muestra los resultados de ajuste calculados aplicando la ec. 3.3 y 3.4.

Tabla 3.2: Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie AB1. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9692 para el modelo FO y 0.9899 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1.0000	1.1016	0.1016	0.9939	0.0061
20	0.9903	0.9408	0.0495	0.9974	0.0071
37	0.8984	0.8240	0.0745	0.9186	0.0202
60	0.7864	0.6888	0.0976	0.7564	0.0300
82	0.6654	0.5791	0.0864	0.5989	0.0665
103	0.3779	0.4884	0.1105	0.4711	0.0932
126	0.3181	0.4018	0.0837	0.3602	0.0420
149	0.2913	0.3261	0.0349	0.2752	0.0161
171	0.2427	0.2622	0.0194	0.2125	0.0302
192	0.1748	0.2075	0.0328	0.1654	0.0094
214	0.1397	0.1560	0.0163	0.1261	0.0136
236	0.1322	0.1095	0.0227	0.0945	0.0377
257	0.0695	0.0691	0.0004	0.0698	0.0003
280	0.0284	0.0288	0.0004	0.0475	0.0191
305	0.0119	-0.0110	0.0229	0.0275	0.0156
329	0.0000	-0.0457	0.0457	0.0117	0.0117

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.4.

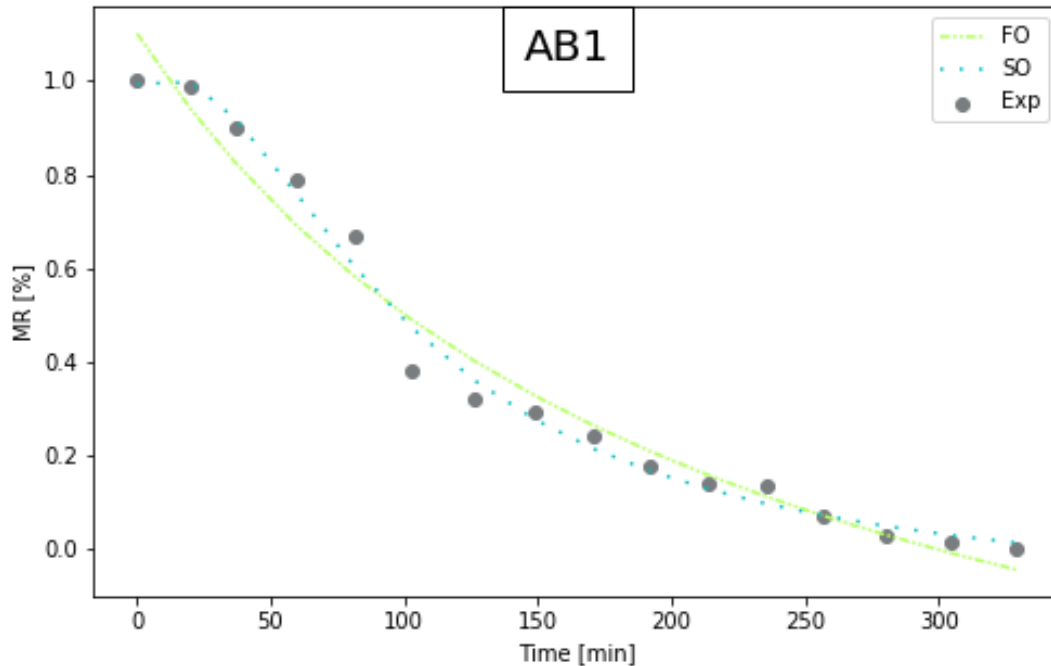


Figura 3.4: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB1.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.1105, para el método de SO el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0932. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.11854$ para FO y $N_{SO} = 0.06792$ para SO.

3.1.3. Serie ZR1

La serie ZR1 se recopiló a partir de los experimentos de secado solar directo; la especie utilizada en esta serie es zarzamora triturada, y se dejó secar con el sol radiando directamente, además se añadió un filtro UV-Azul. Esta serie está formada por 11 pares de datos con un intervalo de tiempo de secado de 0 a 480 minutos.

En la figura 3.5 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

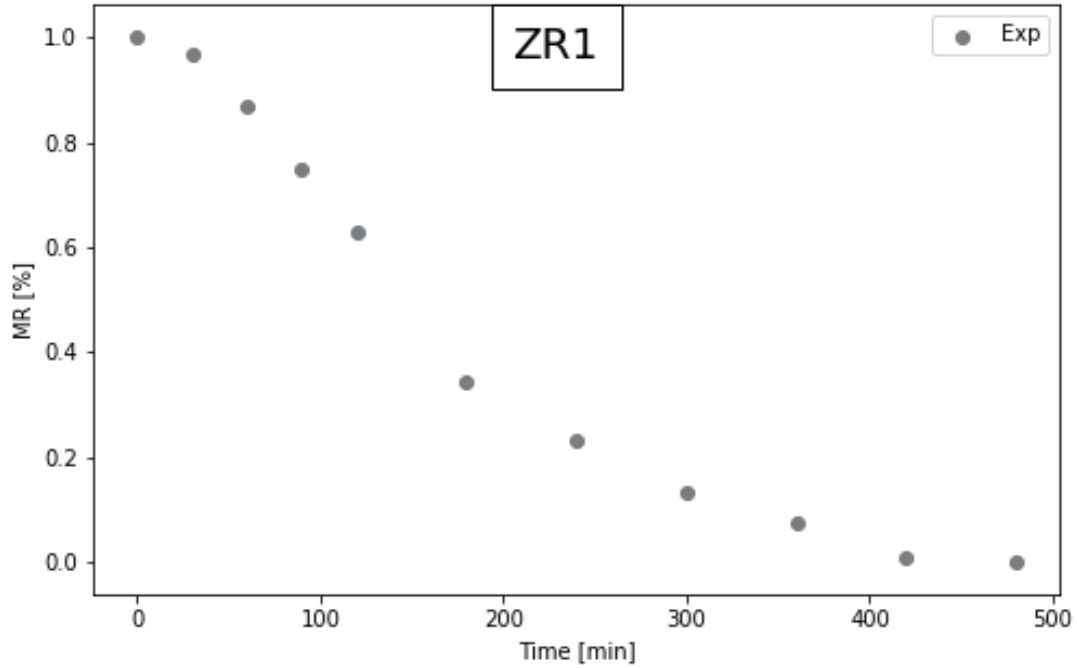


Figura 3.5: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR1.

La expresión matemática obtenida al aplicar el método RP para los modelos FO y SO se muestra en (eqs. 3.5 y 3.6) respectivamente.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.08228 - 0.00255535t}{1 + 0.00262667t} \quad (3.5)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.994804 - 0.000112429t - 4.27737 \times 10^{-6}t^2}{1 - 0.000701912t + 4.18089 \times 10^{-5}t^2} \quad (3.6)$$

La tabla 3.3 presenta los valores calculados en los modelos de FO y SO, así como los datos experimentales.

Tabla 3.3: Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie ZR1. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9791 para el modelo FO y 0.0.9987 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0823	0.0823	0.9948	0.0052
30	0.9691	0.9322	0.0369	0.9715	0.0024
60	0.8702	0.8025	0.0677	0.8775	0.0074
90	0.7470	0.6893	0.0577	0.7448	0.0022
120	0.6272	0.5897	0.0375	0.6059	0.0213
180	0.3438	0.4225	0.0787	0.3752	0.0314
240	0.2330	0.2877	0.0547	0.2227	0.0103
300	0.1322	0.1765	0.0444	0.1266	0.0056
360	0.0751	0.0834	0.0083	0.0649	0.0103
420	0.0090	0.0043	0.0047	0.0239	0.0149
480	0	-0.0638	0.0638	-0.0043	0.0043

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.6.

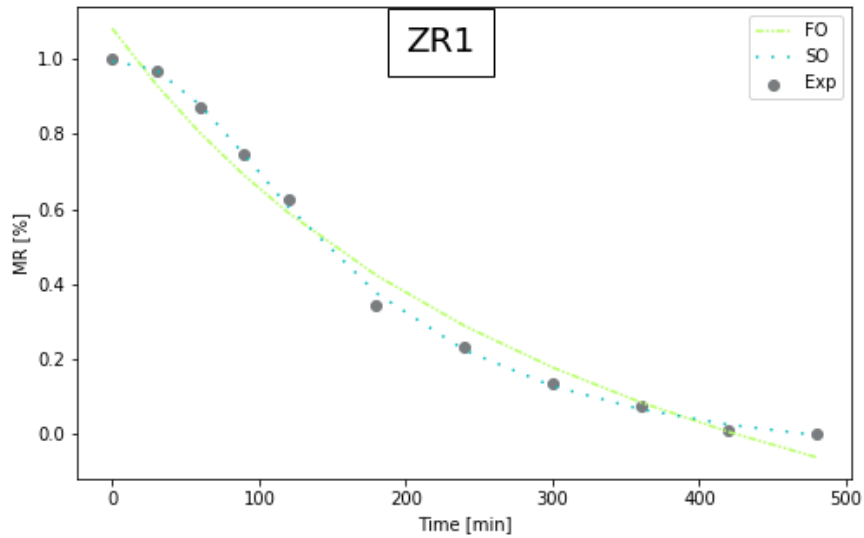


Figura 3.6: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR1.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.0823, para el método de SO el valor de diferencia

absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0314. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.09233$ para FO y $N_{SO} = 0.02287$ para SO.

3.1.4. Serie FR5

La serie FR5 se obtuvo a partir de los experimentos de secado solar de armario, donde se utilizó fresa cortada en rodajas (con un espesor de 2mm), se utilizó un revestimiento S-R. Esta serie está formada por 8 pares de datos con un tiempo de secado de 0 a 360 minutos.

En la figura 3.7 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

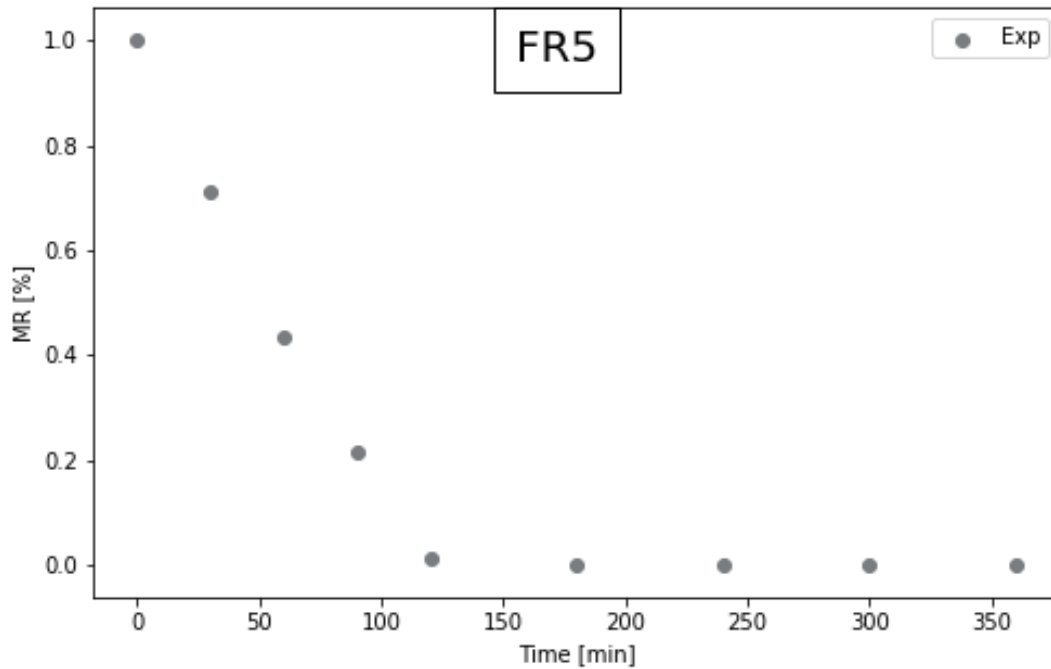


Figura 3.7: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR5.

La expresión matemática obtenida al aplicar el método RP para los modelos FO y SO se muestra en (eqs. 3.7 y 3.8) respectivamente.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.03862 - 0.0044078t}{1 + 0.001707t} \quad (3.7)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.994804 - 0.009703t - 2.107 \times 10^{-5}t^2}{1 - 0.003439t + 1.037 \times 10^{-4}t^2} \quad (3.8)$$

La tabla 3.4 presenta los valores calculados para cada modelo (FO y SO), así como los datos experimentales.

Tabla 3.4: Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie FR5. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9515 para el modelo FO y 0.9956 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0386	0.0386	0.9943	0.0057
30	0.7122	0.5994	0.1128	0.7293	0.0171
60	0.4350	0.3824	0.0526	0.4181	0.0168
90	0.2130	0.2531	0.0400	0.1906	0.0224
120	0.0122	0.1672	0.1550	0.0641	0.0519
180	0.0016	0.0602	0.0586	-0.0186	0.0202
240	0	-0.0038	0.0038	-0.0196	0.0196
300	0	-0.0463	0.0463	-0.0022	0.0022
360	0	-0.0767	0.0767	0.0176	0.0176

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.8.

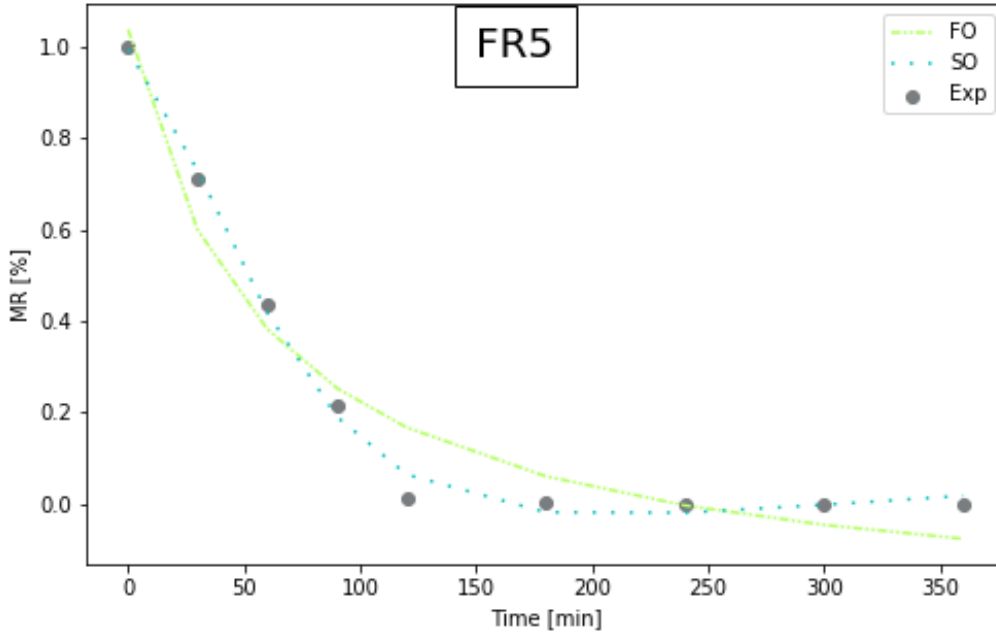


Figura 3.8: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR5.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.1550, para el método de SO el valor de diferencia

absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0519. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.1761$ para FO y $N_{SO} = 0.0531$ para SO.

3.1.5. Serie AJ2

La serie AJ2 se obtuvo a partir de los experimentos de secador de bucle convectivo, la especie que se utilizó fue ajo en rodajas, este experimento se realizó a una temperatura constante de 60°C. Esta serie está formada por 85 pares de datos con un intervalo de tiempo de secado de 0 a 420 minutos, con adquisición de datos cada 5 minutos.

En la figura 3.9 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

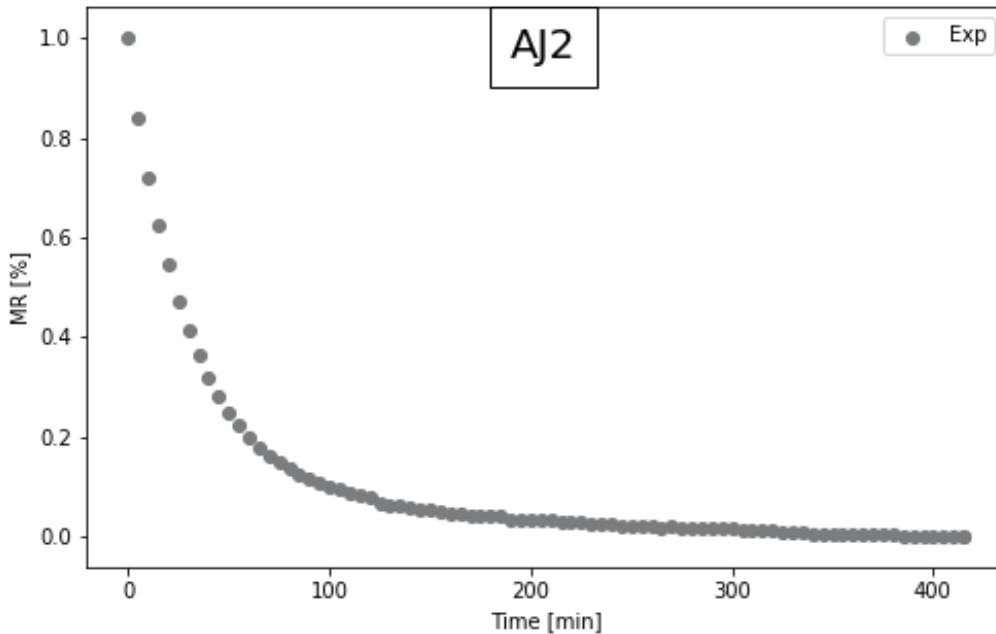


Figura 3.9: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ2.

La expresión matemática obtenida al aplicar el método RP para los modelos FO y SO se muestra en (eqs. 3.9 y 3.10) respectivamente.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.0541 - 0.003252t}{1 + 0.04896t} \quad (3.9)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.993042 + 0.001697t - 7.496 \times 10^{-6}t^2}{1 - 0.032089t + 6.562 \times 10^{-4}t^2} \quad (3.10)$$

La tabla 3.5 presenta los valores calculados para cada modelo (FO y SO), así como los datos experimentales.

Tabla 3.5: Resultados obtenidos aplicando los modelos FO y SO a la serie AJ2. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9919 para el modelo FO y 0.997 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.05041	0.05041	0.99304	0.00696
5	0.84150	0.83077	0.01073	0.85089	0.00939
10	0.72050	0.68332	0.03718	0.72795	0.00745
15	0.62250	0.57750	0.04500	0.62423	0.00173
20	0.54470	0.49785	0.04685	0.53776	0.00694
25	0.47260	0.43574	0.03686	0.46595	0.00665
30	0.41210	0.38595	0.02615	0.40625	0.00585
35	0.36310	0.34514	0.01796	0.35645	0.00665
40	0.31700	0.31108	0.00592	0.31468	0.00232
45	0.27950	0.28223	0.00273	0.27944	0.00006
50	0.24780	0.25748	0.00968	0.24952	0.00172
100	0.10090	0.12299	0.02209	0.10099	0.00009
150	0.05190	0.06742	0.01552	0.05243	0.00053
200	0.03460	0.03706	0.00246	0.03067	0.00393
250	0.02020	0.01793	0.00227	0.01896	0.00124
300	0.01440	0.00476	0.00964	0.01187	0.00253
350	0.00580	-0.00484	0.01064	0.00722	0.00142
400	0	-0.01217	0.01217	0.00398	0.00398

^a Debido a la extensa cantidad de datos experimentales, solo se presenta un extracto de datos.

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.10.

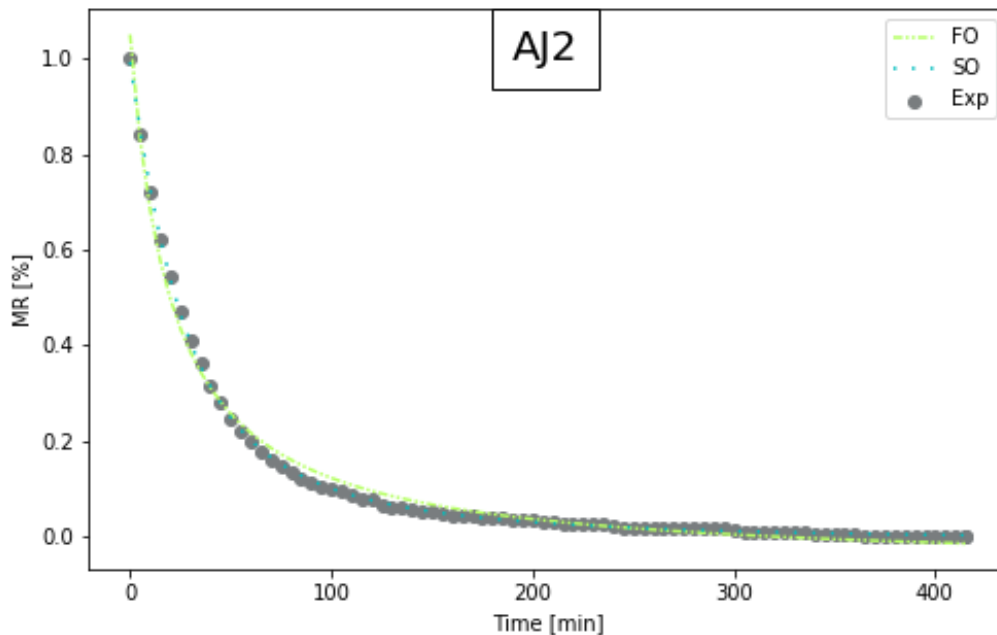


Figura 3.10: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AJ2.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.05041, para el método de SO el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.00939. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.0784$ para FO y $N_{SO} = 0.01565$ para SO.

3.1.6. Serie AB5

Esta serie proviene de los experimentos de secador de bucle convectivo, se utilizaron hojas de albahaca Nufar. La serie se compone de 15 pares de datos, el intervalo de tiempo de secado va de 0 a 329 minutos.

En la figura 3.11 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

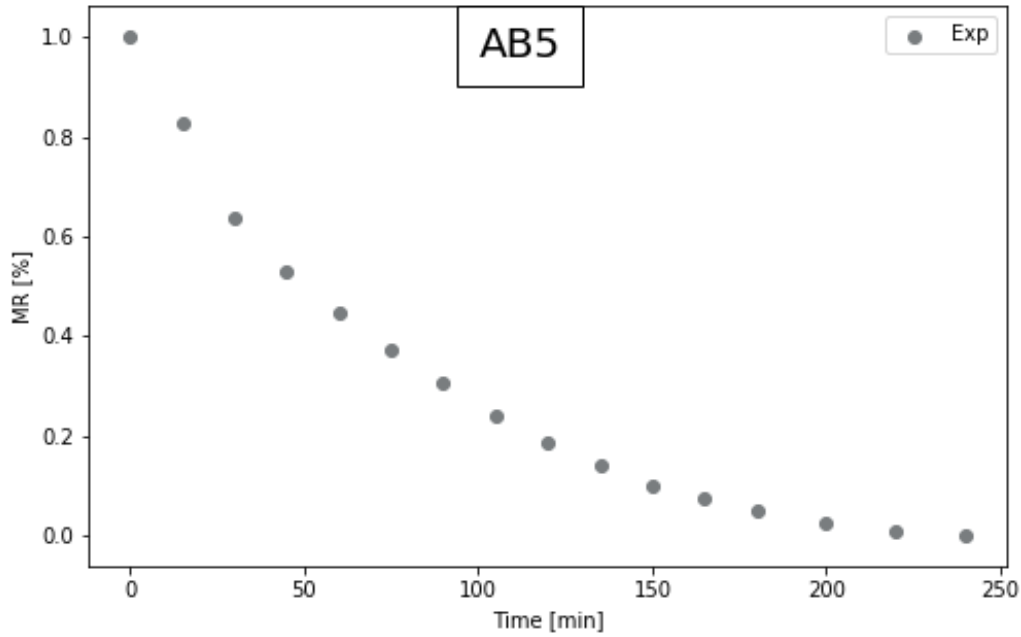


Figura 3.11: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB5.

El método FO y SO da como resultado las expresiones (eq. 3.11 y 3.12) después de aplicarlos a la serie AB5.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.01005 - 0.004619t}{1 + 0.01131t} \quad (3.11)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{1 - 15.8237t - 0.0716t^2}{1 - 15.1793t + 0.1896t^2} \quad (3.12)$$

En cuanto a los modelos FO (eq. 3.11) y SO 3.12, se aplicaron a la serie AB5; la tabla 3.6 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3.6: Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie AB5. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.998 para el modelo FO y 0.9983 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0101	0.0101	1.0000	4.21E-06
15	0.8257	0.8043	0.0215	0.8189	0.0068
30	0.6358	0.6506	0.0149	0.6558	0.0200
45	0.5281	0.5315	0.0034	0.5317	0.0036
60	0.4464	0.4365	0.0099	0.4342	0.0122
75	0.3723	0.3590	0.0133	0.3556	0.0167
90	0.3058	0.2944	0.0114	0.2909	0.0149
105	0.2394	0.2399	0.0006	0.2366	0.0027
120	0.1858	0.1933	0.0074	0.1905	0.0047
135	0.1411	0.1529	0.0117	0.1509	0.0097
150	0.0994	0.1176	0.0182	0.1164	0.0170
165	0.0735	0.0864	0.0129	0.0861	0.0126
180	0.0476	0.0588	0.0112	0.0593	0.0117
200	0.0241	0.0264	0.0023	0.0281	0.0040
220	0.0082	-0.0018	0.0100	0.0010	0.0072
240	0	-0.0266	0.0266	-0.0227	0.0227

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.12.

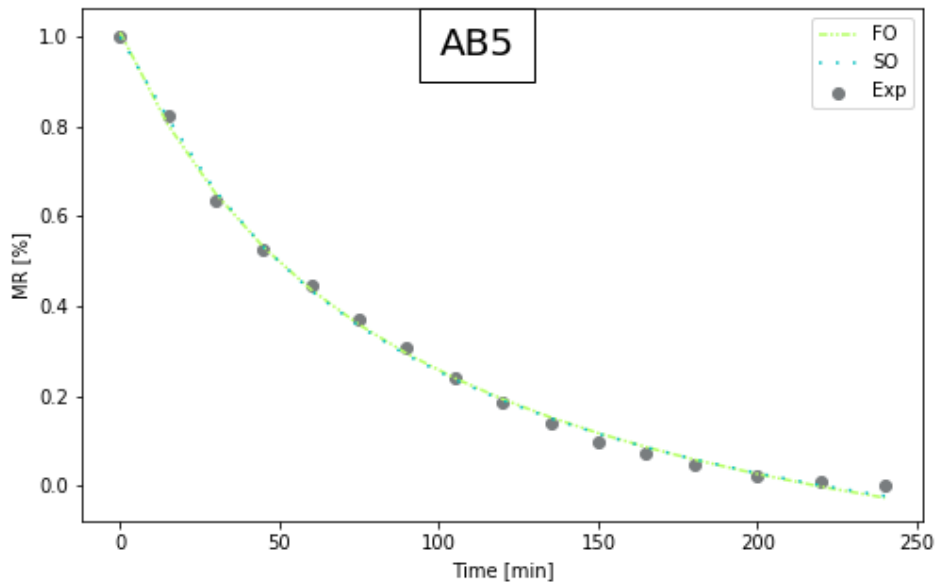


Figura 3.12: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB5.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.0266, para el método de SO el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0227. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.03106$ para FO y $N_{SO} = 0.02862$ para SO.

3.1.7. Serie ZR3

Esta serie se obtuvo de los experimentos de secador solar directo, en esta serie se utilizó como especie zarzamoras trituradas y se añadió un filtro UV-Azul. La serie se compone de 9 pares de datos, el intervalo de tiempo de secado va de 0 a 360 minutos.

En la figura 3.13 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

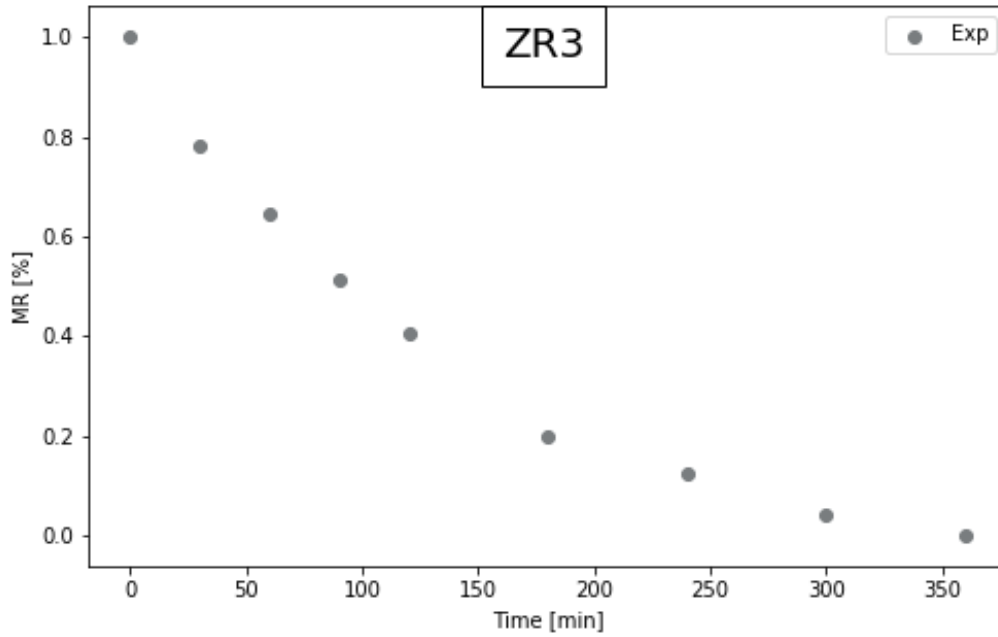


Figura 3.13: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR3.

El método FO y SO da como resultado las expresiones (eq. 3.13 y 3.14) después de aplicarlos a la serie ZR3.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.00437 - 0.00296t}{1 + 0.00532t} \quad (3.13)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.999983 + 10.6771t - 0.031341t^2}{1 - 10.4488t + 0.59449t^2} \quad (3.14)$$

Los resultados obtenidos después de aplicar los modelos de FO y SO para esta serie se muestran en la tabla 3.7

Tabla 3.7: Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie ZR3. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9968 para el modelo FO y 0.9969 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0044	0.0044	1.0000	1.710×10^{-05}
30	0.7798	0.7894	0.0096	0.7965	0.0167
60	0.6464	0.6265	0.0199	0.6281	0.0184
90	0.5130	0.4988	0.0143	0.4976	0.0154
120	0.4059	0.3960	0.0099	0.3936	0.0122
180	0.1979	0.2407	0.0428	0.2383	0.0404
240	0.1231	0.1289	0.0058	0.1278	0.0047
300	0.0420	0.0447	0.0027	0.0452	0.0032
360	0	-0.0211	0.0211	-0.0189	0.0189

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.14.

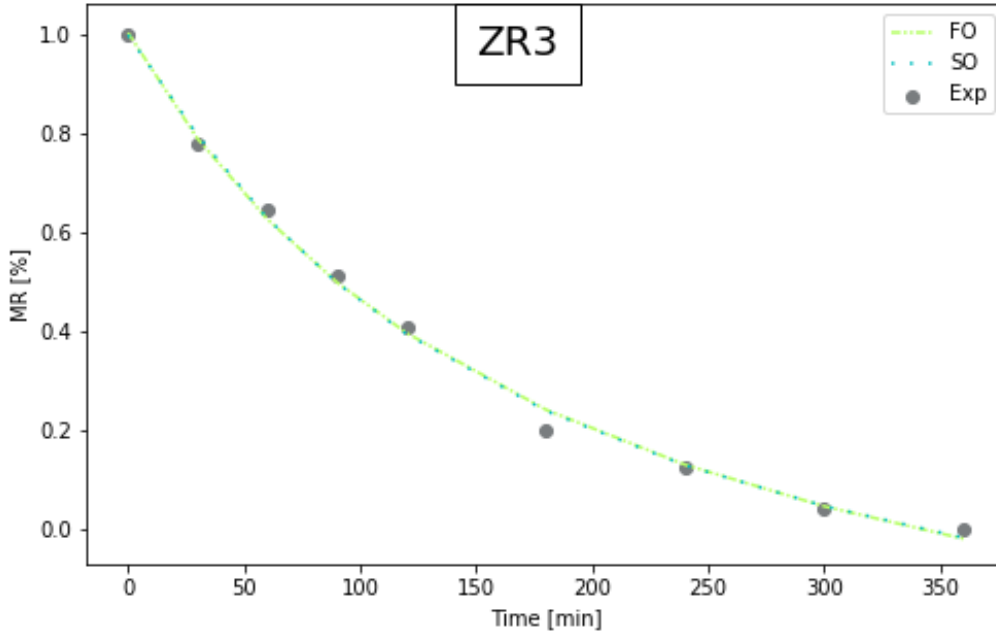


Figura 3.14: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR3.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.0428, para el método de SO el valor de diferencia

absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0404. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.03528$ para FO y $N_{SO} = 0.034723$ para SO.

3.1.8. Serie FR20

Esta serie se recopiló a partir de los experimentos de secado solar directo, se utilizaron fresas trituradas y se dejaron secar al sol radiando directamente. La serie se compone de 9 pares de datos, el intervalo de tiempo de secado va de 0 a 360 minutos.

En la figura 3.15 se pueden observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

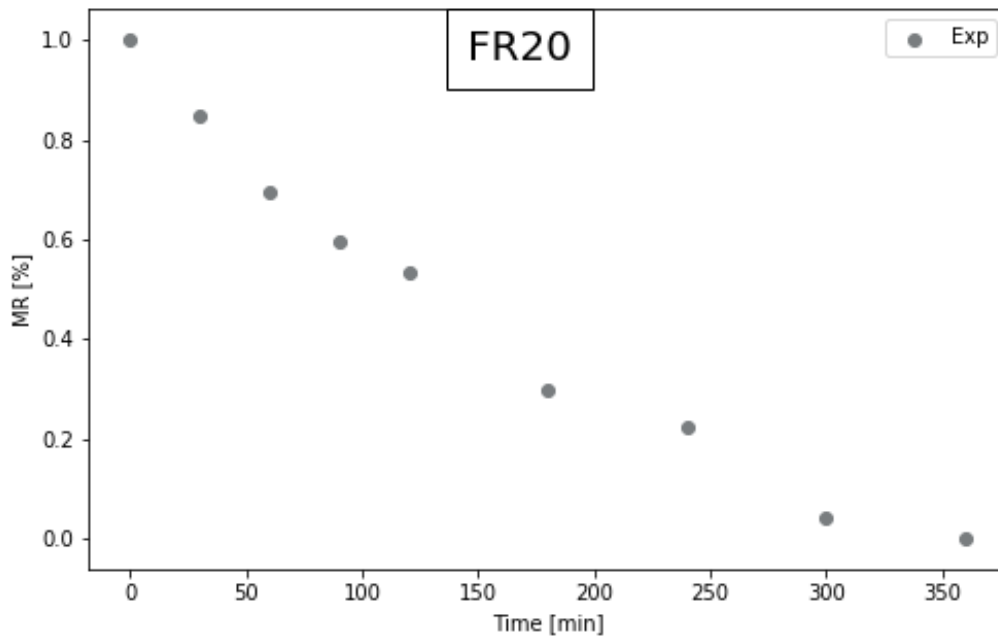


Figura 3.15: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR20.

El método FO y SO da como resultado las expresiones (eq. 3.15 y 3.16) después de aplicarlos a la serie FR20.

$$MR(t)_{FO} = \frac{0.998255 - 0.00286t}{1 + 0.0026t} \quad (3.15)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999 - 30.231t - 0.08687t^2}{1 - 30.4217t - 0.0772t^2} \quad (3.16)$$

En cuanto a los modelos FO (eq. 3.15) y SO 3.16, se reprodujo la serie FR20; la tabla 3.8 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3.8: Resultados obtenidos de los métodos FO y SO a la serie FR20. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de correlación al cuadrado de 0.9948 para el modelo FO y 0.9948 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	0.9983	0.0017	1.0000	6.6×10^{-7}
30	0.8489	0.8462	0.0028	0.8440	0.0050
60	0.6969	0.7147	0.0178	0.7139	0.0170
90	0.5970	0.5998	0.0028	0.5999	0.0029
120	0.5340	0.4986	0.0354	0.4992	0.0349
180	0.2976	0.3285	0.0309	0.3294	0.0317
240	0.2226	0.1911	0.0315	0.1917	0.0309
300	0.0408	0.0778	0.0370	0.0778	0.0370
360	0	-0.0172	0.0172	-0.0179	0.0179

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.16.

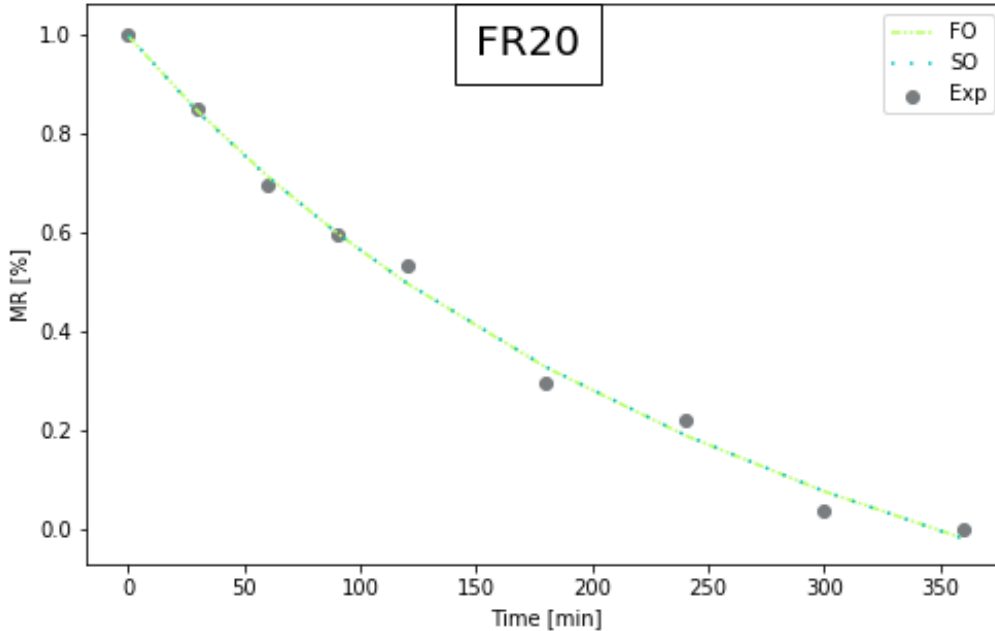


Figura 3.16: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR20.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.0370, para el método de SO el valor de diferencia

absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0370. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.04174$ para FO y $N_{SO} = 0.04169$ para SO.

3.1.9. Serie AB2

Esta serie se deriva del experimento del secador solar de invernadero, se utilizó como especie hojas de albahaca Nufar. Está constituido con 16 pares de datos y el intervalo de tiempo de secado va de 0 a 329 minutos.

En la figura 3.17 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

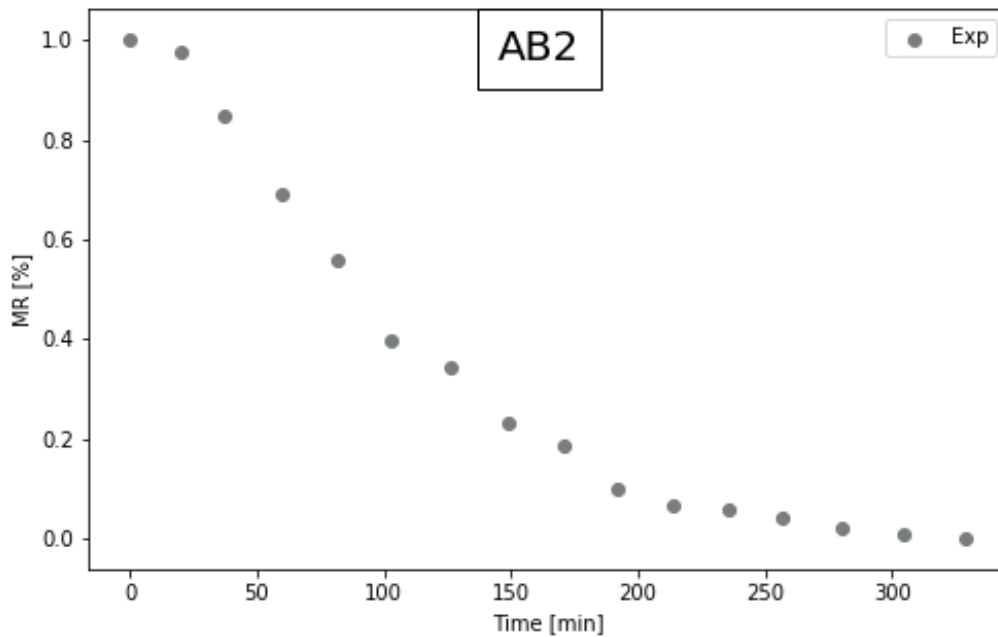


Figura 3.17: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB2.

Después de la aplicación del método RP para el primer y segundo orden se obtuvieron las expresiones (ecs. 3.17 y 3.18).

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.09175 - 0.0038t}{1 + 0.0057t} \quad (3.17)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999 - 6.3584 \times 10^7 t + 220852.9527 t^2}{1 - 4.9138 \times 10^7 t - 473626.1355 t^2} \quad (3.18)$$

Los resultados obtenidos después de implementar los modelos mostrados arriba (eqs. 3.17 y 3.18) se presentan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie AB2. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación 0.9803 para el modelo FO y 0.9930 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0917	0.0917	1.0000	7.45×10^{-09}
20	0.9745	0.9097	0.0648	1.0095	0.0350
37	0.8498	0.7821	0.0678	0.8313	0.0186
60	0.6892	0.6388	0.0503	0.6490	0.0402
82	0.5578	0.5259	0.0319	0.5169	0.0409
103	0.3964	0.4348	0.0384	0.4170	0.0206
126	0.3423	0.3497	0.0073	0.3286	0.0137
149	0.2327	0.2767	0.0439	0.2563	0.0235
171	0.1877	0.2159	0.0282	0.1984	0.0107
192	0.0991	0.1647	0.0656	0.1512	0.0521
214	0.0676	0.1171	0.0495	0.1085	0.0409
236	0.0571	0.0745	0.0174	0.0712	0.0142
257	0.0428	0.0379	0.0049	0.0399	0.0028
280	0.0195	0.0017	0.0178	0.0096	0.0099
305	0.0068	-0.0337	0.0404	-0.0195	0.0263
329	0	-0.0643	0.0643	-0.0443	0.0443

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.18.

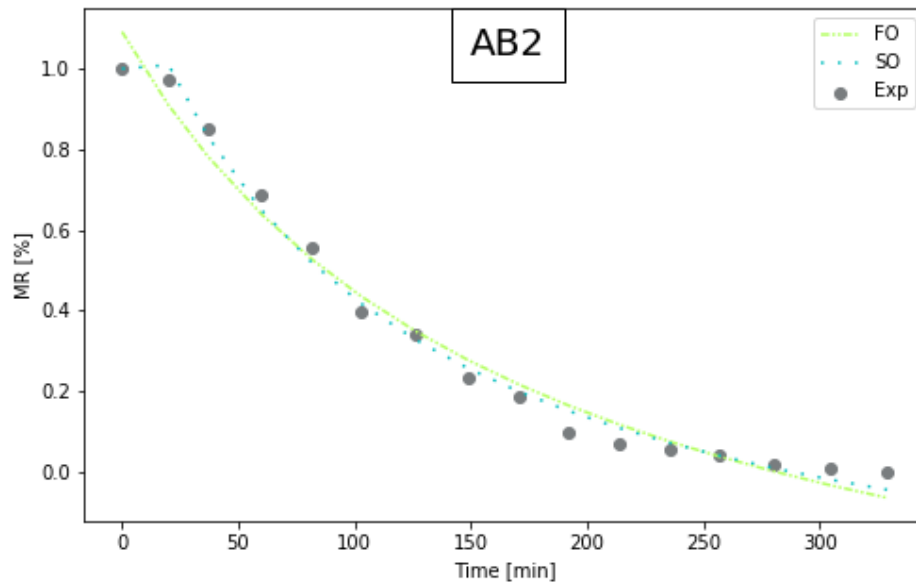


Figura 3.18: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie AB2.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue 0.0917, para el método de SO el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0521. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.09971$ para FO y $N_{SO} = 0.05925$ para SO.

3.1.10. Serie ZR4

La serie ZR4 se obtuvo a partir de los experimentos del secado solar directo, se utilizó zarzamora triturada y se dejó secando al sol directamente. Esta serie está formada por 9 pares de datos y el rango de tiempo de secado va de 0 a 480 minutos.

En la figura 3.19 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

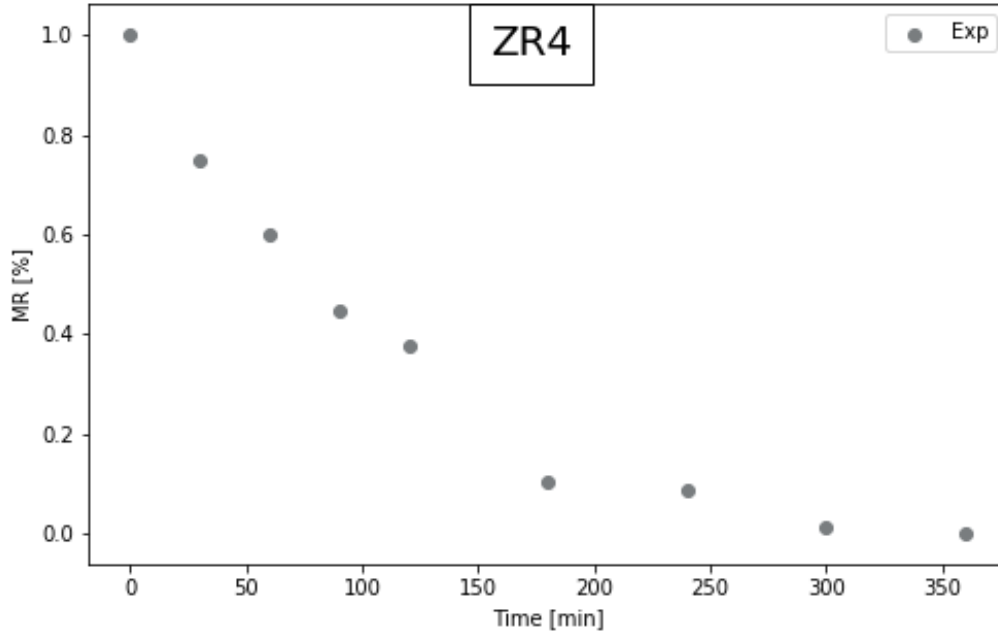


Figura 3.19: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR4.

Las ecuaciones obtenidas aplicando el método RP para el primer (FO) y segundo (SO) orden son (eqs. 3.19 y 3.20) respectivamente.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.00862 - 0.003181t}{1 + 0.00707t} \quad (3.19)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.995418 - 0.001224t - 5.519 \times 10^{-6}t^2}{1 + 0.006326t + 4.115 \times 10^{-5}t^2} \quad (3.20)$$

La tabla 3.10 muestra los resultados derivados de aplicar los modelos obtenidos anteriormente y aplicarlos a la serie ZR4.

Tabla 3.10: Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie ZR4. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9886 para el modelo FO y 0.9916 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0086	0.0086	0.9954	0.0046
30	0.7495	0.7534	0.0039	0.7774	0.0278
60	0.6009	0.5742	0.0267	0.5904	0.0105
90	0.4470	0.4414	0.0056	0.4417	0.0053
120	0.3765	0.3391	0.0373	0.3269	0.0495
180	0.1034	0.1918	0.0885	0.1716	0.0683
240	0.0871	0.0909	0.0038	0.0784	0.0088
300	0.0140	0.0174	0.0034	0.0198	0.0058
360	0	-0.0385	0.0385	-0.0188	0.0188

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.20.

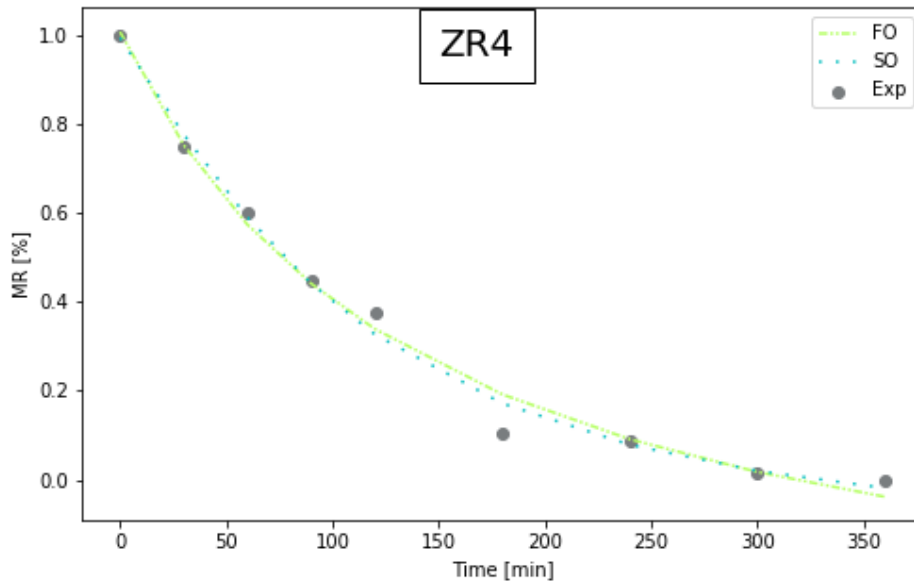


Figura 3.20: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie ZR4.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.0885, para el método de SO el valor de diferencia

absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.0683. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.07118$ para FO y $N_{SO} = 0.06106$ para SO.

3.1.11. Serie FR7

La serie FR7 se obtuvo de los experimentos del secador solar de armario, se utilizaron fresas cortadas en rodajas de 2 mm de espesor, las cuales fueron recubiertas con la solución FENO. Esta serie está formada por 9 pares de datos y consta de un tiempo de secado que va de 0 a 360 minutos.

En la figura 3.21 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

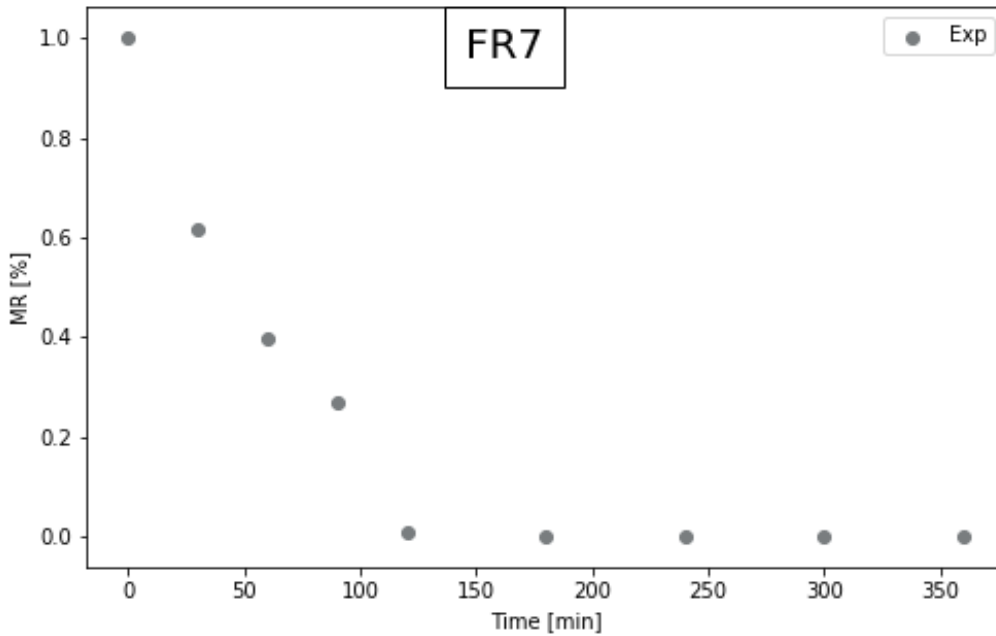


Figura 3.21: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR7.

Las ecuaciones obtenidas aplicando el método RP para el primer (FO) y segundo (SO) orden son (eqs. 3.21 y 3.22) respectivamente.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.0188 - 0.00422t}{1 + 0.0192t} \quad (3.21)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.9921 - 0.00881t + 1.777 \times 10^{-5}t^2}{1 - 0.00382t + 4.33676 \times 10^{-5}t^2} \quad (3.22)$$

La tabla 3.11 muestra los resultados derivados de aplicar el modelo obtenido anteriormente a la serie FR7.

Tabla 3.11: Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie FR7. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de detereminación de 0.9648 para el modelo FO y 0.9868 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0188	0.0188	0.9921	0.0079
30	0.6158	0.5659	0.0500	0.6446	0.0287
60	0.3958	0.3555	0.0403	0.3805	0.0153
90	0.2689	0.2340	0.0349	0.2021	0.0668
120	0.0070	0.1549	0.1480	0.0913	0.0843
180	0.0012	0.0581	0.0570	-0.0061	0.0072
240	0	0.0011	0.0011	-0.0226	0.0226
300	0	-0.0365	0.0365	-0.0087	0.0087
360	0	-0.0632	0.0632	0.0153	0.0153

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.22.

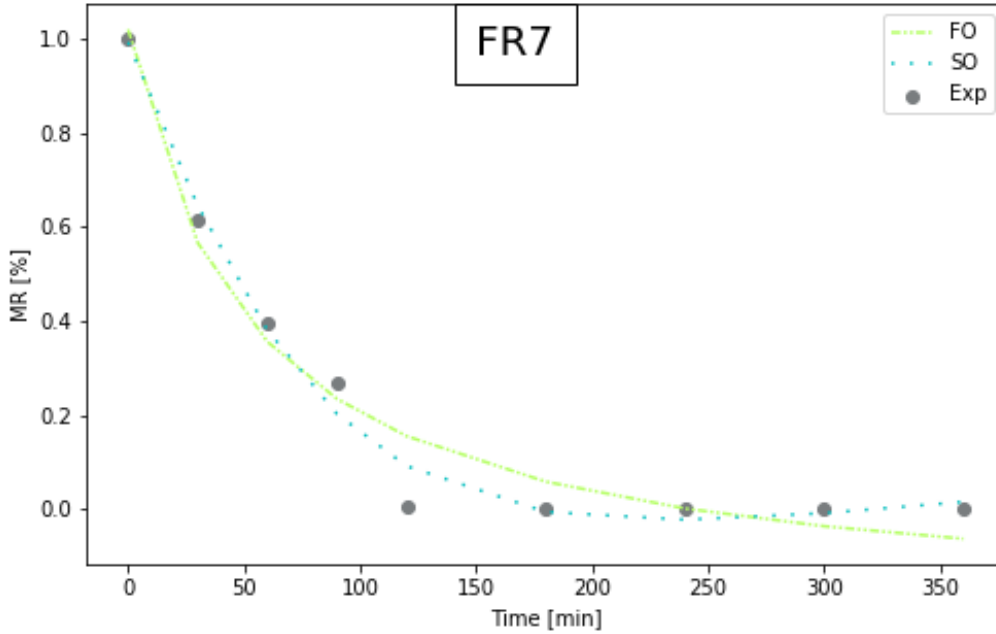


Figura 3.22: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR7.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.148, para el método de SO el valor de diferencia

absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0843. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.14993$ para FO y $N_{SO} = 0.09184$ para SO.

3.1.12. Serie FR12

La serie FR12 se recopiló de los experimentos de secado solar directo, se utilizaron fresas cortadas en rodajas con un espesor de 2mm, estas fueron recubiertas con la solución (M-N), esta serie está compuesta por 9 pares de datos experimentales en un tiempo que va de 0 a 360 minutos.

En la figura 3.23 se puede observar los datos experimentales del comportamiento de contenido de humedad.

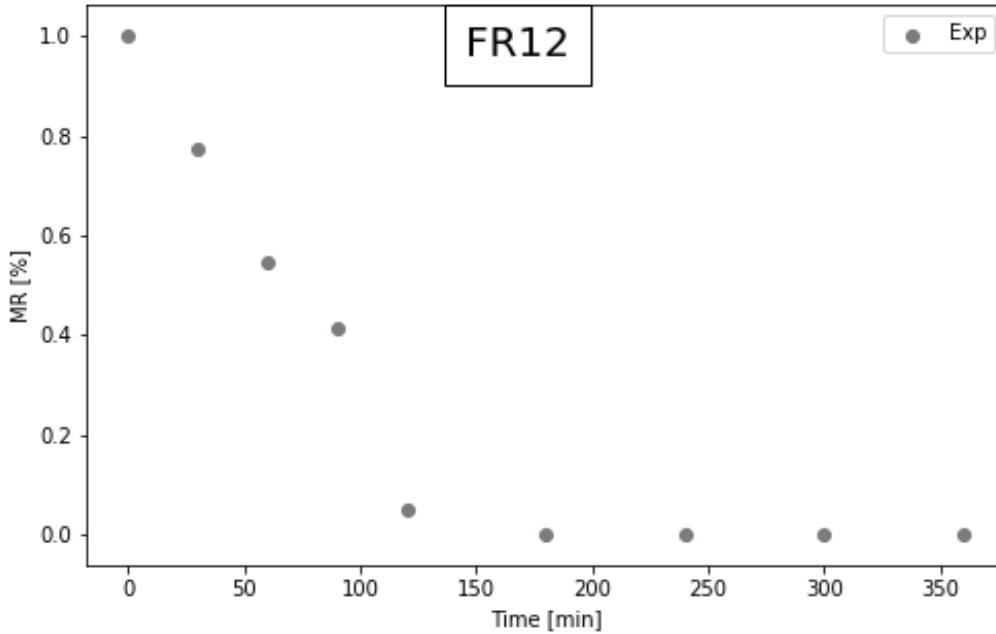


Figura 3.23: Comportamiento de los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR12.

Las expresiones (eq. 3.23 y 3.24) se obtuvieron después de aplicar el método RP para el primer (FO) y segundo (SO) orden.

$$MR(t)_{FO} = \frac{1.0476 - 0.00411t}{1 + 0.01118t} \quad (3.23)$$

$$MR(t)_{SO} = \frac{0.98442 - 0.00887638t + 1.82629 \times 10^{-5}t^2}{1 - 0.00454t + 5.622 \times 10^{-5}t^2} \quad (3.24)$$

La tabla 3.12 muestra los resultados derivados de cada modelo (FO y SO), así como el valor de la diferencia absoluta.

Tabla 3.12: Resultados de la aplicación de los métodos FO y SO a la serie FR12. El ajuste en este caso tiene un coeficiente de determinación de 0.9391 para el modelo FO y 0.9830 para el modelo SO.

Tiempo [min]	Contenido de humedad relativa [adimensional]				
	Experimental	Modelo de FO	VDA	Modelo de SO	VDA
0	1	1.0476	0.0476	0.9844	0.0156
30	0.7738	0.6920	0.0818	0.8034	0.0296
60	0.5463	0.4792	0.0671	0.5566	0.0103
90	0.4121	0.3376	0.0744	0.3186	0.0934
120	0.0497	0.2366	0.1869	0.1441	0.0944
180	0.0012	0.1021	0.1008	-0.0108	0.0120
240	0	0.0166	0.0166	-0.0298	0.0298
300	0	-0.0426	0.0426	-0.0074	0.0074
360	0	-0.0860	0.0860	0.0234	0.0234

La gráfica que representa el ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales se muestran en la figura 3.24.

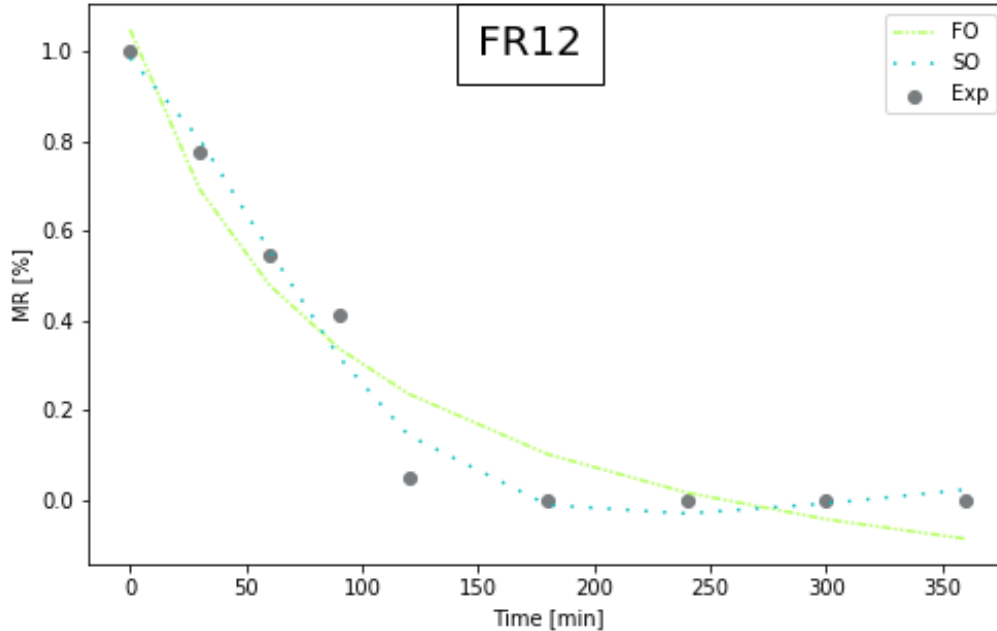


Figura 3.24: Ajuste de los modelos FO y SO a los datos experimentales del contenido de humedad para la serie FR12.

Aplicando el método de FO, el valor de diferencia absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de FO fue de 0.1869, para el método de SO el valor de diferencia

absoluta máxima entre los datos experimentales y el ajuste de SO fue de 0.0944. Se calculó el valor N para cada modelo, es igual a $N_{FO} = 0.18854$ para FO y $N_{SO} = 0.09954$ para SO.

Se eligieron estas doce series como una muestra representativa de las 39 series analizadas, ya que estas muestran diferentes casos de ajuste para el método de RP. Se presenta un buen ajuste en AJ1, AB1, ZR1 y FR5, un ajuste regular para AJ2, AB5, ZR3 y FR20 y un ajuste deficiente en AB2, ZR4, FR7 y FR12; sin embargo los modelos de primer y segundo orden, tanto las máximas del valor de la diferencia absoluta, así como el valor de la función de mérito para cada serie se puede visualizar en las tablas 3.13, 3.14, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20.

Tabla 3.13: Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series AJ1 a AJ6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de ajo.

	Modelo	Max VDA	N_{FO}
AJ1	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0835-0.0034t}{1+0.0491t}$	0.0836	0.1045
AJ2	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0504-0.0032t}{1+0.0489t}$	0.0504	0.0785
AJ3	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0556-0.0075t}{1+0.0494t}$	0.0557	0.0952
AJ4	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0448-0.00189t}{1+0.02199t}$	0.0448	0.0467
AJ5	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0404-0.0028t}{1+0.0231t}$	0.0405	0.0522
AJ6	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0664-0.0036t}{1+0.0256t}$	0.0665	0.0717

Tabla 3.14: Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series AJ1 a AJ6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de ajo.

	Modelo	Max VDA	N_{SO}
AJ1	$MR(t)_{SO} = \frac{1.00083+0.0036t-9.912 \times 10^{-6}t^2}{1+0.0243t+9.978 \times 10^{-4}t^2}$	0.0089	0.0140
AJ2	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9930+0.0017t-7.4963 \times 10^{-6}t^2}{1+0.0320t+6.5627 \times 10^{-4}t^2}$	0.0094	0.0157
AJ3	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9949-0.0083t+1.995 \times 10^{-5}t^2}{1+0.0205t+0.00071t^2}$	0.0078	0.0119
AJ4	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9932+0.0036t-7.617 \times 10^{-6}t^2}{1+0.0192t+1.997 \times 10^{-4}t^2}$	0.0068	0.0083
AJ5	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9908-0.00081t-3.0483 \times 10^{-6}t^2}{1+0.0167t+0.00014t^2}$	0.0094	0.0107
AJ6	$MR(t)_{SO} = \frac{1.0014-0.0026t-1.0003 \times 10^{-7}t^2}{1+0.0144t+0.00018t^2}$	0.0124	0.0100

Tabla 3.15: Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series AB1 a AB5. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de albahaca.

	Modelo	Max VDA	N_{FO}
AB1	$MR(t)_{FO} = \frac{1.10161-0.00369t}{1+0.00461t}$	0.1105	0.1185
AB2	$MR(t)_{FO} = \frac{1.09175-0.0038t}{1+0.0057t}$	0.0917	0.0997
AB3	$MR(t)_{FO} = \frac{1.094-0.0037t}{1+0.022t}$	0.0942	0.0846
AB4	$MR(t)_{FO} = \frac{0.972-0.00432t}{1+0.00861t}$	0.0506	0.0409
AB5	$MR(t)_{FO} = \frac{1.01005-0.004619t}{1+0.01131t}$	0.0266	0.0311

Tabla 3.16: Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series AB1 a AB5. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de albahaca.

	Modelo	Max VDA	N_{SO}
AB1	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9939+0.003691t-1.868 \times 10^{-5}t^2}{1+0.000411t+0.000137t^2}$	0.0932	0.0679
AB2	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999-6.3584 \times 10^7t+220852.9527t^2}{1-4.9138 \times 10^7t-473626.1355t^2}$	0.0521	0.0593
AB3	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9729+0.0096t-4.194 \times 10^{-5}t^2}{1+0.0056t+9.157 \times 10^{-5}t^2}$	0.0377	0.0361
AB4	$MR(t)_{SO} = \frac{1+1560.07t-7.0649t^2}{1+1709.33t+11.562t^2}$	0.0302	0.0295
AB5	$MR(t)_{SO} = \frac{1-15.8237t-0.0716t^2}{1-15.1793t+0.1896t^2}$	0.0227	0.0286

Tabla 3.17: Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series ZR1 a ZR6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de zarzamora.

	Modelo	Max VDA	N_{FO}
ZR1	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0822-0.00255t}{1+0.026t}$	0.0823	0.0923
ZR2	$MR(t)_{FO} = \frac{1.078-0.00279t}{1+0.00542t}$	0.1017	0.1233
ZR3	$MR(t)_{FO} = \frac{1.00437-0.00296t}{1+0.00532t}$	0.0428	0.0353
ZR4	$MR(t)_{FO} = \frac{1.00862-0.003181t}{1+0.00707t}$	0.0885	0.0712
ZR5	$MR(t)_{FO} = \frac{0.993-0.0033t}{1+0.00663t}$	0.0936	0.0817
ZR6	$MR(t)_{FO} = \frac{0.9993-0.0036t}{1+0.0141t}$	0.0746	0.0780

Tabla 3.18: Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series ZR1 a ZR6. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de zarzamora.

	Modelo	Max VDA	N_{SO}
ZR1	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9948-1.1248 \times 10^{-5}t-4.2773 \times 10^{-6}t^2}{1-7.019 \times 10^{-4}t+4.18 \times 10^{-5}t^2}$	0.0314	0.0229
ZR2	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9977-0.00392t+4.0998 \times 10^{-6}t^2}{1-0.00289t+4.854 \times 10^{-5}t^2}$	0.0221	0.0217
ZR3	$MR(t)_{SO} = \frac{0.999983+10.6771t-0.031341t^2}{1-10.4488t+0.59449t^2}$	0.0404	0.0347
ZR4	$MR(t)_{SO} = \frac{0.995418-0.001224t-5.519 \times 10^{-6}t^2}{1+0.006326t+4.115 \times 10^{-5}t^2}$	0.0683	0.0611
ZR5	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999+694.466t-2.3365t^2}{1+707.159t+4.503t^2}$	0.0953	0.0815
ZR6	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999+14.0217t+-0.0508t^2}{1+14.079t+0.197t^2}$	0.0748	0.0780

Tabla 3.19: Resultados de la aplicación de los métodos FO a las series FR1 a FR22. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de fresa.

	Modelo	Max VDA	N_{FO}
FR1	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0398-0.0031t}{1+0.00524t}$	0.0875	0.0756
FR2	$MR(t)_{FO} = \frac{1.064-0.00423t}{1+0.00485t}$	0.0843	0.0884
FR3	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0543-0.00511t}{1+0.0135t}$	0.0997	0.1244
FR4	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0632-0.00427t}{1+0.00469t}$	0.0966	0.0963
FR5	$MR(t)_{FO} = \frac{1.038-0.00441t}{1+0.0017t}$	0.1550	0.1762
FR6	$MR(t)_{FO} = \frac{1.029-0.00455t}{1+0.0223t}$	0.1256	0.1649
FR7	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0188-0.00422t}{1+0.0192t}$	0.1480	0.1499
FR8	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0448-0.0041t}{1+0.01144t}$	0.1570	0.1748
FR9	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0217-0.00439t}{1+0.0234t}$	0.0953	0.1308
FR10	$MR(t)_{FO} = \frac{1.028-0.003881t}{1+0.01229t}$	0.0907	0.1173
FR11	$MR(t)_{FO} = \frac{1.037-0.00437t}{1+0.01663t}$	0.1636	0.1754
FR12	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0476-0.00411t}{1+0.01118t}$	0.1869	0.1885
FR13	$MR(t)_{FO} = \frac{1.057-0.00423t}{1+0.01138t}$	0.1867	0.2090
FR14	$MR(t)_{FO} = \frac{1.069-0.003997t}{1+0.00795t}$	0.1471	0.1769
FR15	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0406-0.00387t}{1+0.00894t}$	0.1273	0.1491
FR16	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0422-0.0041t}{1+0.01294t}$	0.1122	0.1464
FR17	$MR(t)_{FO} = \frac{0.9948-0.00297t}{1+0.00547t}$	0.0436	0.0391
FR18	$MR(t)_{FO} = \frac{1.01154-0.003227t}{1+0.00738t}$	0.0492	0.0504
FR19	$MR(t)_{FO} = \frac{0.9788-0.002564t}{1+0.00276t}$	0.0622	0.0507
FR20	$MR(t)_{FO} = \frac{0.9982-0.0028t}{1+0.0026t}$	0.0370	0.0417
FR21	$MR(t)_{FO} = \frac{0.9513-0.00346t}{1+0.0115t}$	0.0815	0.0708
FR22	$MR(t)_{FO} = \frac{1.0208-0.0054t}{1+0.0181t}$	0.0641	0.0747

Tabla 3.20: Resultados de la aplicación de los métodos SO a las series FR1 a FR22. Se muestran los modelos, valores máximos de VDA, así como el valor de N en las series de fresa.

	Modelo	Max VDA	N_{SO}
FR1	$MR(t)_{SO} = \frac{0.991-0.00572t+8.099 \times 10^{-6}t^2}{1-8.11 \times 10^{-4}t+6.821 \times 10^{-6}t^2}$	0.0218	0.0203
FR2	$MR(t)_{SO} = \frac{0.995-0.00683t+1.162 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00345t+3.556 \times 10^{-5}t^2}$	0.0191	0.0143
FR3	$MR(t)_{SO} = \frac{1-1.484 \times 10^8t+715620t^2}{1-1.175 \times 10^8t-2.474 \times 10^6t^2}$	0.0997	0.1043
FR4	$MR(t)_{SO} = \frac{0.993-0.0077t+1.497 \times 10^{-5}t^2}{1-0.0041t+2.443 \times 10^{-5}t^2}$	0.0173	0.0155
FR5	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9942-0.0097t+2.11 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00343t+1.037 \times 10^{-4}t^2}$	0.0519	0.0531
FR6	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999-0.009512t+2.027 \times 10^{-5}t^2}{1-0.001851t+1.874 \times 10^{-4}t^2}$	0.0380	0.0436
FR7	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9921-0.00881t+1.777 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00382t+4.33676 \times 10^{-5}t^2}$	0.0843	0.0918
FR8	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9814-0.00883t+1.8177 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00467t+6.167 \times 10^{-5}t^2}$	0.0625	0.0708
FR9	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9996-0.00861t+1.721 \times 10^{-5}t^2}{1+0.00271t+1.575 \times 10^{-4}t^2}$	0.0180	0.0203
FR10	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9936-0.00764t+1.397 \times 10^{-5}t^2}{1+6.938 \times 10^{-4}t+3.6118 \times 10^{-5}t^2}$	0.0366	0.0418
FR11	$MR(t)_{SO} = \frac{1-1.14055 \times 10^8t+479787t^2}{1-3.962 \times 10^{-7}t-3.257 \times 10^6t^2}$	0.1236	0.1259
FR12	$MR(t)_{SO} = \frac{0.98442-0.00887638t+1.82629 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00454t+5.622 \times 10^{-5}t^2}$	0.0944	0.0995
FR13	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9738-0.00957t+2.111 \times 10^{-5}t^2}{1-0.008t+8.52 \times 10^{-5}t^2}$	0.0613	0.0805
FR14	$MR(t)_{SO} = \frac{0.987-0.0083t+1.636 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00653t+6.017 \times 10^{-5}t^2}$	0.0578	0.0571
FR15	$MR(t)_{SO} = \frac{0.982-0.00796t+1.515 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00311t+2.356 \times 10^{-5}t^2}$	0.0593	0.0628
FR16	$MR(t)_{SO} = \frac{1.00012-0.00825t+1.589 \times 10^{-5}t^2}{1-0.00158t+6.35 \times 10^{-5}t^2}$	0.0524	0.0523
FR17	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999+19.8283t-0.05956t^2}{1+20.372t+0.1027t^2}$	0.0422	0.0383
FR18	$MR(t)_{SO} = \frac{1-5.976 \times 10^6t+18852.6t^2}{1-5.5212 \times 10^6t+49805.5t^2}$	0.0427	0.0463
FR19	$MR(t)_{SO} = \frac{1.0093+0.0086t-3.161 \times 10^{-5}t^2}{1+0.01774t-9.115 \times 10^{-7}t^2}$	0.0394	0.0371
FR20	$MR(t)_{SO} = \frac{0.9999-30.231t-0.08687t^2}{1-30.4217t-0.0772t^2}$	0.0370	0.0417
FR21	$MR(t)_{SO} = \frac{1+553.794t-2.3139t^2}{1+700.96t+3.347t^2}$	0.0190	0.0174
FR22	$MR(t)_{SO} = \frac{0.993-0.01017t+2.553 \times 10^{-5}t^2}{1+0.00619t+3.051 \times 10^{-5}t^2}$	0.0226	0.0282

3.2. Comparación entre métodos y datos experimentales

Para hacer una comparación entre los métodos de Lewis, Page, Henderson y Pabis, Logarítmico, Two-term, Two-term exponencial, Midilli y Kucuck, y Wang y Singh, así como los métodos propuestos de FO y SO y los datos experimentales, se utilizó la función de Mérito (ver sección 2.4).

Al resolver la ecuación de la función de mérito (eq. 2.1) para cada método aplicado a cada serie de datos, se obtienen los valores de función de mérito mostrados en la tablas de ajo (tb: 3.21), albahaca (tb: 3.22), zarzamora (tb: 3.23) y fresa (tb: 3.24).

Una vez obtenidos los valores de la función de mérito para cada método aplicado a todas series, se obtuvo el valor de la mediana de todos los valores de la función de mérito (N_m).

$$N_m = 0.073827$$

Tabla 3.21: Valores de función de mérito para cada método en las series de ajo.

Método/Serie	HP	Log	MK	L	FO	SO	TT	TTE	WS	P
AJ1	0.0866	0.0538	0.0699	0.0879	0.1045	0.0140	0.0196	0.0247	0.7852	0.0701
AJ2	0.0964	0.0660	0.0819	0.1083	0.0785	0.0157	0.0130	0.0138	0.8251	0.0531
AJ3	0.0233	0.0185	0.0193	0.0236	0.0952	0.0119	0.0229	0.0198	0.3686	0.0236
AJ4	0.0959	0.0645	0.0772	0.1162	0.0467	0.0083	0.0094	0.0098	0.8073	0.0420
AJ5	0.0562	0.0390	0.0452	0.0705	0.0522	0.0107	0.0123	0.0129	0.4255	0.0230
AJ6	0.0318	0.0231	0.0264	0.0332	0.0717	0.0100	0.0318	0.0140	0.3827	0.0228

^a El color rojo indica aquellos métodos cuyo valor de N está por encima de N_m .

^b El color azul indica aquellos valores de N más cercanos a cero para esa serie.

En la tabla 3.21 se observa todas las funciones de mérito para cada método en las series de ajo. En el caso del método HP, solamente las series AJ3, AJ5 Y AJ6 se encuentran por debajo de N_m , indicando que estas tienen un buen ajuste, en las series AJ1, AJ2 y AJ4 el valor de N está por encima de N_m , lo cual indica un ajuste deficiente.

En el caso del método Log, este, tuvo un buen ajuste en todas las series de ajo; sin embargo no fue el mejor ajuste en ninguna de ellas.

El método MK presentó un buen ajuste en las series AJ1, AJ3, AJ5 y AJ6; ya que sus respectivos valores de N se encuentran por debajo de N_m , es las series AJ2 y AJ4 el valor de N se encuentra por encima de N_m indicando un ajuste deficiente.

El método de L tuvo un buen ajuste para las series AJ3, AJ5 y AJ6; puesto que su respectivo valor de N se encuentra por debajo de N_m .

El método TT presentó un buen ajuste en todas las series correspondientes de ajo, así como en AJ2 fue el método que mejor ajuste presentó, siendo que su valor correspondiente de $N_{TT_{AJ2}} = 0.01303$ fue el más cercano a cero.

El método TTE presentó un caso similar al de TT, puesto que en todas las series se obtuvo una buen ajuste, sin embargo en ninguna de las series de ajo fue el mejor ajuste.

El método de WS fue el que presentó el ajuste más deficiente en todas las series de ajo, ya que no ajustó a ninguna de ellas.

En el caso del método P, este, tuvo un buen ajuste en todas las series de ajo; sin embargo no fue el mejor ajuste en ninguna de ellas.

Para el caso del método RP para FO se observa que en las series de AJ4, AJ5 y AJ6, este presentó un buen ajuste, cuyos valores de N se encuentran por debajo de N_m ; para las series de AJ1, AJ2 y AJ3, este método tuvo un ajuste deficiente, puesto que los valores de N de estas series, se encuentran por encima de N_m .

Por otro lado, para SO se nota que todos los valores de N están debajo de N_m , y para todas las series de ajo (a excepción de AJ2), este modelo presentó el mejor ajuste.

Tabla 3.22: Valores de función de mérito para cada método en las series de albahaca.

Método/Serie	HP	Log	MK	L	FO	SO	TT	TTE	WS	P
AB1	0.1358	0.1099	0.1119	0.1687	0.1185	0.0679	0.0726	0.0726	0.1196	No es aplicable
AB2	0.1176	0.0822	0.0864	0.1494	0.0997	0.0593	0.0322	0.0322	0.0790	0.0351
AB3	0.1492	0.0802	0.0833	0.1869	0.0846	0.0361	0.0519	0.0522	0.0983	No es aplicable
AB4	0.0731	0.0453	0.0446	0.0740	0.0409	0.0295	0.0721	0.0700	0.0972	0.2282
AB5	0.0518	0.0281	0.0277	0.0526	0.0311	0.0286	0.0435	0.0439	0.0910	0.2222

En la tabla 3.22 se observa todas las funciones de mérito para cada método en las series de albahaca Nufar.

Para el método HP, solamente las series AB4 y AB5 se encuentran por debajo de N_m , indicando que estas tienen un buen ajuste, en las series AB1, AB2 y AB3 el valor de N está por encima de N_m , lo cual indica un ajuste deficiente.

En el caso del método Log, se presenta un caso similar al de HP, donde, solamente se tiene un buen ajuste en las series AB4 y AB5, y un ajuste deficiente en AB1, AB2 y AB3.

El método de MK presentó un buen ajuste en las series AB4 y AB5; ya que sus respectivos valores de N se encuentran por debajo de N_m , además de que en AB5, este método presenta el mejor ajuste de entre todos los métodos con un valor de $N_{MK_{AB5}} = 0.0277$, el cual fue el más cercano a cero para esa serie. En AB1, AB2 y AB3 se presenta un ajuste deficiente.

El método L tuvo un buen ajuste para la serie de AB5 solamente; puesto que su respectivo valor de N se encuentra por debajo de N_m , para AB1, AB2, AB3 y AB4, el valor de N está por encima de N_m , indicando un mal ajuste.

El método TT presentó un buen ajuste en todas las series correspondientes de albahaca, así como en AB2 fue el método que mejor ajuste presentó, siendo que su valor correspondiente de $N_{TT_{AB2}} = 0.0322$ fue el más cercano a cero.

El método TTE presentó un caso similar al de TT, puesto que en todas las series se obtuvo un buen ajuste, sin embargo en ninguna de las series de albahaca fue el mejor ajuste.

El método de WS fue el que presentó el ajuste más deficiente en todas las series de albahaca, ya que no ajustó a ninguna de ellas.

En el caso del método P, este, tuvo un buen ajuste solamente en AB2, para AB1 y AB3 el método no fue aplicable y para AB4 y AB5 se tuvo un ajuste deficiente.

En el método RP para FO se observa que en las series de AB4 y AB5, este presentó un buen ajuste, cuyos valores de N se encuentran por debajo de N_m ; para las series de AB1,

AB2 y AB3, este método tuvo un ajuste deficiente, puesto que los valores de N de estas series, se encuentran por encima de N_m .

Por otro lado, en el modelo SO se nota que todos los valores de N están debajo de N_m , y para todas las series de ajo (a excepción de AB2 y AB5), este modelo presentó el mejor ajuste.

Tabla 3.23: Valores de función de mérito para cada método en las series de zarzamora.

Método/Serie	HP	Log	MK	L	FO	SO	TT	TTE	WS	P
ZR1	0.1224	0.0830	0.0865	0.1528	0.0923	0.0229	0.0764	0.0288	0.0888	No es aplicable
ZR2	0.1174	0.0980	0.1022	0.1395	0.1233	0.0217	0.0261	0.0255	0.0858	No es aplicable
ZR3	0.0589	0.0266	0.0281	0.0609	0.0353	0.0347	0.0549	0.0385	0.0489	0.0417
ZR4	0.0775	0.0596	0.0613	0.0788	0.0712	0.0611	0.0618	0.0625	0.0767	0.0648
ZR5	0.0905	0.0699	0.0729	0.0906	0.0817	0.0815	0.0721	0.0769	0.0705	0.0810
ZR6	0.0616	0.0566	0.0580	0.0631	0.0780	0.0780	0.0592	0.0592	0.1719	0.0631

En la tabla 3.23 se observa todas las funciones de mérito para cada método en las series de zarzamora.

Para el método de HP, solamente las series ZR3 y ZR6 se encuentran por debajo de N_m , indicando que estas tienen un buen ajuste, en las series ZR1, ZR2, ZR4 y ZR5 el valor de N está por encima de N_m , lo cual indica un ajuste deficiente.

En el caso del método Log, este tuvo un buen ajuste en las series de ZR3, ZR4, ZR5 y ZR6, además de que en todas estas el método L fue el de mejor ajuste, ya que sus valores respectivos de N son los más cercanos a cero. Las series ZR1 y ZR2 presentaron un ajuste deficiente.

El método de MK presentó un buen ajuste en las series ZR3, ZR4, ZR5 y ZR6; ya que sus respectivos valores de N se encuentran por debajo de N_m . En ZR1 y ZR2 se presenta un ajuste deficiente.

El método L tuvo un buen ajuste para las series ZR3 y ZR6 solamente, puesto que su respectivo valor de N se encuentra por debajo de N_m , para ZR1, ZR2, ZR4 y ZR5 el valor de N está por encima de N_m , indicando un mal ajuste.

El método TT presentó un buen ajuste en la mayoría las series correspondientes de zarzamora, solamente presentó un ajuste deficiente en ZR1.

El método TTE presentó un caso similar al de TT, puesto que obtuvo un buen ajuste en la mayoría de las series correspondientes de zarzamora, solamente presentó un ajuste deficiente en ZR5.

El método WS muestra que se tuvo un buen ajuste en las series ZR3 y ZR5, puesto que su respectivo valor de N se encuentra por debajo de N_m , las series ZR1, ZR2, ZR4 y ZR6 presentan un ajuste deficiente ya que N está por encima de N_m .

En el caso del método P, este, tuvo un buen ajuste en ZR3, ZR4 y ZR5; el método no fue aplicable en ZR1 y ZR2, y para ZR5 se tuvo un ajuste deficiente.

En el método RP para FO se observa que en las series de ZR3 y ZR4, este presentó un buen ajuste, cuyos valores de N se encuentran por debajo de N_m ; para las series de ZR1, ZR2, ZR5 y ZR6, este método tuvo un ajuste deficiente, puesto que los valores de N de estas series, se encuentran por encima de N_m .

Por otro lado, en el modelo SO se nota que tuvo un buen ajuste en las series ZR1, ZR2, ZR3 Y ZR4; además en las dos primeras series mencionadas (ZR1 y ZR2), este método fue el mejor ajuste. En las series ZR5 y ZR6 este método tuvo un ajuste deficiente, puesto que los valores de N de estas series, se encuentran por encima de N_m .

Tabla 3.24: Valores de función de mérito para cada método en las series de fresa.

Método/Serie	HP	Log	MK	L	FO	SO	TT	TTE	WS	P
FR1	0.0873	0.0583	0.0628	0.0978	0.0756	0.0203	0.0467	0.0480	0.0271	0.0459
FR2	0.1116	0.0763	0.0808	0.1328	0.0884	0.0143	0.0381	0.0394	0.0661	0.0255
FR3	0.1013	0.0837	0.0901	0.1119	0.1244	0.1043	0.0453	0.0460	0.0970	0.0398
FR4	0.1211	0.0848	0.0895	0.1412	0.0963	0.0155	0.0527	0.0540	0.0735	0.0379
FR5	0.1326	0.1223	0.1275	0.1385	0.1762	0.0531	0.0846	0.0676	0.2144	0.0570
FR6	0.1081	0.1005	0.1049	0.1122	0.1649	0.0436	0.0520	0.0458	0.2858	0.0433
FR7	0.1153	0.1082	0.1115	0.1162	0.1499	0.0918	0.1088	0.1004	0.2424	0.1005
FR8	0.1528	0.1382	0.1435	0.1599	0.1748	0.0708	0.0959	0.0961	0.1407	0.0818
FR9	0.0688	0.0620	0.0658	0.0715	0.1308	0.0203	0.0217	0.0216	0.2924	0.0202
FR10	0.0921	0.0774	0.0821	0.0962	0.1173	0.0418	0.0543	0.0545	0.1243	0.0524
FR11	0.1348	0.1243	0.1294	0.1401	0.1754	0.1259	0.0795	0.0795	0.2080	0.0708
FR12	0.1694	0.1556	0.1604	0.1764	0.1885	0.0995	0.1192	0.1193	0.1533	0.1081
FR13	0.1864	0.1728	0.1780	0.1957	0.2090	0.0805	0.0467	0.1146	0.1699	0.0865
FR14	0.1703	0.1496	0.1551	0.1848	0.1769	0.0571	0.1177	0.0868	0.1300	No es aplicable
FR15	0.1408	0.1203	0.1258	0.1476	0.1491	0.0628	0.0910	0.0913	0.0956	0.0810
FR16	0.1167	0.1033	0.1083	0.1239	0.1464	0.0523	0.0736	0.0606	0.1415	0.0558
FR17	0.0667	0.0367	0.0372	0.0670	0.0391	0.0383	0.0366	0.0546	0.0639	0.0581
FR18	0.0593	0.0325	0.0355	0.0612	0.0504	0.0463	0.0392	0.0397	0.0623	0.0424
FR19	0.0821	0.0551	0.0533	0.0824	0.0507	0.0371	0.0748	0.0439	0.2340	0.0780
FR20	0.0927	0.0416	0.0417	0.0973	0.0417	0.0417	0.0674	0.0680	0.0454	No es aplicable
FR21	0.0878	0.0872	0.0864	0.1051	0.0708	0.0174	0.0535	0.0535	0.1635	0.3056
FR22	0.0502	0.0406	0.0436	0.0516	0.0747	0.0282	0.0463	0.0349	0.1194	0.3945

^a El color **amarillo** indica aquellos métodos cuyo valor de N está por encima de N_m , que sin embargo fueron los más próximos al valor de N_m para esa serie.

En la tabla 3.24 se observa todas las funciones de mérito para cada método en las series de fresa.

Para el método HP, solamente las series FR9, FR17, FR18 y FR22 se encuentran por debajo de N_m , indicando que estas tienen un buen ajuste, en las series restantes de fresa el valor de N está por encima de N_m , lo cual indica un ajuste deficiente.

En el caso del método Log, este tuvo un buen ajuste en las series de FR9, FR17, FR18, FR19, FR20 y FR22; además de que en FR20 este método presentó el mejor ajuste, ya que su valor de $N_{Log_{FR20}} = 0.0416$ es el más cercano a cero. Las series restantes de fresa presentaron un ajuste deficiente, ya que sus valores de N están por encima de N_m , indicando un mal ajuste.

El método MK presentó un caso similar al de Log, notando un buen ajuste en las series de FR9, FR17, FR18, FR19, FR20 y FR22; en las series restantes de fresa, este método presentó un ajuste deficiente.

El método L tuvo un buen ajuste para las series FR9, FR17, FR18 y FR22 solamente, puesto que su respectivo valor de N se encuentra por debajo de N_m , para las series restantes los valor de N están por encima de N_m , indicando un mal ajuste.

El método TT presentó un buen ajuste en las series FR1, FR2, FR3, FR4, FR6, FR9,

FR10, FR13, FR16, FR17, FR18, FR20, FR21 y FR22; también cabe destacar que en las series FR13, FR16 y FR17 este método fue el que mejor ajuste presentó, ya que sus valores de N fueron los más cercanos a cero de entre todos los métodos. Las series restantes de fresa para este método presentaron un ajuste deficiente.

El método TTE presentó un buen ajuste en la mayoría las series correspondientes de fresa (FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR9, FR10, FR16, FR17, FR18, FR19, FR20, FR21 y FR22), en las series restantes de fresa para este método se presentó un ajuste deficiente.

El método WS muestra que solo se tuvo un buen ajuste en las series FR1, FR2, FR4, FR17, FR18, FR19 y FR20; puesto que su respectivo valor de N se encuentra por debajo de N_m , las series restantes presentan un ajuste deficiente ya que N está por encima de N_m .

En el caso del método P, este, tuvo un buen ajuste en la mayoría de las series de fresa (FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR9, FR10, FR11, FR16, FR17, FR18); además en FR3, FR6, FR9 y FR11 este método fue el mejor ajuste entre todos los métodos analizados. El método no fue aplicable en FR14 y FR20; las series FR7, FR8, FR12, FR13, FR15, FR19, FR21 y FR22 este método presenta un ajuste deficiente.

En el método RP para FO se observa que en solamente en las series FR17, FR18, FR19, FR20 y FR21, este presentó un buen ajuste, cuyos valores de N se encuentran por debajo de N_m ; para las series restantes de fresa, este método tuvo un ajuste deficiente, puesto que los valores de N de estas series, se encuentran por encima de N_m .

Por otro lado, en el modelo SO se nota que tuvo un buen ajuste en la mayoría de las series (FR1, FR2, FR, FR4, FR5, FR6, FR8, FR9, FR10, FR14, FR15, FR16, FR17, FR18, FR19, FR20, FR21 y FR22); además en las series de FR1, FR2, FR4, FR5, FR8, FR10, FR14, FR15, FR16, FR19, FR21 y FR22; este método fue el mejor ajuste. Cabe destacar que en las series de FR7 y FR12, ninguna de las series tuvo un buen ajuste, ya que los valores de N de estas series, se encuentran por encima de N_m ; sin embargo el método SO fue quien más se acerca al valor de N_m . En las series FR3, FR11 y FR13 este método tuvo un ajuste deficiente.

A continuación se muestran las gráficas (figs. 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.34, 3.35 y 3.36) del ajuste de todos los métodos aplicados en las 12 series descritas a detalle en las sección 3.1, cabe mencionar que para algunas series (AB1, AB3, ZR1, ZR2, FR14 y FR20) el método de Page no fue aplicable.

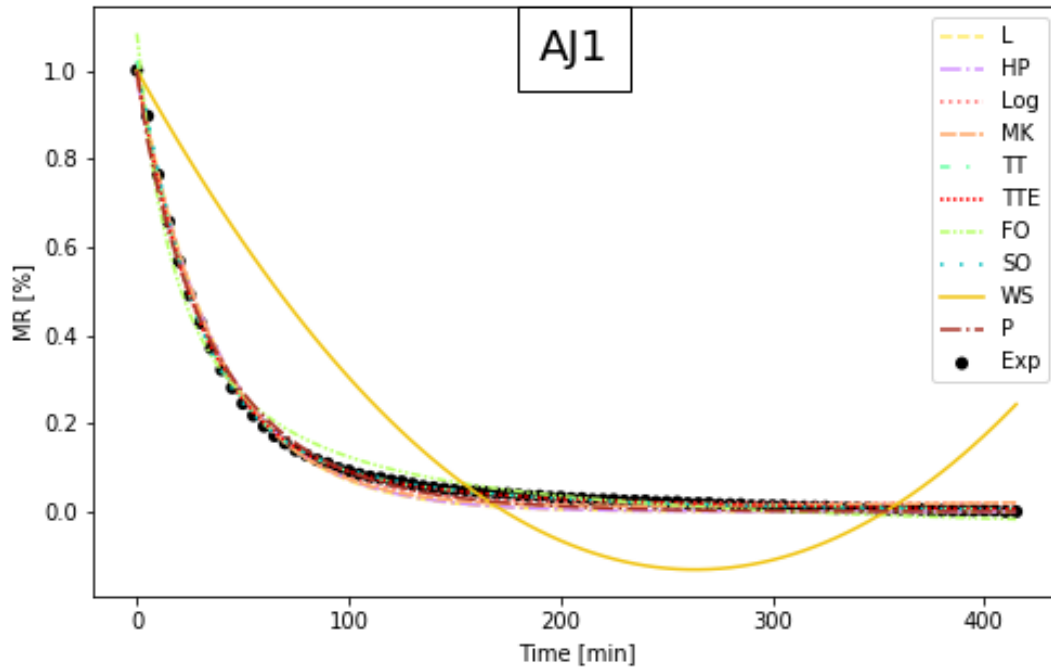


Figura 3.25: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AJ1.

De la tabla 3.21 se muestra que el valor de N obtenido para el modelo de segundo orden es menor que N_m lo que indica un buen ajuste y que en la figura 3.25 se presenta mejor, puesto que la curva de SO es cercana a los puntos o datos experimentales. Por otro lado, para el valor de N para el modelo de primer orden es mayor que N_m por lo que este no presenta un buen ajuste, esto se muestra en la figura 3.25, donde el método FO subestima los datos en los primeros 30 minutos del tiempo de secado y después sobrestima estos valores.

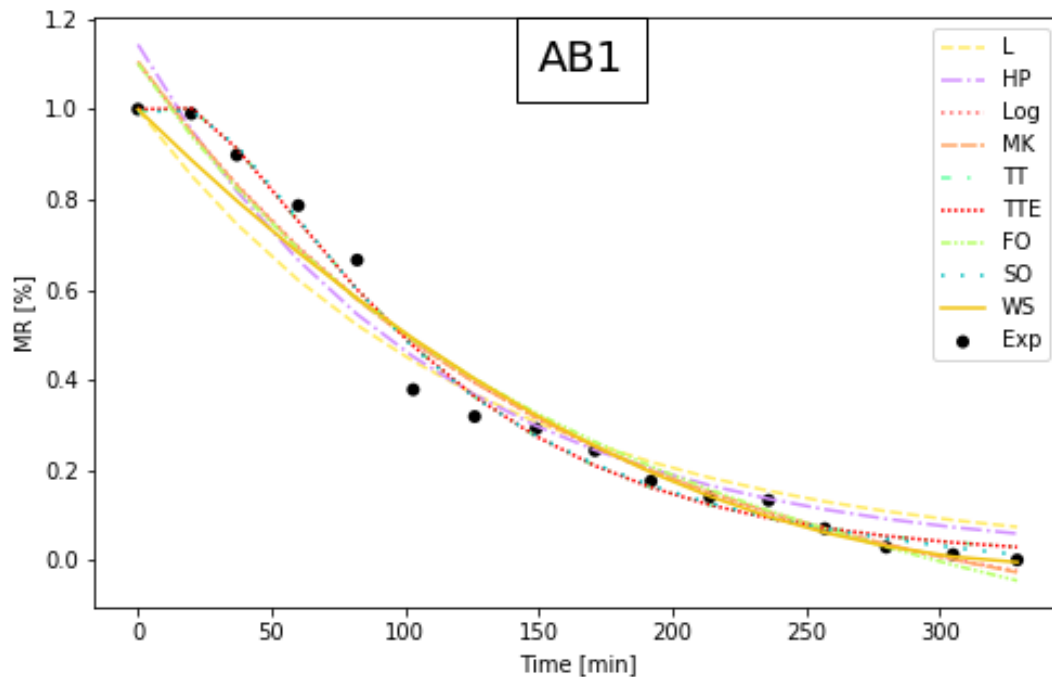


Figura 3.26: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AB1.

De la tabla 3.22 el valor de N obtenido para el modelo de segundo orden es menor que N_m lo que indica un buen ajuste, y que en la figura 3.26 se presenta mejor, puesto que la curva de SO es muy cercana a la curva de los datos experimentales. En el caso del método FO, los valores de N para el modelo de primer orden es mayor que N_m por lo que este no presenta un buen ajuste, esto se muestra en la figura 3.26, donde el método FO subestima los datos en los primeros 80 minutos del tiempo de secado y después sobrestima estos valores.

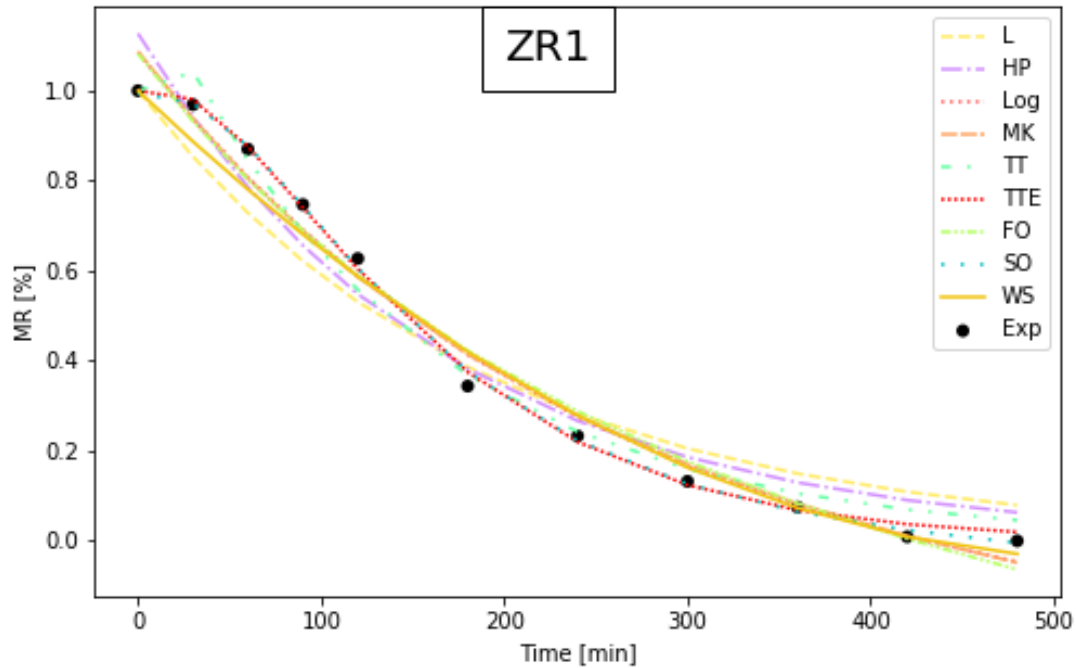


Figura 3.27: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie ZR1.

De la tabla 3.23 el valor de N obtenido para el modelo de segundo orden es menor que N_m lo que indica un buen ajuste, y que en la figura 3.27 se presenta mejor, puesto que la curva de SO es muy cercana a la curva de los datos experimentales. En el caso del método FO, los valores de N para el modelo de primer orden es mayor que N_m por lo que este no presenta un buen ajuste, esto se muestra en la figura 3.27, donde el método FO subestima los datos en los primeros 150 minutos del tiempo de secado y después sobrestima estos valores, también se puede observar que la curva de FO es muy similar a la de curva de WS.

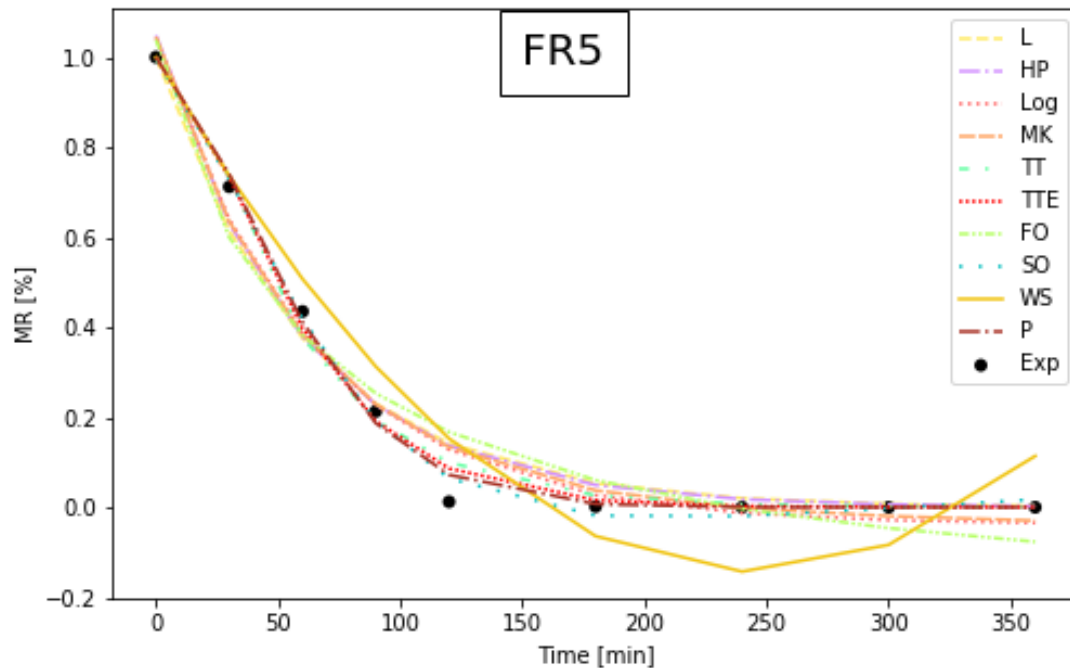


Figura 3.28: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR5.

De la tabla 3.24 el valor de N obtenido para el modelo de segundo orden es menor que N_m lo que indica un buen ajuste, y que en la figura 3.28 se presenta mejor, puesto que la curva de SO es muy cercana a la curva de los datos experimentales. En el caso del método FO, los valores de N para el modelo de primer orden es mayor que N_m por lo que este no presenta un buen ajuste, esto se muestra en la figura 3.28, donde el método FO subestima los datos en los primeros 80 minutos del tiempo de secado y después sobrestima estos valores hasta llegar a los 240 donde el método vuelve a subestimar los valores.

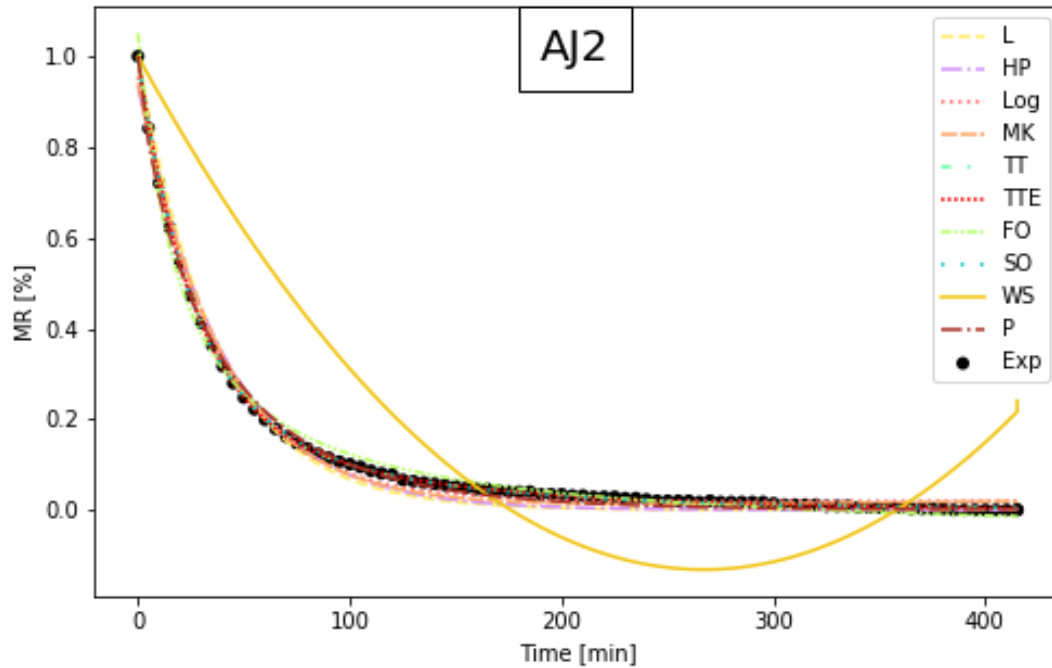


Figura 3.29: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AJ2

De la tabla 3.21 el valor de N obtenido para el modelo de segundo orden es menor que N_m lo que indica un buen ajuste, y que en la figura 3.29 se presenta mejor, puesto que la curva de SO es muy cercana a la curva de los datos experimentales. En el caso del método FO, los valores de N para el modelo de primer orden es mayor que N_m por lo que este no presenta un buen ajuste, esto se muestra en la figura 3.29, donde el método FO subestima los datos en los primeros 80 minutos del tiempo de secado y después sobrestima estos valores. Cabe mencionar que, el método Two-term, $N_{TT} = 0.01303$ es menor que el de N_{SO} para esta serie, por lo que el método Two-term es el mejor ajuste.

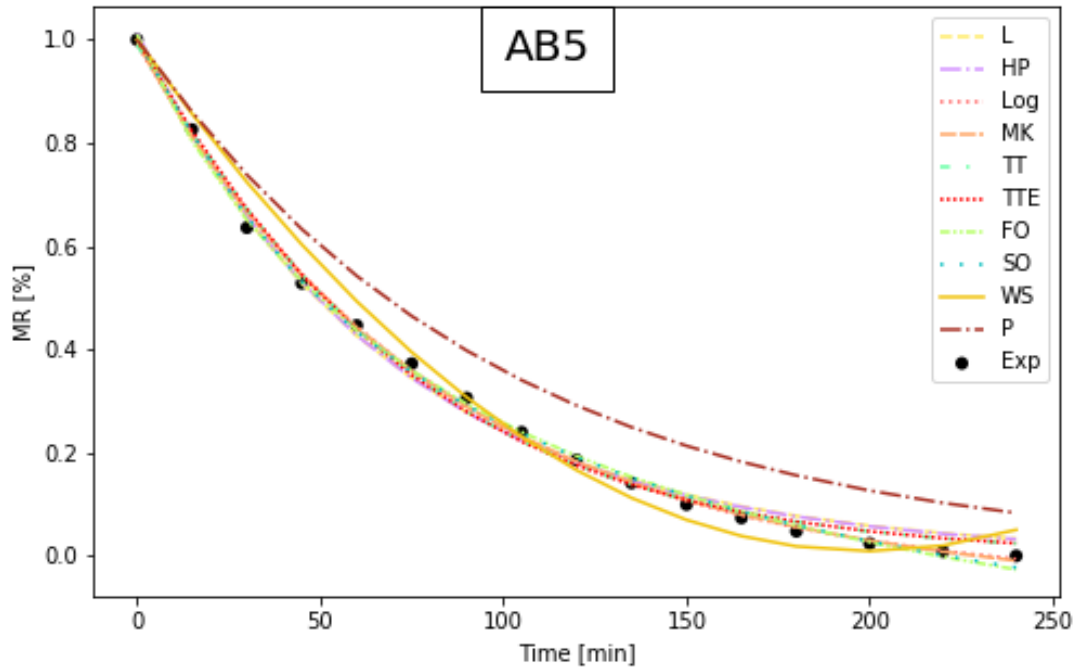


Figura 3.30: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AB5.

De la tabla 3.22 el valor de N obtenido para ambos modelos (FO y SO) es menor que el valor de N_m que indica un buen ajuste, sin embargo, el valor de N para el método de Midilli y Kucuck, $N_{MK} = 0.02766$ es menor que el N_{SO} para esta serie, por lo que el método MK es el de mejor ajuste. En la figura 3.30 se observa como todos los métodos a excepción de P y WS, están muy cercanos a la curva de los valores experimentales.

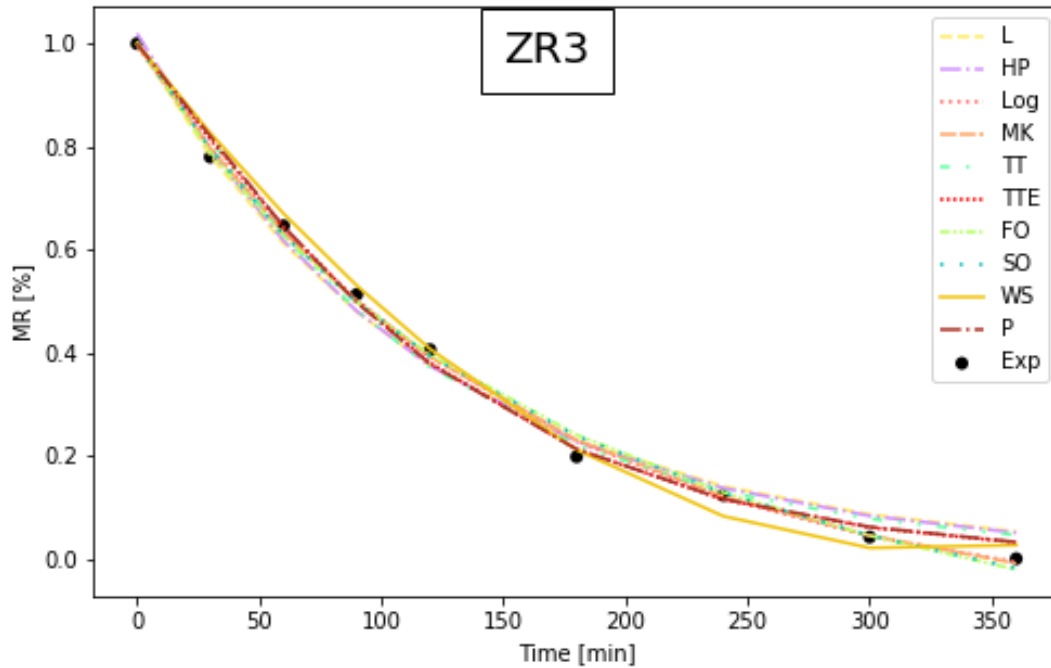


Figura 3.31: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie ZR3.

De la tabla 3.23 el valor de N obtenido para ambos modelos (FO y SO), es menor que el valor de N_m que indica un buen ajuste, sin embargo, el valor de N para el método logarítmico $N_{Log} = 0.02663$ es menor que el N_{SO} y N_{FO} para esta serie, por lo que el método logarítmico presentó el mejor ajuste. En la figura 3.31 se observa como todos los métodos se encuentran muy cercanos a la curva de los valores experimentales.

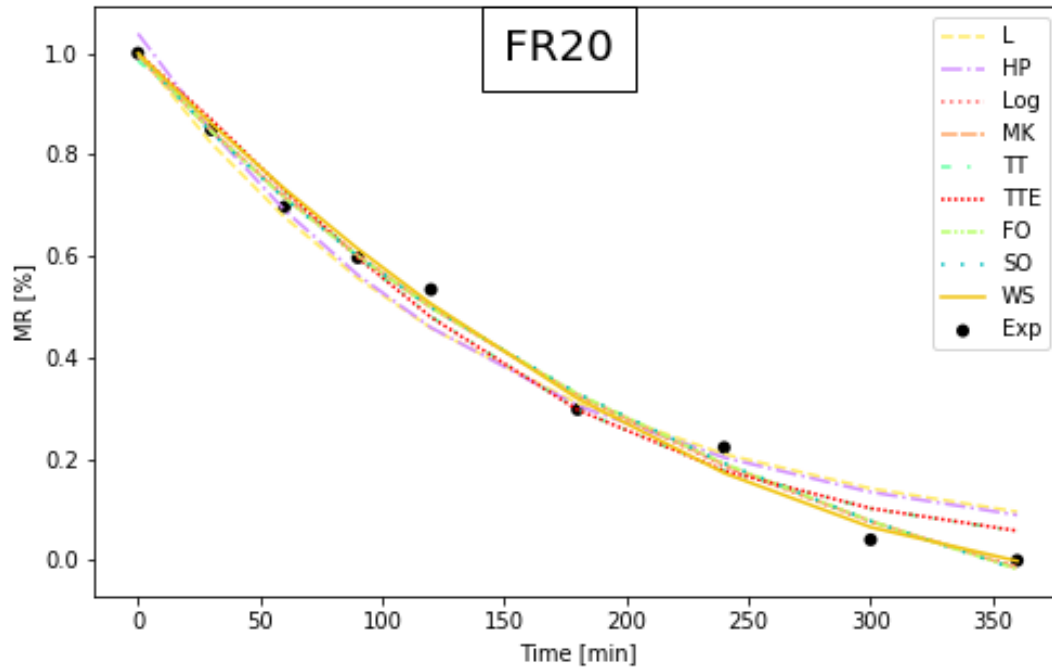


Figura 3.32: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR20.

De la tabla 3.24 el valor de N obtenido para ambos modelos (FO y SO), es menor que el valor de N_m que indica un buen ajuste, sin embargo, el valor de N para el método logarítmico $N_{Log} = 0.04166$ es menor que el N_{SO} para esta serie, por lo que el método logarítmico tiene el mejor ajuste. En la figura 3.32 se observa como todos los métodos se encuentran muy cercanos a la curva y que pasados los 250 minutos, métodos como L, HP, TT, TTE empiezan a hacer sobre estimaciones.

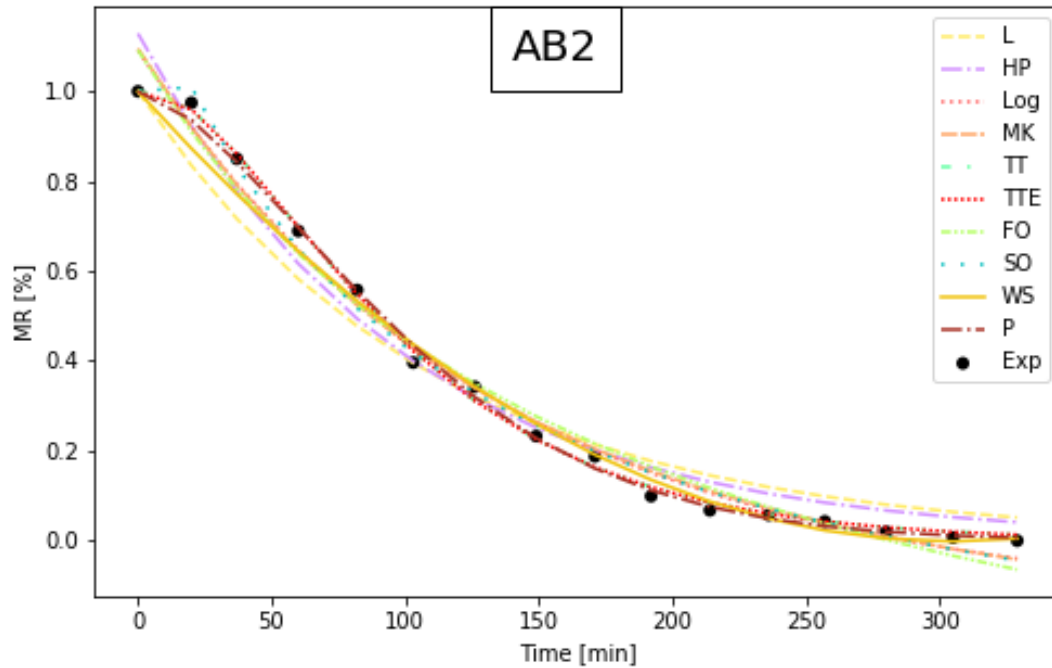


Figura 3.33: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie AB2.

De la tabla 3.22 el valor de N obtenido para el modelo de segundo orden es menor que N_m lo que indica un buen ajuste, y que en la figura 3.33 se presenta mejor, puesto que la curva de SO es muy cercana a la curva de los datos experimentales. En el caso del método FO, los valores de N para el modelo de primer orden es mayor que N_m por lo que este no presenta un buen ajuste, esto se muestra en la figura 3.29, donde el método FO subestima los datos en los primeros 110 minutos del tiempo de secado y después sobrestima estos valores. Cabe mencionar que el método TT tiene un valor N igual a $N_{TT} = 0.03218$, que es menor que el N_{SO} para esta serie, por lo tanto, el método de dos términos es el que mejor se ajusta.

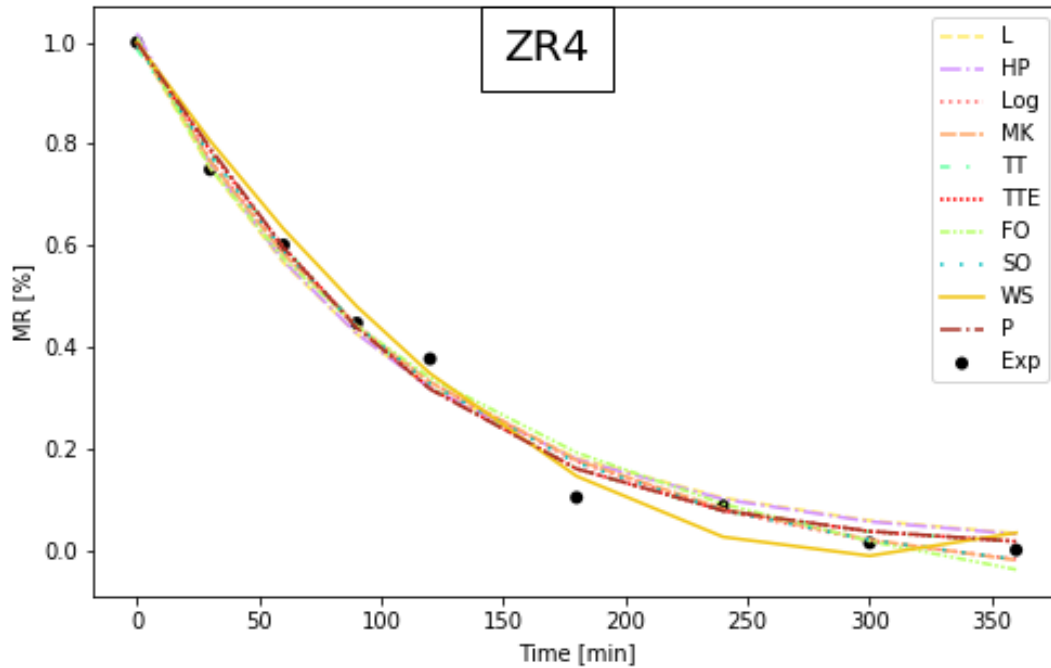


Figura 3.34: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie ZR4.

De la tabla 3.23 el valor de N obtenido para ambos modelos (FO y SO), es menor que N_m , sin embargo el método logarítmico fue el que mejor ajuste presentó con un valor de $N_{Log} = 0.05957$. En la figura 3.34 se observa como todos los métodos se encuentran muy cercanos a la curva y que pasados los 200 minutos el método de WS empieza a subestimar los valores, y a los 250 minutos algunos métodos como L, HP, P, empiezan a sobrestimar estos valores.

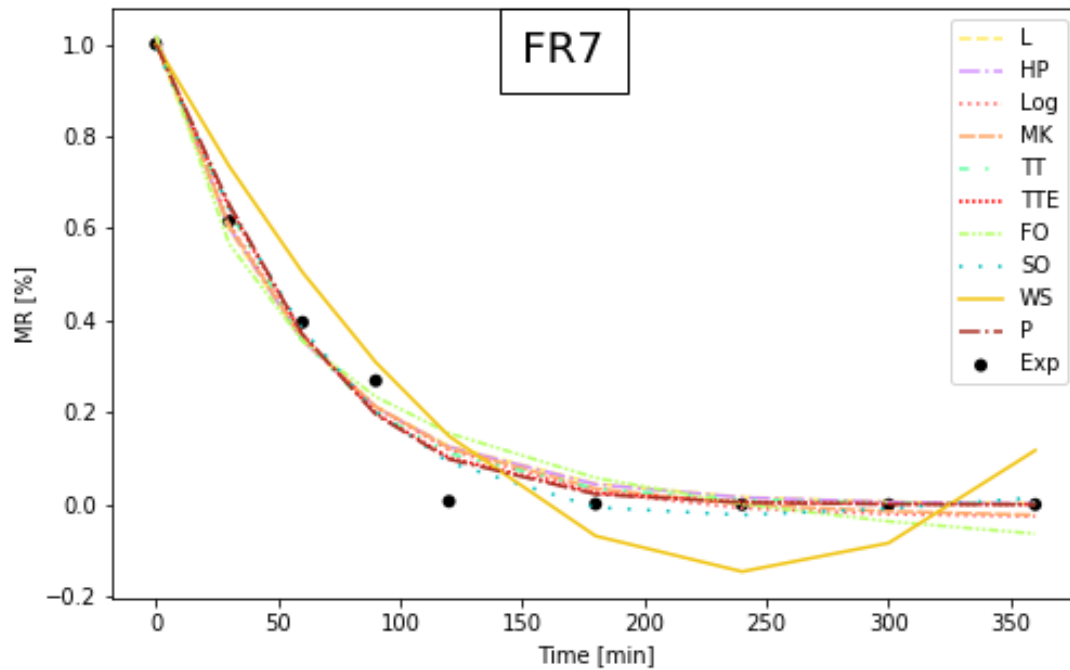


Figura 3.35: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR7.

De la tabla 3.24 el valor de N obtenido para ambos modelos (FO y SO), es más alto que el valor de N_m , que muestra un ajuste deficiente por ambos modelos.

Ahora bien, es importante señalar que esta serie tiene la característica de que ningún método obtuvo un ajuste aceptable, ya que calculando la función de mérito para cada uno de ellos el valor de N se encontraba por encima de N_m .

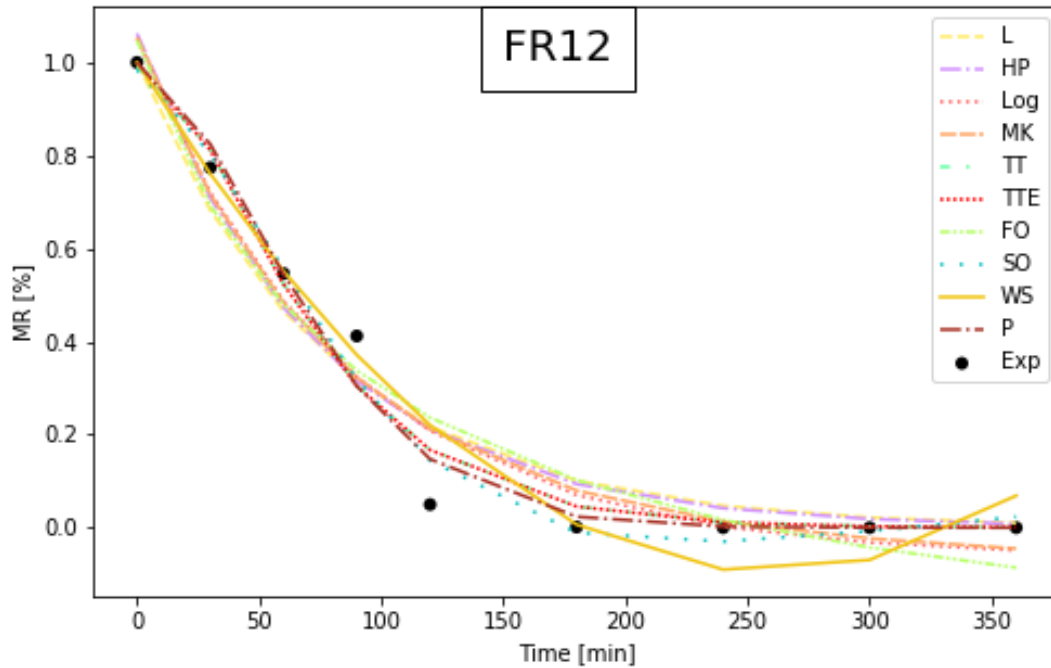


Figura 3.36: Comparación entre los métodos utilizados en la literatura, el método propuesto y los datos experimentales para la serie FR12.

De la tabla 3.24 los valores de N obtenidos para el primer y segundo orden son más altos que el valor de N_m , lo que indica un ajuste deficiente.

Ahora bien, es importante señalar que esta serie como la de FR7 tienen la característica de que ningún método obtuvo un ajuste aceptable, esto es ya que se cuenta con una cantidad menor de datos para realizar el ajuste a comparación de las otras series de datos. Calculando la función de mérito para cada uno de ellos el valor de N se encontraba por encima de N_m (ver tabla 3.24).

Basados en los datos obtenidos por la función de mérito (tablas: 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24), se realizó una comparación completa usando las 39 series y se presenta en detalle en la tabla 3.25 que contiene los resultados de la aplicación y la comparación con los métodos más comúnmente usados.

Es importante recordar que un buen ajuste es aquel que es menor que N_m y mejor ajuste es aquel que más cercano a cero (ver sección 2.4).

Tabla 3.25: Resumen de la aplicación de los 9 modelos de ajuste a las 39 series de datos.

Método	Número de series donde se obtuvo un buen ajuste	Número de series donde se obtuvo el mejor ajuste
Henderson y Pabis	11	0
Logarítmico	19	5
Midilli y Kucuck	17	1
Lewis	10	0
Primer Orden	12	0
Segundo Orden	32	24
Two-term	30	4
Two-term exponencial	31	0
Wang y Sighn	8	0
Page	22	5

Después de aplicar los métodos a las 39 series de datos, los resultados indican: a) El método de Wang fue el que tenía el ajuste más pobre, solo tenía 8 buenos ajustes de todas las series y ninguna de ellas tenía el mejor ajuste, b) los métodos de Lewis, Henderson y Pabis, y Primer Orden tienen una serie de buenos ajustes de 10, 11 y 12 respectivamente y ninguno de ellos fue el mejor ajuste, c) los métodos Midilli y Kucuck, Logarithmic y Page tienen un ajuste regular, con un número de buenos ajustes de 17, 19 y 22 respectivamente, y fueron el mejor ajuste en una de las 39 series para el método MK y en 5 de las 39 series para el método Log y P, y d) los métodos de Two-term, Two-term exponencial y Segundo Orden tienen un buen ajuste en 30, 31 y 32 respectivamente de todas las 39 series, también el método TTE fue el mejor ajuste para 4 series de 39 y el método de segundo orden fue el mejor ajuste para 24 series de 39. El método que mostró los mejores resultados fue el modelo SO, que tuvo un buen ajuste en 32 series, y que fue el que mejor ajustaba en 24 series de 39.

Es importante recalcar que el modelo de SO fue el de mejor ajuste entre todos los métodos para la mayoría de series, siendo que estas tenían diferentes condiciones de secado como se muestra en las secciones anteriores, es decir, el modelo ajusta sin importar la metodología seguida en la parte experimental.

Los resultados se muestran en la Fig. 3.37, donde se representa el valor N calculado para cada método en todas las series de conjuntos de datos, la línea punteada indica el valor de N_m , los métodos de cada serie que se encuentren debajo de esa línea punteada indican un buen ajuste, y aquellos que se encuentren por encima indican un ajuste deficiente.

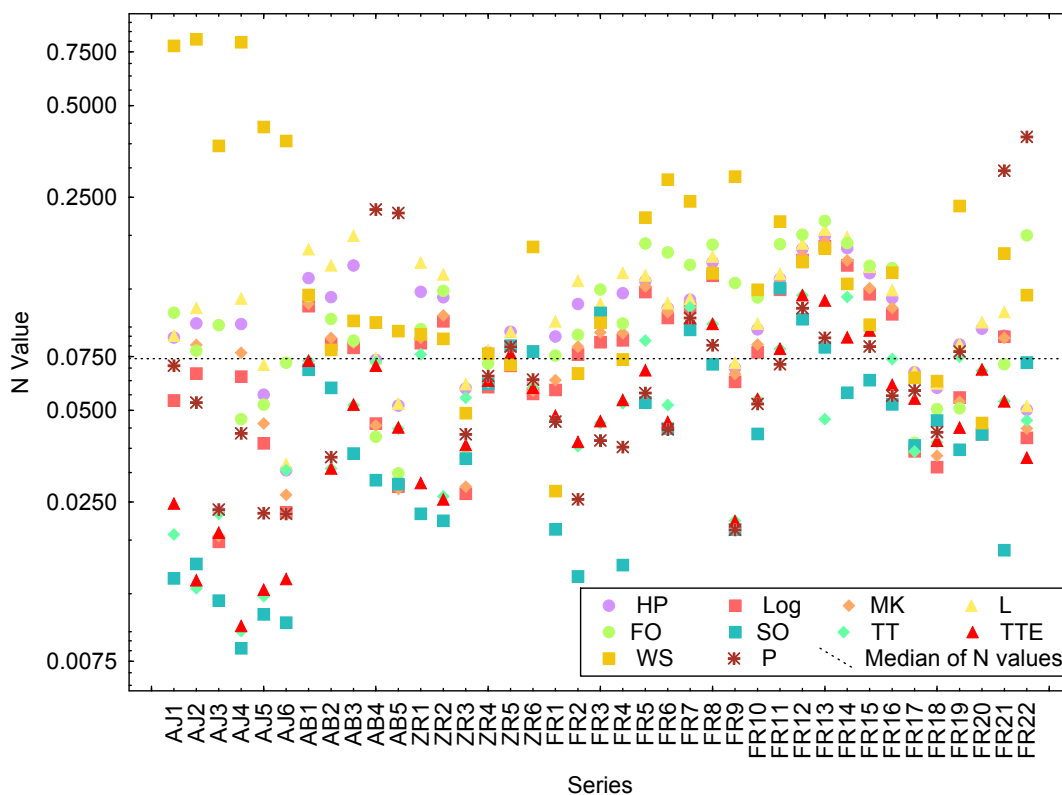


Figura 3.37: Resultados de la aplicación de los 9 métodos (segundo orden, primer orden, Lewis, Page, página modificada, Henderson y Pabis, logarítmico, dos términos, exponencial de dos términos, Midilli y Kucuck y modelos de Wang y Singh) a las 39 series de datos.

De las 39 series de datos, el que mayor porcentaje de buenos ajustes tiene es el de SO en 82.05 % de las series analizadas, el método TTE tiene un buen ajuste en el 79.49 % de las series analizadas, el modelo TT tiene un buen ajuste en 76.92 % de las series analizadas, el método P tiene un buen ajuste en el 56.41 % de las series analizadas, el método Log tiene un buen ajuste en el 48.72 % de las series analizadas, el método MK tiene un buen ajuste en 43.59 % de las series analizadas, el método FO tiene un buen ajuste en el 30.77 % de la series analizadas, el método HP tiene un 28.21 % de buen ajuste en las series analizadas, el método L tiene un buen ajuste del 25.64 % en las series analizadas y finalmente el método WS tiene un 20.51 % de buen ajuste en la series analizadas como se presenta en 3.38.

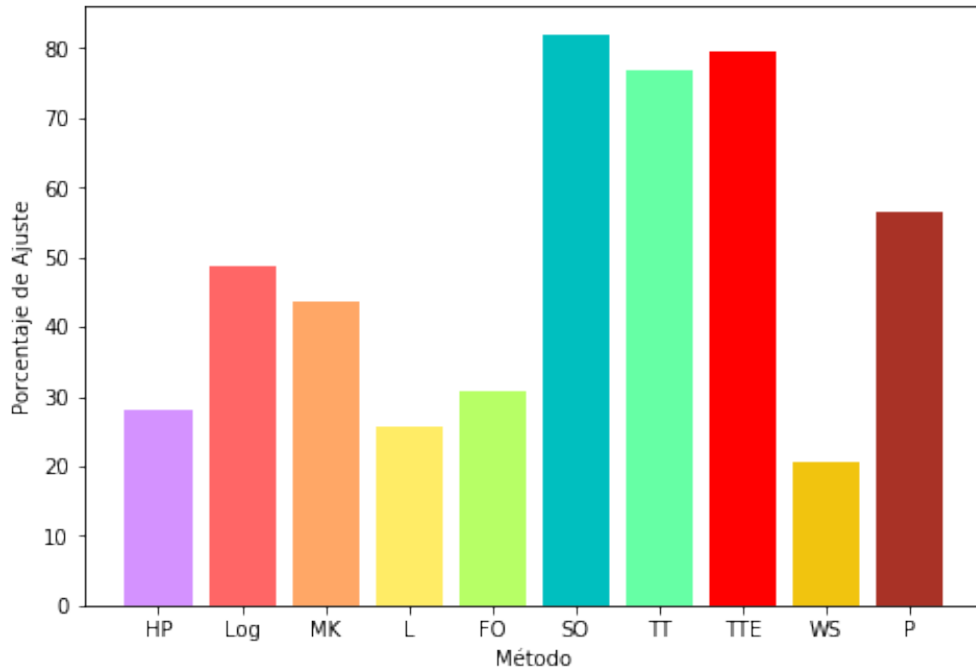


Figura 3.38: Probabilidad de tener un buen ajuste por método.

En cuanto al método de mejor ajuste para cada serie; el método de Segundo Orden fue el modelo que mayor porcentaje de *mejor ajuste* para el 61.54% de las series, el método Logarítmico fue el modelo de mejor ajuste para el 12.82% de las series, el modelo de Page fue el modelo de mejor ajuste para el 10.26% de las series, el modelo Two-term fue el mejor ajuste para el 10.26% de la serie, Midilli y Kucuck fue el modelo de mejor ajuste para el 2.54% de la serie y finalmente Henderson y Pabis, Lewis, First Order, Two-term Exponential y Wang y Sighn no fueron el modelo de mejor ajuste para ninguna de las series analizadas.

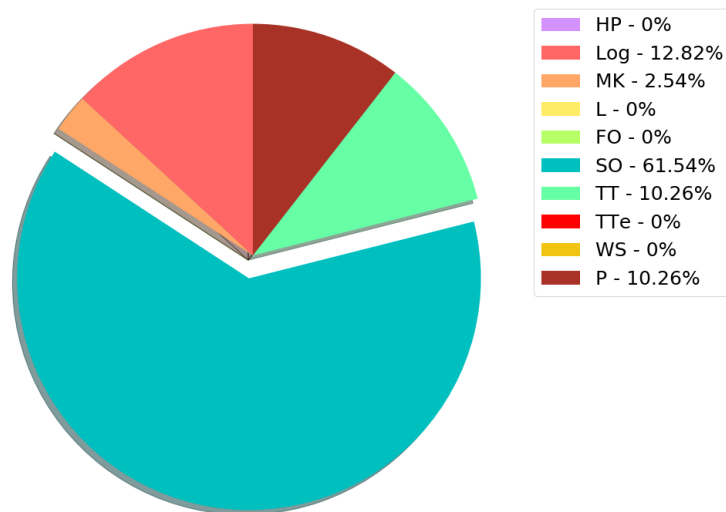


Figura 3.39: Porcentaje de mejor ajuste por método.

Capítulo 4

Conclusiones

Se desarrolló con éxito un nuevo método práctico para describir el comportamiento de humedad relativa durante el proceso de secado de alimentos siendo que este nuevo modelo tiene una alta aplicabilidad, ya que presentó el mejor ajuste en la mayoría de las series analizadas, sin importar las condiciones de secado que fueron empleadas en las distintas series.

El nuevo método se basa en el uso de la función racional polinomial para modelar el comportamiento de contenido de humedad.

Se evaluó la aplicabilidad de nueve métodos (incluido el RP de primer y segundo orden) en 39 series de datos, donde el modelo SO tuvo el mayor número de buenos ajustes en 32 de 39 series de datos, sobre los métodos Henderson y Pabis, Logarithmic, Midilli y Kucuk, Lewis, Primer Orden, los métodos de Wang y Sighn, Page, Two-term, Two-term exponencial, que se utilizan comúnmente para describir el comportamiento del contenido de humedad relativa.

El modelo de SO fue el mejor de los modelos aplicados en este trabajo, siendo el que mejor ajustaba en 24 de las 39 series analizadas, correspondiente al 61.5 %.

El nuevo método RP de segundo orden y el script en lenguaje Wolfram permite ajustar el comportamiento del contenido de humedad de diferentes alimentos, lo que constituye una ventaja competitiva sobre los métodos analíticos y empíricos actualmente disponibles para las industrias de secado de alimentos.

4.1. Trabajo a Futuro

Desarrollar más experimentos para seguir evaluando el método RP en diferentes condiciones de secado, así como en otros productos.

Aplicar este nuevo método práctico para optimizar el proceso de secado de alimentos.

Trasladar el código ya escrito en Wolfram a algún lenguaje de programación Open Source.

Apéndice A

Código en Mathematica

```
1 Newton
2
3 In[370]:= NwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, Exp[-k r], k, r, Method ->
      NMinimize];
4 NwAJ1["BestFitParameters"]
5 NwAJ1["ParameterTable"];
6 vNwAJ1 = NwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
7   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
8 Normal[vNwAJ1[[1, 1]]];
9
10 Out[371]= {k -> -0.0134066}
11
12 Henderson and Pabis
13
14 In[229]:= HPwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, a Exp[-(k r)], {a, k}, r,
      Method -> NMinimize];
15 HPwAJ1["BestFitParameters"]
16 HPwAJ1["ParameterTable"];
17 vHPwAJ1 = HPwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
18   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
19 Normal[vHPwAJ1[[1, 1]]];
20
21
22 Out[230]= {a -> 218.825, k -> 0.00135116}
23
24 Logarithmic
25
26 In[235]:= LwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, a Exp[-(k x)] + s, {a, k, s}, x,
      Method -> NMinimize];
27 LwAJ1["BestFitParameters"]
28 LwAJ1["ParameterTable"];
29 vLwAJ1 = LwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
30   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
31 Normal[vLwAJ1[[1, 1]]];
32
33
34 Out[236]= {a -> 162.717, k -> 0.00223173, s -> 60.7403}
35
36 Two-term
37
```

```

38 In[328]:= TtwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, a Exp[-(k r)] + v Exp[-k1 r], {a, k
    , v, k1},
39   r, Method -> NMinimize];
40 TtwAJ1["BestFitParameters"]
41 TtwAJ1["ParameterTable"];
42 vTtwAJ1 = TtwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
43   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
44 Normal[vTtwAJ1[[1, 1]]];
45
46 Out[329]= {a -> 104.388, k -> 17.2617, v -> 214.118, k1 -> 0.00126168}
47
48
49 Two-term exp
50
51 In[334]:= TtEwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1,
52   a Exp[-(k r)] + (1 - a) Exp[-k1 r], {a, k, k1}, r, Method -> NMinimize];
53 TtEwAJ1["BestFitParameters"]
54 TtEwAJ1["ParameterTable"];
55 vTtEwAJ1 =
56   TtEwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
57   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
58 Normal[vTtEwAJ1[[1, 1]]];
59 Out[335]= {a -> -210.097, k -> 6.40243, k1 -> 0.00120377}
60
61 During evaluation of In[334]:= General::stop: Further output of General::munfl
    will be suppressed during this calculation.
62
63 Midilli and Kukuck
64
65 In[253]:= MKwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, a Exp[-(k r)] + v r, {a, k, v}, r,
66   Method -> NMinimize];
67 MKwAJ1["BestFitParameters"]
68 MKwAJ1["ParameterTable"];
69 vMKwAJ1 = MKwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
70   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
71 Normal[vMKwAJ1[[1, 1]]];
72
73 Out[254]= {a -> 278.421, k -> 0.00692511, v -> 0.363637}
74
75 Wang and Singh
76
77 In[259]:= WwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, 1 + a r + b r^2, {a, b}, r,
78   Method -> NMinimize];
79 WwAJ1["BestFitParameters"]
80 WwAJ1["ParameterTable"];
81 vWwAJ1 = WwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
82   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
83 Normal[vWwAJ1[[1, 1]]];
84
85 During evaluation of In[259]:= NonlinearModelFit::lmnl: The model 1+a r+b r^2
    is linear in the parameters {a,b}, but a nonlinear method or non-Euclidean
    norm was specified, so nonlinear methods will be used.
86
87 Out[260]= {a -> 1.58327, b -> -0.00330745}

```



```

88
89 Primer Orden
90
91 In[265]:= POwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, (a + (b* r))/(1 + (c * r)), {a, b,
      c}, r,
92   Method -> NMinimize];
93 POwAJ1["BestFitParameters"]
94 POwAJ1["ParameterTable"];
95 vPOwAJ1 = POwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
96   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
97 Normal[vPOwAJ1[[1, 1]]];
98
99 Out[266]= {a -> 346.835, b -> 6.63127, c -> 0.0491346}
100
101 Segundo Orden
102
103 In[271]:= SOwAJ1 = NonlinearModelFit[wAJ1, (a + (b* r) + (c*( r^2)))/(
104   1 + (d r) + ( e (r^2))), {a, b, c, d, e}, r, Method -> NMinimize];
105 SOwAJ1["BestFitParameters"]
106 SOwAJ1["ParameterTable"];
107 vSOwAJ1 = SOwAJ1[{"MeanPredictionConfidenceIntervalTable",
108   "SinglePredictionConfidenceIntervalTable"}];
109 Normal[vSOwAJ1[[1, 1]]];
110
111 Out[272]= {a -> 328.87, b -> 25.6664, c -> 0.756661, d -> 0.0728934, e ->
      0.00540491}

```

Bibliografía

- Akpınar, E., Bicer, Y., Cetinkaya, F., 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering*. 75, 308–315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.018>.
- Andaverde, J., Wong-Loya, J., Vargas-Tabares, Y., Robles-Perez, M., 2019. A practical method for determining the rheology of drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 180, 150–158. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920410519304930>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.039>.
- Azaizia, Z., Kooli, S., Elkhadraoui, A., Hamdi, I., Guizani, A., 2017. Investigation of a new solar greenhouse drying system for peppers. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 8818–8826. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916316895>, doi:10.1016/J.IJHYDENE.2016.11.180.
- Benítez, R., 2019. Oficina regional de la fao para américa latina y el caribe. URL: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/239393/>.
- Castillo-Tellez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., Castillo-Téllez, B., López-Vidaña, E.C., López-Ortiz, A., 2018. Solar drying of stevia (*rebaudiana bertonii*) leaves using direct and indirect technologies. *Solar Energy* 159, 898 – 907. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17310149>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.031>.
- Chasiotis, V., Tzempelikos, D., Filios, A., Moustris, K., 2020. Artificial neural network modelling of moisture content evolution for convective drying of cylindrical quince slices. *Computers and Electronics in Agriculture* 172, 105074. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919310713>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105074>.
- Da Silva, F., Siqueira, V., Quinzani, G., Martins, E., Goneli, A., 2017. Drying kinetics of niger seeds. *POST-HARVEST SCIENCE AND TECHNOLOGY* 37. URL: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162017000400727, doi:<https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n4p727-738/2017>.
- Del Río, J.A., Zimmerman, R.W., Dawe, R.A., 1998. Formula for the conductivity of a two-component material based on the reciprocity theorem. *Solid State Communications* 106, 183–186. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038109898000519>, doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(98)00051-9).

-
- Del Río-Portilla, J., Andaverde-Arredondo, J., Wong-Loya, J., 2018, Número de Patente: MX 359968 B. Sistema y método de obtención de parámetros termodinámicos en situaciones transitorias que tienden a valores de saturación.
- Demarchi, S.M., Irigoyen], R.M.T., Giner, S.A., 2018. Vacuum drying of rosehip leathers: Modelling of coupled moisture content and temperature curves as a function of time with simultaneous time-varying ascorbic acid retention. *Journal of Food Engineering* 233, 9 – 16. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877418301389>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.027>.
- Diamante, L., Munro, P., 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51, 271 – 276. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X93901225>, doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90122-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90122-5).
- Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., 2008. Convective drying characteristics of amelié mango (*mangifera indica* l. cv. ‘amelie’) with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 88, 429–437. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877408001362>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.008>.
- Erbay, Z., Icier, F., 2010. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical reviews in food science and nutrition* 50, 441–64. doi:10.1080/10408390802437063.
- Ertekin, C., Firat, M., 2017. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products, critical reviews in food science and nutrition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57, 701–717. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2014.910493>, doi:<https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493>.
- ESPAÑOLA, R.A., 2020. Diccionario de la lengua española. URL: <https://dle.rae.es>.
- Estrada-Wiese, D., Del Río-Chanona, E., Del Rio, J., 2010. Stochastic optimization of broadband reflecting photonic structures. Technical Report. *Sci. Rep.* 8.
- Estrada-Wiese, D., Del Río-Chanona, E., Del Rio, J., 2018. Stochastic optimization of broadband reflecting photonic structures. *Rev. Mex. Física* 64, 72–81. doi:10.1038/s41598-018-19613-6.
- Fito, P., Andrés, A., Barat, J., Albors, A., 2016. Tipos de secadores directos o por convección.
- Garduño, A., Lopez, I., Ruiz, A., 2020. Modelación matemática de secadores solares tipo invernadero con convección natural y forzada para productos agrícolas: estado del arte. *Ingeniería agrícola y biosistemas* 9. doi:<https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.02.004>.
- Gulcimen, F., Karakaya, H., Durmus, A., 2016. Drying of sweet basil with solar air collectors. *Renewable Energy* 93, 77 – 86. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116301343>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.033>.

-
- Gómez, P.S., Montes, J.G., 2007. Nueva Flora de Murcia. DM.
- Ikrang, E., Okoko, J., Obot, M., Akubuo, C., 2014. Modeling of thin layer drying kinetics of salted fish fillets (tilapia zilli) in a direct passive solar dryer. *Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology* 8. doi:10.9790/2402-08141624.
- Janjai, S., 2012. A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination. *International Journal Energy Environment* 3.
- Jayas, D.S., 2016. Food dehydration, in: Reference Module in Food Science. Elsevier. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005965029139>, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.02913-9>.
- Kumar, A., Saboo, S., Shet, S., Pilehavari, A., Serth, R., 2000. Correlation of rheometric data and hydraulic calculations using rational polynomials. *Chemical Engineering Communications* 183, 99–117. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00986440008960504>, doi:<https://doi.org/10.1080/00986440008960504>.
- Lusas, E., Rooney, L., 2001. *Snack Foods Processing*. CRC Press. URL: https://books.google.com.mx/books?id=W_5w1zckPkMC.
- López-Ortiz, A., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L., 2013. Effects of drying air temperature on the structural properties of garlic evaluated during drying. *International Journal of Food Properties* 16, 1516–1529. URL: <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.599090>, doi:10.1080/10942912.2011.599090.
- López-Ortiz, A., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L., Martynenko, A., Pilatowsky-Figueroa, I., 2018. Non-isothermal drying of garlic slices (*allium sativum*, l.): Wave period and initial temperature of the heating/cooling effect. *Food and Bioproducts Processing* 111, 83 – 92. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308518304073>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.06.005>.
- Madamba, P.S., 2003. Thin layer drying models for osmotically pre-dried young coconut. *Drying Technology* 21, 1759–1780. doi:10.1081/DRT-120025507.
- Menon, A., Stojceska, V., Tassou, S.A., 2020. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology* 100, 67 – 76. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224419304558>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.014>.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002. A new model for single-layer drying. *Drying Technology* 20, 1503–1513. doi:<https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>.
- Molina-Rodea, R., Wong-Loya, J., Valades-Pelayo, P., 2020. A new simulator to determine thermal disturbance and recovery processes during wellbore drilling: Experimental validation with a scaled-down wellbore prototype. *Computers & Geosciences* 135. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300419304807>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104359>.

-
- Mujumdar, A.S., 2014. Handbook of industrial drying, fourth edition. doi:10.1201/b17208.
- Mustafa, A., Seyfi, S., Burak, A., 2016. Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying. *Energy Conversion and Management* 113, 82–94. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416000455>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.028>.
- Nair, P., Espinosa-Santana, A.L., Guerrero-Martínez, L., López-Ortiz, A., Nair, M., 2020. Prospects toward uv-blue filtered solar drying of agricultural farm produce using chemically deposited copper chalcogenide thin films on cellular polycarbonate. *Solar Energy* 203, 123 – 135. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X2030387X>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.012>.
- Ndukwu, M., Bennamoun, L., Abam, F., 2018. Experience of solar drying in africa: Presentation of designs, operations, and models. *Food Engineering* 10. doi:<https://doi.org/10.1007/s12393-018-9181-2>.
- Nunez-Santiago, M.C., Santoyo, E., Bello-Perez, L.A., Santoyo-Gutierrez, S., 2003. Rheological evaluation of non-newtonian mexican nixtamalised maize and dry processed masa flours j. *Journal of Food Engineering* 60, 55–66. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877403000189?via%3Dihub>, doi:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00018-9).
- Oudenaarden, A., 2009. Systems biology. URL: http://web.mit.edu/biophysics/sbio/PDFs/L15_notes.pdf.
- Owen, T.H., Orville, C., 1995. *Computational Methods in Chemical Engineering*, first edition. Englewood Cliffs.
- Panchariya, P., Popovic, D., Sharma, A., 2002. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering* 52, 349–357. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877401001261>, doi:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00126-1).
- Román-Roldán, N.I., López-Ortiz, A., Ituna-Yudonago, J.F., García-Valladares, O., Pilatowsky-Figueroa, I., 2019. Computational fluid dynamics analysis of heat transfer in a greenhouse solar dryer “chapel-type” coupled to an air solar heating system. *Energy Science & Engineering* 7, 1123–1139. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ese3.333>, doi:10.1002/ese3.333.
- Seyed-Hassan, M., Alireza, S., Mahmood Reza, G., 2017. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture* 4, 128–139. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317317300100?via%3Dihub>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.03.001>.
- Sonmete, M.H., Menges, H.O., Ertekin, C., Ozcan, M.M., 2017. Mathematical modeling of thin layer drying of carrot slices by forced convection. *Journal of Food Measurement and Characterization* doi:10.1007/s11694-016-9432-y.

-
- Wang, D.C., Fon, D.S., Fang, W., Sokhansanj, S., 2004. Development of a visual method to test the range of applicability of thin layer drying equations using matlab tools. *Drying Technology* 22, 1921–1948. URL: <https://doi.org/10.1081/DRT-200032878>, doi:10.1081/DRT-200032878.
- Weisstein, E.W., 2021. Merit function. URL: <https://mathworld.wolfram.com/MeritFunction.html>.
- Wong-Loya, J., Andaverde, J., del Rio, J., 2015a. Improved method for estimating static formation temperatures in geothermal and petroleum wells. *Geothermics* 57, 73–83. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650515000681>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.06.002>.
- Wong-Loya, J.A., Andaverde, J., Santoyo, E., 2012. A new practical method for the determination of static formation temperatures in geothermal and petroleum wells using a numerical method based on rational polynomial functions. *Journal of Geophysics and Engineering* 9, 711–728. URL: <https://academic.oup.com/jge/article/9/6/711/5127427>, doi:<https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/6/711>.
- Wong-Loya, J.A., Santoyo, E., Andaverde, J.A., Quiroz-Ruiz, A., 2015b. Rpm-webbsys: A web-based computer system to apply the rational polynomial method for estimating static formation temperatures of petroleum and geothermal wells. *Computers and Geosciences* 85, 45–59. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830041530042X?via%3Dihub>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.001>.
- Wuytack, L., 1979. Pade approximation and its applications, in: *Proceedings of a Conference held in Antwerp, Belgium*, p. 396.
- Zhu, A., Zhao, J., Wu, Y., 2020. Modeling and mass transfer performance of dioscorea alata l. slices drying in convection air dryer. *Journal of Food Process Engineering* 43, e13427. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13427>, doi:<https://doi.org/10.1111/jfpe.13427>, arXiv:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jfpe.13427>.