

**MODELADO DE LAS CINÉTICAS DE PÉRDIDA DE AGUA Y ABSORCIÓN DE
ACEITE DURANTE LA FRITURA CONVENCIONAL DE DOS GENOTIPOS DE
PAPA NATIVA (*Solanum phureja*) CULTIVADOS EN EL DEPARTAMENTO DE
NARIÑO**

**GERSON VLADIMIR GALINDRES SAA
NORBEY DARÍO LINARES DÍAZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
SAN JUAN DE PASTO**

2017

MODELADO DE LAS CINÉTICAS DE PÉRDIDA DE AGUA Y ABSORCIÓN DE ACEITE DURANTE LA FRITURA CONVENCIONAL DE DOS GENOTIPOS DE PAPA NATIVA (*Solanum phureja*) CULTIVADOS EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO

**GERSON VLADIMIR GALINDRES SAA
NORBÉY DARÍO LINARES DÍAZ**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agroindustrial

Asesor:
ANDRÉS FELIPE CERÓN CÁRDENAS
M.Sc. Innovación Alimentaria y Nutrición

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
SAN JUAN DE PASTO
2017**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva de sus autores”.

Artículo 1° del acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

M.Sc. DIEGO FERNANDO MEJIA ESPAÑA
Jurado

Ph.D. OSWALDO OSORIO MORA
Jurado

M.Sc. ANDRÉS FELIPE CERÓN CÁRDENAS
Asesor

San Juan de Pasto, 10 de mayo de 2017.

DEDICATORIA

En primer lugar, a DIOS que, por su Santa voluntad, me ha permitido llegar hasta aquí y a quien le debo todo lo que soy. Toda la gloria y la honra a Ti, JESÚS, la fortaleza de mi vida, mi guía y mi sustento.

A mis padres Ramiro y Mara quienes han depositado en mí toda su confianza y amor, por guiarme siempre por el buen camino y por el sacrificio diario que han hecho para darme lo mejor para mi vida.
¡Los amo con todo mi corazón!

A mi hermana y mi sobrina por ser parte importante de mi vida y estar a mi lado.

A mi compañero de tesis por su esfuerzo, paciencia y dedicación.

A todos mis profesores y asesor por sus enseñanzas y apoyo personal y profesional.

Y a mis amigos, compañeros y a las personas que estuvieron ahí para verme cumplir una de mis tantas metas en el largo camino de la vida.

Gerson Vladimir Galindres Saa

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por sus infinitas bendiciones.
A mis padres María Díaz y Guillermo Linares, por ser mi ejemplo de vida y
apoyarme en todas mis decisiones.
A mis hermanos Silvio, Fanny y Leonel; por enseñarme que en la vida se debe
luchar para salir adelante, a ellos mi admiración y a mis sobrinos todo mi
amor.
A mi novia Lizeth Duarte, por ser mi columna y mi soporte, por su entrega y
por compartir junto a mí los mejores momentos.

Norbey Linares Díaz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a:

La Universidad de Nariño por brindar los conocimientos y la formación como profesionales y personas.

El Sistema General de Regalías por la financiación de este trabajo de grado, a través del Proyecto “*Mejoramiento tecnológico y productivo del sistema papa en el Departamento de Nariño*”.

El Grupo de Investigación GAIDA por proporcionar las instalaciones y delegar el uso y manejo de los equipos del Laboratorio de Investigación en Calidad y Conservación de Alimentos.

La Granja Experimental Botana por proporcionar la materia prima para la realización de este trabajo de grado.

M.Sc. Diego Mejía España, jurado de nuestra tesis, por su apoyo, colaboración y aportes en el desarrollo del presente trabajo de grado.

Ph.D. Oswaldo Osorio Mora, jurado de nuestra tesis, por su apoyo, aportes y colaboración.

M.Sc. Andrés Felipe Cerón por sus conocimientos, recomendaciones, sugerencias, correcciones y asesoría brindados.

M.Sc. Laura Inés Latorre por su amabilidad y ayuda.

Ing. Amparo Guevara, a cargo de la planta piloto de procesos Agroindustriales, por facilitar materiales y equipos necesarios.

Sandra Espinosa, Téc. Laboratorio Bromatología - Abonos Orgánicos; por su colaboración para la realización de los análisis químico proximales en los Laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño.

A todas las personas que una u otra forma, influyeron en la realización de este trabajo de grado e hicieron posible esta realidad.

RESUMEN

Antecedentes. El departamento de Nariño cuenta con una amplia diversidad de la especie de papa nativa *Solanum phureja*. Sin embargo, dichos materiales, actualmente, se consumen en mayor medida en fresco; limitando la generación de un mayor valor agregado. Por ello, la fritura es una de las opciones de transformación agroindustrial. Sin embargo, durante este proceso, se presentan diferentes fenómenos de transferencia de masa, siendo la pérdida de humedad y la absorción de aceite los más importantes para diseñar y controlar el proceso de fritura. **Objetivo.** Modelar las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa nativa (*Solanum phureja*), Ratona Morada y Andina, cultivados en el departamento de Nariño. **Métodos.** Se determinaron algunas propiedades físicas y químico proximales de los tubérculos. Asimismo, se realizó el proceso de fritura. Rodajas de papa de 2 mm de espesor fueron freídas a tres temperaturas (140, 160 y 180 °C), y tiempos de hasta 150 segundos. La relación producto/aceite se mantuvo constante 1:150 (p/v). La cinética de pérdida de agua fue estudiada con los modelos empíricos de: Newton, Henderson-Pabis y Page; mientras que la cinética de absorción de aceite se estudió con los modelos de: Monod, Moyano-Pedreschi y un modelo de primer orden. El efecto de la temperatura se evaluó mediante la difusividad efectiva (D_{eff}) y la energía de activación (E_a). **Resultados.** A mayor temperatura; a un tiempo dado, mayor es la pérdida de agua y menor la absorción de aceite. Los modelos empíricos utilizados mostraron una buena calidad de ajuste sobre las curvas experimentales, validando su utilización; no obstante, el modelo de Page y los de Monod y Moyano-Pedreschi describen mejor los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite, respectivamente. La D_{eff} tuvo valores entre 6.4035×10^{-9} y 1.5968×10^{-8} m²/s a temperaturas entre 140 y 180 °C; mientras que la E_a fue de 31.7 kJ/mol (Ratona Morada) y 32.7 kJ/mol (Andina) para D_{eff} y de -7.58 kJ/mol (Ratona Morada) y -6.41 kJ/mol (Andina) para Y_e . **Conclusiones.** La temperatura y el tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo sobre el contenido de agua y aceite ($p < 0.05$). Los valores encontrados de D_{eff} y E_a , se encuentran dentro del intervalo general de 10^{-8} a 10^{-11} m²/s y 12.7 a 110 kJ/mol para alimentos deshidratados, respectivamente; y mostraron dependencia con la temperatura.

Palabras clave: absorción de aceite, difusividad, energía de activación, modelos empíricos, pérdida de agua, *Solanum phureja*.

ABSTRACT

Background. The departmento of Nariño counts on a wide diversity of the species of native potato *Solanum phureja*. However, these materials are currently consumed to a greater extent in fresh; limiting the generation of a greater added value. For this reason, frying is one of the options for agro-industrial transformation. However, during this process, mass transfer phenomena are presented, with the loss of moisture and oil uptake being the most important for designing and controlling frying process. **Objective.** To model the kinetics of water loss and oil uptake during conventional frying of two genotypes of native potato (*Solanum phureja*), Ratona Morada and Andina, cultivated in the departmento of Nariño. **Methods.** Some physical and chemical proximal properties of the tubers were determined. Also, the frying process was performed. Potato slices 2 mm thick were fried at three temperatures (140, 160 and 180 °C), and times of up to 150 seconds. The product / oil ratio was kept constant 1: 200 (w/v). The kinetics of water loss were studied with: Newton, Henderson-Pabis and Page empiric models; while the kinetics of oil uptake was studied with: Monod, Moyano-Pedreschi and a first-order models. The effect of temperature was evaluated by the effective diffusivity (D_{eff}) and the activation energy (E_a). **Results.** Higher temperature; at a given time, the greater the water loss and the lower the oil uptake. The empirical models used showed good quality of fit on the experimental curves, validating their use; However, the Page model and Monod and Moyano-Pedreschi models better describe the phenomena of water loss and oil uptake, respectively. The D_{eff} had values between 6.4035×10^{-9} and 1.5968×10^{-8} m²/s at temperatures between 140 and 180 °C; While E_a was 31.7 kJ/mol (Ratona Morada) and 32.7 kJ/mol (Andina) for D_{eff} and -7.58 kJ/mol (Ratona Morada) and -6.41 kJ/mol (Andina) for Y_e . **Conclusions.** The temperature and the frying time had a significant effect on the water and oil content ($p < 0.05$). The values found for D_{eff} and E_a are within the general range of 10^{-8} to 10^{-11} m²/s and 12.7 to 110 kJ/mol for dehydrated foods, respectively; and showed dependence on temperature.

Key words: oil uptake, diffusivity, activation energy, empiric models, water loss, *Solanum phureja*.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDADES Y PERTINENCIA	23
1.1. Descripción de la situación	23
1.2. Pregunta de investigación	25
2. ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN, EL DESARROLLO TECNOLÓGICO O LA INNOVACIÓN.....	26
2.1. La papa “criolla” (<i>Solanum phureja</i>).....	26
2.1.1. Generalidades	26
2.1.2. Morfología de la planta y tubérculos	27
2.1.3. Condiciones agroecológicas	27
2.1.4. Cosecha.....	27
2.1.5. Poscosecha.....	28
2.1.6. Almacenamiento.....	28
2.1.7. Composición químico-nutricional	28
2.1.8. Situación en Colombia	29
2.1.9. Producción en el departamento de Nariño.....	30
2.2. Fundamentos teóricos	31
2.2.1. Fritura convencional de alimentos.....	31
2.2.1.1. Generalidades	31
2.2.1.2. Transferencia de calor y de materia	32
2.2.2. Modelado matemático del proceso de fritura	34
2.2.2.1. Generalidades	34
2.2.2.2. Construcción del modelo.....	35
2.2.2.3. Modelado de la pérdida de agua.....	36
2.2.2.4. Modelado de la absorción de aceite	40

2.3.	Antecedentes del tema	41
2.3.1.	Aspectos generales de la pérdida de agua y absorción de aceite en procesos de fritura	41
2.3.2.	Modelado de la pérdida de agua y absorción de aceite en fritura de papa	43
2.3.3.	Modelado de la pérdida de agua y absorción de aceite en fritura de materiales vegetales diferentes a la papa	43
3.	HIPÓTESIS	46
3.1.	Hipótesis nula H_0	46
3.2.	Hipótesis alterna H_a	46
4.	OBJETIVOS	47
4.1.	Objetivo general	47
4.2.	Objetivos específicos	47
5.	METODOLOGÍA	48
5.1.	Localización	48
5.2.	Material vegetal experimental	48
5.2.1.	Operaciones preliminares	49
5.2.1.1.	Limpieza	49
5.2.1.2.	Selección	50
5.2.1.3.	Clasificación	51
5.3.	Determinación de algunas características físicas y bromatológicas de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>)	51
5.3.1.	Determinación de características morfológicas	51
5.3.2.	Determinación de características bromatológicas o químico proximales	52
5.3.3.	Análisis estadístico	53
5.4.	Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>)	53
5.4.1.	Proceso de fritura convencional	53
5.4.2.	Construcción y modelado de la cinética de pérdida de agua	54
5.4.2.1.	Determinación de contenido de agua	54
5.4.2.2.	Construcción de la cinética de pérdida de agua	55
5.4.2.3.	Modelado matemático de la cinética de pérdida de agua	55

5.4.3.	Construcción y modelado de la cinética de absorción de aceite.....	56
5.4.3.1.	Determinación del contenido de aceite	56
5.4.3.2.	Construcción de la cinética de absorción de aceite	57
5.4.3.3.	Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite	57
5.4.4.	Análisis estadístico	58
5.5.	Determinación de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>).....	58
5.5.1.	Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados....	58
5.5.2.	Selección del mejor modelo matemático.....	59
5.6.	Cálculo de la difusividad del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) de los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>).....	59
5.6.1.	Estudio de la transferencia de agua como modelo difusivo	59
5.6.2.	Energía de activación para la cinética de pérdida de agua	60
5.6.3.	Energía de activación para la cinética de absorción de aceite	60
5.6.4.	Análisis estadístico	61
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
6.1.	Determinación de algunas características físicas y bromatológicas de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>)	62
6.1.1.	Características físicas	62
6.1.2.	Características bromatológicas o químico proximales	64
6.2.	Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>).....	65
6.2.1.	Cinética de pérdida de agua.....	65
6.2.2.	Modelado de la cinética de pérdida de agua.....	71
6.2.2.1.	Modelo de Newton	71
6.2.2.2.	Modelo de Henderson-Pabis	72
6.2.2.3.	Modelo de Page.....	73
6.2.3.	Cinética de absorción de aceite	74
6.2.4.	Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite.....	81

6.2.4.1.	Modelo de Monod	81
6.2.4.2.	Modelo de Moyano-Pedreschi	82
6.2.4.3.	Modelo Exponencial de primer orden	83
6.3.	Selección de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos variedades de papa (<i>Solanum phureja</i>)	84
6.3.1.	Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de pérdida de agua	84
6.3.2.	Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de pérdida de agua	90
6.3.3.	Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de absorción de aceite	91
6.3.4.	Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de absorción de aceite	96
6.4.	Determinación de la difusividad del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) requerida en los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>).	98
6.4.1.	Difusividad efectiva del agua	98
6.4.2.	Energía de activación para la cinética de pérdida de agua	100
6.4.3.	Energía de activación para la cinética de absorción de aceite	102
7.	CONCLUSIONES	104
8.	RECOMENDACIONES	105
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
	ANEXOS	117

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Clasificación taxonómica de la papa (<i>Solanum phureja</i>)	26
Tabla 2.2. Composición químico nutricional de la papa (<i>Solanum phureja</i>)	29
Tabla 2.3. Principales zonas productoras de papa criolla (<i>Solanum phureja</i>) en Colombia	30
Tabla 5.1. Análisis químico proximal y minerales	53
Tabla 6.1. Caracterización física de papa de las variedades Ratona Morada y Andina	62
Tabla 6.2. Caracterización químico proximal de papa de las variedades Ratona Morada, Andina y Diacol Capiro	64
Tabla 6.3. Contenido de agua adimensional en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina en función del tiempo durante la fritura convencional a diferentes temperaturas.....	66
Tabla 6.4. Parámetros cinéticos del modelo de Newton para cada temperatura de fritura y variedad de papa	71
Tabla 6.5. Parámetros cinéticos del modelo de Henderson-Pabis para cada temperatura de fritura y variedad de papa	72
Tabla 6.6. Parámetros cinéticos del modelo de Page para cada temperatura de fritura y variedad de papa	73
Tabla 6.7. Contenido de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina en función del tiempo durante la fritura convencional a diferentes temperaturas ...	74
Tabla 6.8. Parámetros cinéticos del modelo de Monod para cada temperatura de fritura y variedad de papa	81
Tabla 6.9. Parámetros cinéticos del modelo de Moyano-Pedreschi para cada temperatura de fritura y variedad de papa	82
Tabla 6.10. Parámetros cinéticos del modelo Exponencial de primer orden para cada temperatura de fritura y variedad de papa	83
Tabla 6.11. Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de pérdida de agua para cada temperatura de fritura y variedad de papa.....	89

Tabla 6.12. Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de pérdida de agua para cada variedad de papa 90

Tabla 6.13. Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada temperatura de fritura y variedad de papa 96

Tabla 6.14. Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada variedad de papa 97

Tabla 6.15. Difusividad efectiva del modelo de Fick para cada temperatura de fritura y variedad de papa 99

Tabla 6.16. Energía de activación del modelo de Arrhenius de la difusividad efectiva para cada variedad de papa..... 101

Tabla 6.17. Energía de activación del modelo de Arrhenius del contenido de aceite en equilibrio para cada variedad de papa 103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Cosecha de la papa (<i>Solanum phureja</i>).....	28
Figura 2.2. Formas de consumo de la papa criolla (<i>Solanum phureja</i>) en Colombia	29
Figura 2.3. Transferencia de calor y de materia durante el proceso de fritura	32
Figura 2.4. Perfiles de temperatura y humedad durante el proceso de fritura.....	34
Figura 6.1. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso.....	67
Figura 6.2. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso.....	68
Figura 6.3. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 140 °C	69
Figura 6.4. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 160 °C	70
Figura 6.5. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 180 °C	70
Figura 6.6. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso	76
Figura 6.7. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso.....	76
Figura 6.8. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura convencional a 140 °C.....	79
Figura 6.9. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura convencional a 160 °C.....	80
Figura 6.10. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura convencional a 180 °C.....	80
Figura 6.11. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 140 °C	85

Figura 6.12. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 160 °C 86

Figura 6.13. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 180 °C 86

Figura 6.14. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 140 °C 87

Figura 6.15. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 160 °C 87

Figura 6.16. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 180 °C 87

Figura 6.17. Valores de contenido de agua calculados y experimentales de la variedad Ratona Morada para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C.. 88

Figura 6.18. Valores de contenido de agua calculados y experimentales de la variedad Andina para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C..... 89

Figura 6.19. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 140 °C..... 91

Figura 6.20. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 160 °C..... 92

Figura 6.21. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 180 °C..... 92

Figura 6.22. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 140 °C..... 93

Figura 6.23. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 160 °C..... 93

Figura 6.24. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 180 °C..... 94

Figura 6.25. Valores de contenido de aceite calculados y experimentales de la variedad Ratona Morada para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C.. 95

Figura 6.26. Valores de contenido de aceite calculados y experimentales de la variedad Andina para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C..... 95

Figura 6.27. Relación de Ln MR con el tiempo de la variedad Ratona Morada para cada temperatura de fritura 98

Figura 6.28. Relación de Ln MR con el tiempo de la variedad Andina para cada temperatura de fritura 99

Figura 6.29. Gráfica de Arrhenius de la influencia de la temperatura con la difusividad del agua para las variedades Ratona Morada y Andina..... 101

Figura 6.30. Gráfica de Arrhenius de la variación del contenido de aceite en equilibrio con la temperatura para las variedades Ratona Morada y Andina 102

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 2.1. La papa “criolla” (<i>Solanum phureja</i>).....	26
Imagen 5.1. Laboratorio de Investigación en Conservación y Calidad de Alimentos	48
Imagen 5.2. Cultivo y recolección de papa (<i>Solanum phureja</i>). Granja Experimental Botana.....	49
Imagen 5.3. Variedades de papa de estudio (<i>Solanum phureja</i>)	49
Imagen 5.4. Limpieza de los tubérculos	50
Imagen 5.5. Selección de los tubérculos.....	50
Imagen 5.6. Clasificación de los tubérculos	51
Imagen 5.7. Caracterización física de los tubérculos	52
Imagen 5.8. Proceso de fritura convencional	54
Imagen 5.9. Determinación del contenido de agua en las rodajas de papa	55
Imagen 5.10. Determinación del contenido de aceite en las rodajas de papa.....	57

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. RESULTADOS FOTOGRÁFICOS DEL PROCESO DE FRITURA.....	118
ANEXO 2. DATOS ESTADÍSTICOS DE LAS PRUEBAS FÍSICAS	119
ANEXO 3. DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA	120
ANEXO 4. DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE.....	126
ANEXO 5. RESULTADOS DEL MODELADO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA	130
ANEXO 6. RESULTADOS DEL MODELADO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE	139
ANEXO 7. DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO AGUA	148
ANEXO 8. DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO DE ACEITE	150
ANEXO 9. DATOS ESTADÍSTICOS DEL MODELADO DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA	152
ANEXO 10. DATOS ESTADÍSTICOS DEL MODELADO DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE	154
ANEXO 11. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN DE LA RAZÓN DE HUMEDAD..	156
ANEXO 12. DATOS ESTADÍSTICOS DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA	159
ANEXO 13. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA	160
ANEXO 14. DATOS ESTADÍSTICOS DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN PARA EL CONTENIDO DE AGUA	161
ANEXO 15. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN DEL CONTENIDO DE ACEITE EN EQUILIBRIO	162
ANEXO 16. DATOS ESTADÍSTICOS DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN PARA EL CONTENIDO DE ACEITE EN EQUILIBRIO	163

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum*), junto con el maíz, el trigo y el arroz; es uno de los principales cultivos agrícolas en el mundo. En Colombia, los cultivares de papa nativa corresponden a las especies *Solanum tuberosum ssp. andigena* y *Solanum phureja*; conocidas como “guatas” y “chauchas o criollas”, respectivamente. La producción de la papa criolla ubica a Colombia en el primer lugar en el mundo, con una importante diversidad en el departamento de Nariño. Sin embargo, estos tubérculos son destinados, en mayor medida, para el consumo en fresco a nivel nacional.

Osorio, Rodríguez, Castellanos, & Chávez (2015) señalan la importancia de la necesidad de alternativas agroindustriales para redirigir los materiales vegetales hacia productos con características organolépticas deseables, más aún cuando es escaso el procesamiento agroindustrial de variedades nativas autóctonas. Lo anterior destaca a la fritura como técnica de procesamiento de alimentos.

Según Cabrera (2013) la fritura es una de las técnicas de preparación de alimentos más empleadas, y consiste en sumergir el alimento en aceite a altas temperaturas y a presión atmosférica. Este proceso desencadena un fenómeno sincrónico de transferencia de calor y de materia; confiriendo a los productos características únicas de aroma y textura. Sin embargo, Ortega & Montes (2014) afirman que durante este proceso, se presentan diferentes transformaciones fisicoquímicas atribuidas a diversos factores, que de no ser controlados de manera adecuada, pueden influir en la calidad del producto final.

El modelado matemático de los procesos es una herramienta útil ya que permite anticipar la estimación del desarrollo de un proceso y, como resultado realizar la optimización y el control integral de los procesos; ahorrando energía, tiempo y costos. Durante el proceso de fritura, la pérdida de humedad y absorción de aceite son los principales fenómenos, los cuales son importantes para diseñar y controlar el proceso.

Dentro de este contexto, el objetivo de este trabajo fue modelar las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite bajo condiciones de fritura a presión atmosférica en rodajas de papa nativa (*Solanum phureja*), de las variedades Ratona Morada y Andina, cultivadas en el departamento de Nariño. Para ello, se determinaron algunas propiedades físicas a los tubérculos (forma, profundidad de ojos, peso, volumen, gravedad específica, diámetro polar y ecuatorial, y color de piel y pulpa) y químico proximales por el método de Bernal (1998) (humedad, materia seca, ceniza, extracto etéreo, fibra cruda, proteína, extracto no nitrogenado, calcio y hierro). Posteriormente, se realizó el proceso de fritura en batch. Cada unidad experimental se constituyó por 5.00 ± 0.05 g de papa. Las rodajas de 2 mm de espesor fueron freídas a tres temperaturas (140, 160 y 180 °C), y tiempos de hasta 150 segundos; empleando una freidora de inmersión de 8 L y aceite de girasol. La relación

producto/aceite se mantuvo constante 1:150 (p/v). La cinética de pérdida de agua se estudió con los modelos de: Newton, Henderson-Pabis y Page y la ley de Fick como modelo difusivo; mientras que la cinética de absorción de aceite se estudió con los modelos de: Monod, Moyano-Pedreschi y un modelo de primer orden. La evaluación de la calidad de ajuste y la selección de los modelos más adecuados se realizó mediante parámetros estadísticos. Igualmente se determinó la difusividad efectiva del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) para ambos fenómenos; empleando el modelo de Fick y la ecuación de Arrhenius, respectivamente.

Los resultados esperados en este trabajo fueron: la caracterización fisicoquímica de los dos materiales objeto de estudio, así como la construcción de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite y su relación con las condiciones de operación del proceso de fritura, los modelos matemáticos que presentan el mejor ajuste sobre los datos experimentales; y la determinación de la difusividad efectiva y la energía de activación y su relación con las condiciones del proceso.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDADES Y PERTINENCIA

1.1. Descripción de la situación

Según Arévalo & Rodríguez (2012) la papa (*Solanum tuberosum*) se considera uno de los principales cultivos agrícolas en el mundo; situándose en el cuarto lugar en importancia después del maíz, el trigo y el arroz (Madroñero, Rosero, Rodríguez, Navia, & Benavides, 2013). Es fuente de proteína, carbohidratos, vitamina C y algunos minerales (Rozo & Ramírez, 2011). En Colombia, además de la especie *Solanum tuberosum*, se siembran las especies *Solanum tuberosum ssp. andigena* y *Solanum phureja*, conocidas como “guatas” y “chauchas o criollas”, respectivamente (Navarro, Bolaños, & Lagos, 2010). Este último conjunto de variedades nativas crece extensamente en los Andes, desde el occidente de Venezuela hasta el centro de Bolivia (Ghislain, Andrade, Rodríguez, Hijmans, & Spooner, 2006). Colombia se considera el primer productor mundial de esta variedad, de la cual se siembran al año, en promedio, 8500 hectáreas y se cosechan cerca de 100 mil toneladas; especialmente en los departamentos de Cundinamarca, Nariño y Boyacá (Arévalo & Rodríguez, 2012); y con un importante centro de diversidad localizado en el departamento de Nariño (Rodríguez, Ñustez, & Estrada, 2009). En 2009, el 10% de la producción de papa en Nariño correspondió a la variedad criolla, cultivada en mayor cantidad en los municipios de Córdoba, Gualmatán, Ipiales, Puerres, El Encano, Pasto, Potosí, Pupiales y Túquerres; con un total de 2051 ha cosechadas (Madroñero et al., 2013).

No obstante, Arévalo & Rodríguez (2012) afirman que el mercado de la papa nativa (*Solanum phureja*) está concentrado, en mayor medida, en el consumo en fresco a nivel nacional; lo anterior debido al predominio de los hábitos de consumo en ese estado (92%), al escaso valor agregado, y al bajo grado de procesamiento industrial (Gómez, 2014; Gómez, 2008). En este sentido, las actividades industriales aportan muy poco al dinamismo del sector (Espinal, Martínez, Pinzón, & Barrios, 2005). Gómez (2014) afirma que la agroindustria se ha responsabilizado de la escasa investigación para generar nuevas presentaciones, pero que no se han dedicado recursos específicos para financiar investigación en procesamiento agroindustrial.

Sumado a lo anterior, varios autores reportan una serie de problemas alrededor de este tubérculo: un periodo de reposo corto, brotación rápida, inadecuado manejo agroecológico, problemas fitosanitarios, pérdidas poscosecha, susceptibilidad a las heladas y los altos costos de producción en los cultivos; asociados con la demanda irracional de insecticidas, fungicidas y fertilizantes (Ramírez, Zárate, & Otálora, 2011; Rivera, Herrera, & Rodríguez, 2003; Santamaría, Montañez, & Sánchez, 2010); los cuales han hecho que los estudios se enfoquen, en mayor medida, en aspectos como: manejo agroecológico, evaluación de

rendimiento y productividad de cultivos y mejoramiento genético para la resistencia a plagas y enfermedades; mas no en la evaluación de la aptitud agroindustrial.

Por otra parte, el consumo mundial de la papa está pasando del producto fresco a los productos alimentarios procesados industrialmente, tales como papa congelada, papa frita, hojuelas, harinas, entre otras (FAO, 2009; Hernandez & Suarez, 2009); lo cual se debe, según Ligarreto & Suárez (2003), a las tendencias de los cambios de hábitos de consumo, influenciados por varios factores, entre los cuales están, la concentración de la población en las grandes ciudades, menor tiempo disponible a las labores del hogar y el elevado costo de la energía para preparar los alimentos.

Lo anterior se torna atractivo para la papa nativa (*Solanum phureja*), cultivada en el departamento de Nariño; donde la diversidad es abundante (Rodríguez et al., 2009). Según Rozo & Ramírez (2011) y Arévalo & Rodríguez (2012), estos tubérculos se destacan por sus cualidades culinarias y características como alto valor nutricional; el doble que la papa común (*Solanum tuberosum*), fuente de carbohidratos y proteínas de alto valor biológico, vitaminas, minerales, agradable sabor y textura, fácil preparación y buena aceptación en el mercado con diversas formas de procesamiento. Es por ello que el procesamiento industrial de la papa nativa (*Solanum phureja*), como producto promisorio, sería una alternativa para la generación de valor agregado; aprovechándose en gran volumen para la agroindustria departamental, más aún cuando es escaso el procesamiento agroindustrial de variedades nativas autóctonas.

Ahora bien, los consumidores han preferido los productos fritos y grasos durante décadas, por su combinación única entre sabor y textura (Gómez, 2012). Lo anterior destaca a la fritura como técnica de procesamiento de alimentos. De acuerdo a Villamizar, Quiceno, & Giraldo (2011) los productos sometidos a fritura adquieren características únicas de aroma y textura; apreciadas por los consumidores, que no se consiguen con otras técnicas de procesamiento de alimentos, además, la fritura permite preservar al alimento mediante la destrucción térmica de los microorganismos y la inactivación de las enzimas (Fellows, 1998; Rimac, Lelas, Rade, & Simundié, 2004; Saguy & Dana, 2003).

Sin embargo, Ortega & Montes (2014) afirman que, como consecuencia de la transferencia de calor desde el aceite hasta el alimento y la transferencia de masa entre el aceite y el alimento, se presentan diferentes transformaciones físicas y químicas durante el proceso de fritura, tales como: pérdida de humedad, migraciones de componentes solubles, absorción de aceite, deformaciones mecánicas, reacciones químicas, desnaturalización de proteína, y finalmente, transformaciones fisicoquímicas de carbohidratos. Cambios que se atribuyen a factores como: la humedad inicial del alimento, la calidad del aceite, la temperatura del proceso y el tiempo de residencia del producto en el aceite caliente (Dobarganes, Márquez-Ruiz, & Velasco, 2000); los cuales influyen en la calidad del producto final si no se controlan adecuadamente.

El modelado matemático es una herramienta básica para diseñar y optimizar los procesos industriales, puesto que permite predecir el desarrollo de un proceso y; en consecuencia, realizar la optimización, el control de la calidad y la mejora de los procesos productivos (Banga, Balsa-Canto, Moles, & Alonso, 2003; Banga & Singh, 1994). De acuerdo a Costa & Oliveira (1999) y Jibaja (2010), para modelar un proceso tan complejo como la fritura, es importante considerar que los principales fenómenos que se producen en la fritura son la remoción parcial o completa del agua y la absorción de aceite. Con ello se logra no sólo desarrollar un modelo para diseñar procesos de fritura sino también para controlarlo (Ortega & Montes, 2014). Asimismo, Jibaja (2010) señala que existen muchos modelos con diferentes grados de complejidad que se han propuesto para describir el mecanismo de pérdida de agua y la consecuente absorción de aceite y que son muy utilizados en el estudio del proceso de fritura.

1.2. Pregunta de investigación

Todos los anteriores aspectos conducen al planteamiento de la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el efecto de la temperatura y el tiempo de fritura sobre el contenido de agua y de aceite durante el proceso de fritura convencional de dos genotipos de papa nativa (*Solanum phureja*), Ratona Morada y Andina?

2. ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN, EL DESARROLLO TECNOLÓGICO O LA INNOVACIÓN

2.1. La papa “criolla” (*Solanum phureja*)



Imagen 2.1. La papa “criolla” (*Solanum phureja*)

Fuente: Este estudio

2.1.1. Generalidades

Es una especie diploide (Zapata, 2006) perteneciente taxonómicamente a la familia Solanácea, serie tuberosa (tabla 2.1), de las cuales Colombia es centro de origen de 4 especies entre las que se destacan comercialmente la *Solanum tuberosum Spp. andigena* y la *Solanum phureja* (papa criolla) (Guerrero & Rivera, 2006). El Grupo conformado por las papas criollas está compuesto por un conjunto de variedades nativas que crecen extensamente en los Andes, desde el occidente de Venezuela hasta el centro de Bolivia (Ghislain et al., 2006), con un importante centro de diversidad localizado en el departamento de Nariño (Rodríguez et al., 2009). La papa criolla se caracteriza por presentar adaptación a días cortos, brotación en el momento de la cosecha y diploidía (Huamán & Spooner, 2002).

Tabla 2.1. Clasificación taxonómica de la papa (*Solanum phureja*)

División	Angiosperma
Clase	Dicotiledónea
Subclase	Metaclamidea
Orden	Tubiflora
Familia	Solanácea
Género	<i>Solanum</i>
Subgénero	Papa
Sección	Pelota
Subsección	Papa
Serie	Tuberosa
Especie	<i>phureja</i>

Fuente: (Bello & Pinzón, 1997)

2.1.2. Morfología de la planta y tubérculos

La planta tiene una altura de sesenta centímetros y posee numerosos tallos delgados de color verde claro, ramificada en la parte baja de donde brotan flores de color lila, blanco o rojo. El tubérculo se caracteriza por ser pequeño, de forma redonda a ovoide y ojos de profundidad media distribuidos por toda la superficie. Tiene matices amarillos y en algunos casos presenta tintes rojos. La planta puede producir hasta cuarenta tubérculos esparcidos en contorno (Gómez, 2014).

2.1.3. Condiciones agroecológicas

Su cultivo se lleva a cabo en altitudes comprendidas entre 2600 y 3500 metros sobre el nivel del mar, con un rango de temperatura promedio de 10 a 20 °C. Adicionalmente, necesita un nivel de precipitaciones promedio de novecientos milímetros por año. Sin embargo, su cultivo puede desarrollarse con un nivel superior. El mejor suelo para el cultivo de la papa criolla debe presentar una textura franca, suelta y profunda que evita la acumulación de humedad en la raíz, y un pH entre 5.2 y 5.9, además de un alto contenido de materia orgánica (Cevipapa, 2008). Gómez (2014) señala que la vida útil como producto fresco es de pocos días una vez se ha realizado la recolección del producto, debido a que presenta una rápida brotación o germinación y su ciclo vegetativo fluctúa en un periodo entre cuatro y cinco meses.

FAO (2009) y Hernandez & Suarez (2009) reportan que las épocas de siembra dependen de las condiciones climáticas, especialmente lluvias y frecuencia de heladas. En el primer semestre se realiza la siembra de Año Grande (50% del área sembrada), que comprende los meses de enero a marzo, y en el segundo semestre la siembra de Mitaca (30% del área), comprendida entre los meses de junio a agosto. En el resto del año se realizan siembras escalonadas en microclimas favorables.

2.1.4. Cosecha

Se realiza en condiciones que eviten el deterioro del producto cuando la papa alcance su madurez fisiológica, la cual es manifestada por la muerte natural del follaje y la interrupción de la traslocación de carbohidratos. La cosecha manual (figura 2.1) es la más común en terrenos minifundistas de ladera y páramo (Gómez & Ramirez, 1999).

Asimismo, Gómez & Ramirez (1999) señalan que la cosecha está determinada por las características que el mercado exija, por lo cual se utilizan algunos índices de madurez: a) Índice cronológico: por la precocidad frente a la papa común (150-240 días), la papa criolla fluctúa entre 120 y 135 días, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar en la que se realice el cultivo. b) Índice fisiológico: identificado por el amarillamiento o secamiento del follaje. c) Índice con base en el contenido de azúcares reductores: el cual es menor cuando el follaje está completamente muerto, y se lo determina por el método de la glucocinta

(cinta de prueba de glucosa). d) Índice con base en el contenido de materia seca: siendo mayor cuando el cultivo llega a su desarrollo final. e) Índice de madurez física: cuando la papa presenta firmeza de la piel en todos los tubérculos determinada por muestras aleatorias en campo.



Figura 2.1. Cosecha de la papa (*Solanum phureja*)

Fuente: (Guerrero & Rivera, 2006)

2.1.5. Poscosecha

El acondicionamiento de la papa criolla una vez cosechada comienza desde la misma finca con: a) limpieza del material extraño, especialmente tierra. Seguidamente b) la selección, teniendo como criterio los daños por plagas, enfermedades, daños mecánicos, daños fisiológicos y deformaciones; c) lavado con manguera en estanques, costales, canastillas y posterior secado al ambiente y d) la clasificación tomando como parámetros el tamaño, peso, color forma y sanidad del producto destinado a los mercados locales (Gómez & Ramirez, 1999).

2.1.6. Almacenamiento

El tiempo máximo de duración que admite la papa criolla fluctúa entre 5 y 8 días, debido a que los tubérculos tienen una rápida brotación, lo que origina pérdidas en su calidad comercial (FAO, 2009; Hernandez & Suarez, 2009).

2.1.7. Composición químico-nutricional

Según Roza & Ramírez (2011) y Arévalo & Rodríguez (2012), este tubérculo además de destacarse por sus cualidades culinarias, posee un alto valor nutricional; el doble que la papa común (*Solanum tuberosum*). Es fuente de carbohidratos y proteínas de alto valor

biológico, vitaminas, minerales (tabla 2.2), agradable sabor y textura, fácil preparación y buena aceptación en el mercado con diversas formas de procesamiento.

Tabla 2.2. Composición químico nutricional de la papa (*Solanum phureja*)

Datos: (por 100 mL o g de porción comestible)			
Componente	Cantd.	Componente	Cantd.
Agua (g)	75.5	Sodio (mg)	
Proteínas (g)	2.5	Potasio (mg)	
Grasas (g)	0.1	Calcio (mg)	7.0
Cenizas (g)	1	Fósforo (mg)	54
Fibra dietética (g)		Hierro (mg)	0.6
Carbohidratos totales (g)	20.9	Zinc (mg)	
Carbohidratos disponibles (g)		Vitamina A (µg)	6.0
Energía (kcal)	95	β- caroteno (µg)	
Ácidos grasos saturados (g)		Tiamina (mg)	0.08
Ácidos grasos monoinsaturados (g)		Riboflavina (mg)	0.06
Ácidos grasos poliinsaturados (g)		Niacina (mg)	2.5
Colesterol (mg)		Vitamina C (mg)	15

Fuente: (Guerrero & Rivera, 2006)

2.1.8. Situación en Colombia

Arévalo & Rodríguez (2012) afirman que el mercado de la papa criolla (*Solanum phureja*) está concentrado mayormente en el consumo en fresco a nivel nacional (figura 2.2), lo anterior debido al predominio de los hábitos de consumo en ese estado (92%), al escaso valor agregado y el bajo grado de procesamiento industrial (Gómez, 2014; Gómez, 2008).

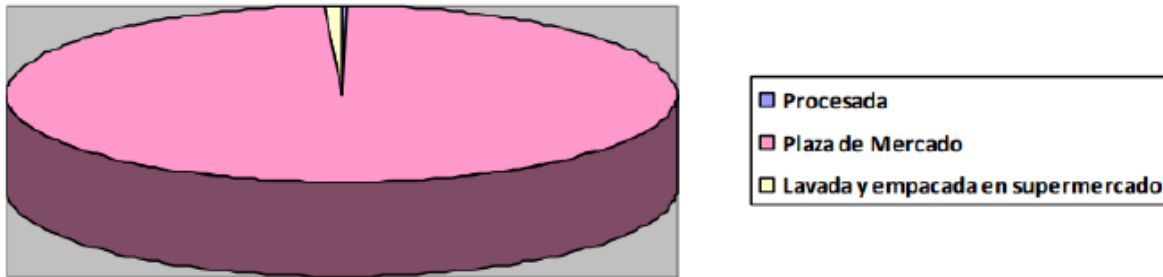


Figura 2.2. Formas de consumo de la papa criolla (*Solanum phureja*) en Colombia

Fuente: (Gómez, 2014)

De igual manera, Arévalo & Rodríguez (2012) señalan que en términos generales, la agroindustria de papa criolla en Colombia apenas está en expansión, siendo aproximadamente 10 empresas las que se dedican a transformación industrial. Por su parte, Gómez (2014) afirma que la agroindustria se ha responsabilizado de la poca investigación para generar nuevas presentaciones, pero que no se han dedicado recursos específicos para financiar investigación en procesamiento agroindustrial. Sumado a lo anterior, el

abastecimiento de tubérculo se ve afectado por los requerimientos de calidad para procesamiento que demanda la industria que no son fáciles de cumplir por parte de los productores, por lo que un alto volumen del tubérculo es rechazado debido a su corta vida útil, lo cual hace que el almacenamiento sea complicado. Adicionalmente, la comercialización y procesamiento del producto se debe realizar en el menor tiempo posible, ya que la rápida brotación y el manchado afectan considerablemente su calidad y características fisicoquímicas; lo cual ha ocasionado pérdidas poscosecha superiores al 21% (Gómez, 2014; Guerrero & Rivera, 2006).

Guerrero & Rivera (2006) afirman que hasta ahora los esfuerzos que se han dedicado para mejorar el sistema de productividad de la papa, ya sea en investigación o en asignación de recursos para el desarrollo, ha sido muy bajo y lo poco que se ha privilegiado se hace de manera exclusiva a la problemática del cultivo y desde un punto de vista puramente agronómico, no contemplando suficientemente una visión de cadena productiva que provea a su vez una visión articuladora de los procesos de producción, comercialización, procesamiento, y conservación.

2.1.9. Producción en el departamento de Nariño

Colombia se considera el primer productor mundial de papa criolla, de la cual se siembran al año, en promedio, 8500 hectáreas, lo cual representa aproximadamente el 6% del área total de papa sembrada y, se cosechan cerca de 100 mil toneladas, especialmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño (Arévalo & Rodríguez, 2012; Ñustez., 2011; Villareal, 2011), como se muestra en la tabla 2.3.

En 2009, el 10% de la producción total de papa en Nariño correspondió a la variedad criolla, la cual se cultiva en mayor cantidad en los municipios de Córdoba, Gualmatán, Ipiales, Puerres, El Encano, Pasto, Potosí, Pupiales y Túquerres, con un total de 2051 ha cosechadas (Madroñero et al., 2013). En este departamento las zonas de producción se encuentran ubicadas entre los 2700 y 3200 msnm, donde las condiciones climáticas favorables durante casi todo el año, permiten desarrollar cultivos escalonados (Peña, 2000).

Tabla 2.3. Principales zonas productoras de papa criolla (*Solanum phureja*) en Colombia

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO
Cundinamarca	Bojacá, Cajicá, Cáqueza, Chipaque, Choachí, Chocontá, El Rosal, Facatativá, Fosca, Granada, Guasca, Madrid, Mosquera, Pacho, Sibaté, Soacha, Subachoque, Suesca, Ubaque, Une, Villapinzón, Zipacón, Zipaquirá
Boyacá	Aquitania, Belén, Boyacá, Buenvista, Cerinza, Ciénaga, Cómbita, Gachantiva, Jenesano, Monguí, Motavita, Paipa, Ramiriquí, Samacá, Santa Rosa de Viterbo, Siachoque, Sogamoso, Soracá, Turmequé, Toca, Tota, Tunja, Úmbita, Ventaquemada, Viracachá
Nariño	Catatumbo, Contadero, Córdoba, Cumbal, Gualmatán, Guachucal, Ipiales, La Victoria, Pasto, Potosí, Puerres, Pupiales, Santander,

	Túquerres
Antioquia	Abejorral, Carmen del Viboral, Granada, Guarne, La Unión, Marinilla, Santuario, San Vicente, Santa Rosa de Osos, Sonsón
Cauca	Jambaló, Puracé, Silvia, Sotorá, Toronto
Norte de Santander	Cácota, Opitaga, Mustiscua, Pamplona, Silos
Tolima	Murillo, Cajamarca, Santa Isabel, Roncesvalles

Fuente: (Gobernación de Cundinamarca & Fedepapa, 2009)

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Fritura convencional de alimentos

2.2.1.1. Generalidades

Desde hace cientos de años, la fritura se ha utilizado como un método de preparación y conservación de alimentos. No obstante, es desde la primera mitad del siglo XX cuando se empiezan a describir una serie de complejos cambios físicos y químicos que ocurren durante el proceso de fritura. Asimismo, la implementación de su aplicación en la industria de alimentos surge como una necesidad de conocer, controlar y optimizar las distintas variables que influyen en el proceso (Badui, 2006; Stier, 2004).

La fritura se puede definir como el proceso de cocción de alimentos por inmersión en un aceite o grasa a una temperatura superior al punto de ebullición del agua, normalmente comprendida entre 150 y 200 ° C y a presión atmosférica (Cabrera, 2013; Krochhar & Gertz, 2004; Rahman, 2003).

Durante el proceso de fritura se presentan grandes cambios físicos, químicos y nutricionales en el alimento; que dependen, entre otros factores, de la humedad y del tipo de alimento, de la calidad de aceite utilizado y de la temperatura del proceso, así como del tiempo de residencia del producto en el aceite caliente (Dobarganes et al., 2000; Moreira, 2001).

Según Fellows (1998) y Rimac et al. (2004), la gran trascendencia en el uso de la fritura se debe principalmente a que los alimentos adquieren características únicas de aroma y textura que no se consiguen con otras técnicas de procesamiento de alimentos. Además de los cambios organolépticos, se logra la preservación del alimento como resultado de la destrucción de los microorganismos e inactivación de las enzimas por acción del calor, y la reducción de la actividad acuosa, cuando se lo procesa en finas rodajas.

Existen dos tipos de fritura: por contacto, la cual es muy favorable para los alimentos de relación superficie/volumen adecuada, como huevos o hamburguesas, y presentan irregularidades en el color; y por inmersión, donde el alimento se somete al mismo tratamiento térmico en toda su superficie, logrando uniformidad en el color y aspecto (Fellows, 1998). La fritura por inmersión es más importante a escala industrial, puesto que los alimentos pueden conservarse hasta doce meses a temperatura ambiente; mientras que,

en la fritura por contacto, presentan una vida útil relativamente corta (Fellows, 1998; Rahman, 2003).

2.2.1.2. Transferencia de calor y de materia

Durante el proceso de fritura, la diferencia de temperatura entre el alimento y el aceite desencadena un proceso sincrónico de transferencia de calor y de materia (Moreira, 2001; Vitrac, Trystram, & Raoult-Wack, 2000).

La transferencia de calor se realiza mediante dos mecanismos, como se muestra en la figura 2.3: convección, la cual ocurre entre el aceite caliente y la superficie del alimento; y conducción, que tiene lugar desde la superficie hacia el interior del alimento (Aguilera, 1997; Moreira, 2001).

La transferencia de materia se caracteriza por la pérdida de agua, del alimento al aceite, en forma de vapor y la absorción de aceite, flujos que operan en contracorriente, impulsados por la transferencia de calor del aceite al alimento (Aguilera, 1997).

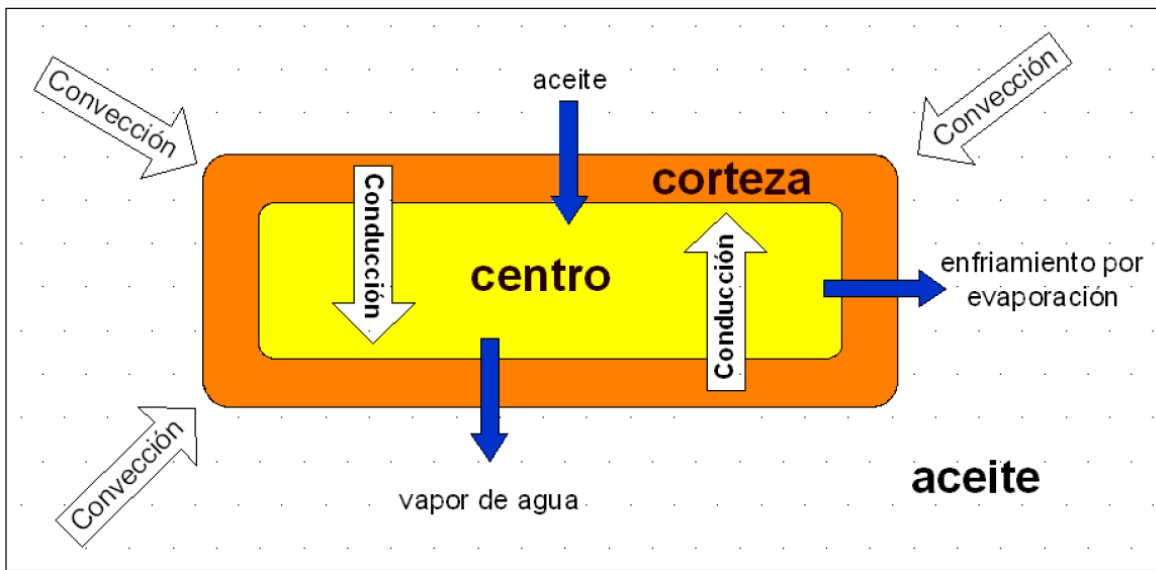


Figura 2.3. Transferencia de calor y de materia durante el proceso de fritura

Fuente: (Aguilera, 1997)

Dobarganes et al. (2000) señalan que, como resultado de los dos fenómenos de transferencia, el producto final exhibe dos regiones características: la costra o superficie deshidratada, donde se producen los principales cambios, y el interior del alimento, donde la temperatura no supera la temperatura de ebullición del agua.

La temperatura y el tiempo de fritura son los principales parámetros que influyen en la pérdida de agua y la absorción de aceite. Sin embargo, otros parámetros que se consideran

en el proceso son la forma del alimento y la relación entre el tamaño del producto y la superficie expuesta al medio circundante (Dobarganes et al., 2000; Moreira, 2001).

a. Cinética de pérdida de agua

Según Farkas, Singh, & Rumsey (1996) y Stier (2004), cuando el alimento ingresa en el aceite caliente, el calor de éste se transfiere al alimento, el cual rápidamente se calienta y cuando el agua alcanza su punto de ebullición empieza a evaporarse y pasa al aceite, por lo cual, la fritura se puede considerar como un proceso de deshidratación y el comportamiento de la cinética de transferencia de agua se describe como tal, distinguiéndose 3 etapas:

La etapa de calentamiento del alimento, se inicia con la inmersión del alimento en el aceite caliente y finaliza al alcanzar, la superficie del alimento, la temperatura de ebullición del agua superficial. Esta etapa tiene una duración muy corta, se caracteriza porque no hay presencia de burbujas de vapor. También se denomina etapa de velocidad de secado creciente (Farkas et al., 1996).

La etapa de velocidad de secado constante, donde la cantidad de calor transferido es suficiente para que el agua superficial del alimento alcance el punto de ebullición y se evapore muy rápidamente, debido al aumento del coeficiente de transferencia de calor por convección; el cual, a su vez, incrementa el calor transferido, observándose una explosión de burbujas de vapor. Es una etapa muy breve e incluso inapreciable, y donde empieza a formarse la costra en la superficie del alimento (Aguilera, 1997).

La etapa de velocidad decreciente, es la de mayor duración. Como lo muestra la figura 2.4, la temperatura del interior del alimento se acerca al punto de ebullición del agua y donde se elimina la mayor cantidad de ésta del interior, mientras que la temperatura de la corteza se aproxima a la del aceite caliente y la humedad se reduce a niveles muy bajos (Aguilera, 1997; Farkas et al., 1996). Dada la baja conductividad térmica de la costra y su continuo aumento de espesor, disminuye la transferencia de calor en la interfase costra - interior del alimento y, por ende, la salida de agua del interior del alimento. El fin de esta etapa se identifica por la ausencia total de burbujas de vapor del alimento (Aguilera, 1997; Farkas et al., 1996).

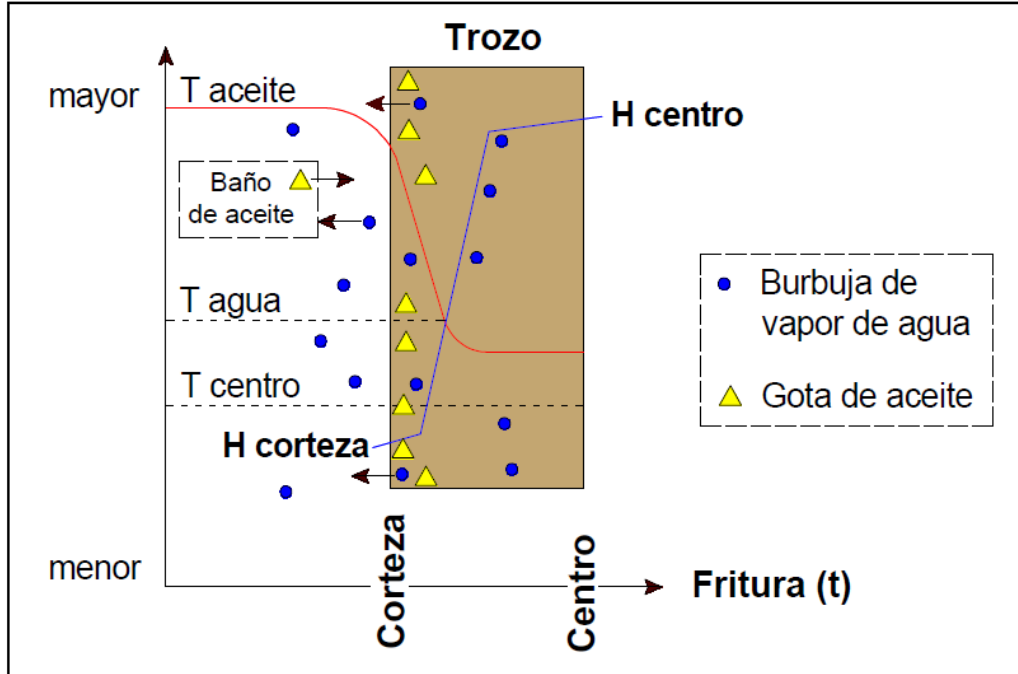


Figura 2.4. Perfiles de temperatura y humedad durante el proceso de fritura

Fuente: (Aguilera, 1997)

b. Cinética de absorción de aceite

La cinética de absorción de aceite comienza cuando la temperatura del producto se incrementa y empieza a formarse la costra. El contenido de aceite aumenta mientras transcurre el tiempo de fritura y se concentra principalmente en el área cercana a la superficie del alimento (Costa & Oliveira, 1999; Moreira, Palau, & Sun, 1995).

Varios autores citados por Jibaja (2010) señalan que la mayor retención de aceite tiene lugar cuando se retira el alimento del medio de fritura y empieza el período de enfriamiento, debido a que la presión de vapor disminuye y produce un efecto de succión, ayudando a que el aceite depositado en la superficie atraviese la costra e ingrese al interior del alimento. Esto dependerá, además, de las propiedades de permeabilidad de la costra formada en la superficie del alimento (Vitrac et al., 2000).

2.2.2. Modelado matemático del proceso de fritura

2.2.2.1. Generalidades

Un modelo matemático es la representación de un sistema real, que describe sus propiedades y características en términos de variables matemáticas y operaciones. Un modelo permite simplificar la complejidad de parámetros en un proceso y disminuir el número de experimentos, como resultado se logra ahorrar, en términos de energía, tiempo y

costos de operación, asimismo, permite extrapolar los resultados hacia regiones inexploradas (Sablany, Datta, Rahman, & Mujumdar, 2006).

Actualmente, el modelado matemático de los procesos industriales es una herramienta básica en los nuevos sistemas de producción, puesto que permite estimar con anticipación el desarrollo del proceso y, en consecuencia, la posterior optimización, mejora y control integral del mismo (Banga et al., 2003; Banga & Singh, 1994), además del control de la calidad del producto final. La modelización de procesos se hace especialmente difícil cuando se trabaja con productos biológicos, dado su carácter heterogéneo, complejo y delicado (Chou & Chua, 2001).

Cuando se selecciona un modelo matemático que permita describir un proceso, es importante tener en cuenta factores como: la veracidad, la exactitud, la reproductibilidad, el costo, el tiempo, la complejidad y la posibilidad de aplicación (Banga et al., 2003; Banga & Singh, 1994; Cueto, García, & Cepeda, 2007; Himmelblau & Bischoff, 1992).

2.2.2.2. *Construcción del modelo*

Con el fin de modelar un proceso tan complejo como la fritura y controlar la calidad final del producto final, es importante considerar que el principal objetivo de la fritura por inmersión es la remoción parcial o completa del agua y la absorción de aceite en los poros del alimento que ocurre a nivel superficial. Por lo anterior, la predicción de la pérdida de agua y la absorción de aceite en el producto final son los aspectos más importantes para modelar y controlar el proceso (Costa & Oliveira, 1999).

En el modelado de la fritura y de cualquier otro proceso se identifican los siguientes puntos:

- *Identificación de las resistencias controlantes.* En primer lugar, se debe identificar si la transferencia de calor o de materia controlan la velocidad del proceso. Cuando ambas resistencias sean significativas, se debe incluir ecuaciones que consideren la transferencia simultánea (Blasco, Garcia-Pérez, Bon, Carreres, & Mulet, 2006; Mulet, 1994).
- *Selección del mecanismo de transferencia de materia.* Existen diferentes teorías que pretenden explicar la pérdida de agua y la absorción de aceite. Una de las más utilizadas es la teoría difusional, que intenta explicar la pérdida de agua mediante leyes físicas. También se pueden utilizar modelos empíricos sin ningún fundamento físico, en el caso de la absorción de aceite, cuyo único objetivo es la descripción e identificación de las variables más relevantes del proceso y no intentar explicar el mismo (Mulet, 1994).
- *Obtención de las ecuaciones matemáticas.* Una vez se selecciona la teoría, se obtienen las ecuaciones matemáticas que describirán el proceso, para ello, se asumen con frecuencia una serie de hipótesis que pueden estar relacionadas con la homogeneidad e

isotropía del sólido o con sus variaciones de volumen durante el secado (Blasco et al., 2006; Mulet, 1994).

- *Determinación de las propiedades del material.* Los modelos pueden presentar propiedades inherentes de los materiales que deben ser identificadas de manera experimental, como las físicas y estructurales (Singh, Farkas, & Rumsey, 1996).
- *Resolución de las ecuaciones matemáticas.* En función del objetivo de la modelización, se pueden plantear modelos con diferentes grados de complejidad en la resolución. Según las ecuaciones planteadas, se pueden utilizar métodos de resolución que pueden ser analíticos, numéricos o de elementos finitos (Crank, 1975; Ngadi, Watts, & Correia, 1997; Simal, Rosselló, Berna, & Mulet, 1998).
- *Validación del modelo.* Luego de resolver el modelo, es necesaria su validación para demostrar su fiabilidad. Para ello, una manera es extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones experimentales y ver la capacidad de ajuste del modelo en esas condiciones (Bon, Simal, Rosselló, & Mulet, 1997).

2.2.2.3. *Modelado de la pérdida de agua*

En el proceso de fritura se exhiben dos fenómenos importantes, la pérdida de agua y la absorción de aceite en el producto. Sin embargo, los estudios que se han realizado se enfocan, en su mayoría, en el modelado de la pérdida de agua (Garayo & Moreira, 2002; Yamsaengsung & Moreira, 2002).

i. Modelos empíricos

Los modelos matemáticos que se basan en la observación se denominan empíricos, los cuales, tienen como base los datos experimentales que servirán para construir el modelo que posteriormente describirá el proceso real. Los modelos empíricos no intentan describir cómo ocurre el proceso, su único objetivo es la descripción e identificación de las variables más relevantes del mismo. Estos modelos son útiles con fines de diseño, especialmente cuando los problemas que se van a resolver son tremendamente complejos (Blasco et al., 2006; Mulet, 1994; Sablany et al., 2006). Para el caso de la fritura se han propuesto diversos modelos empíricos para describir los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite como los que se describen a continuación.

Gamble, Rice, & Selman (1987) estudiaron la relación existente entre la pérdida de agua y la absorción de aceite en función de la temperatura del aceite para fritura de láminas de patatas a manera de *chips*. Para ello, establecieron una relación entre los valores de contenido de agua y de contenido de aceite y cada una de las temperaturas ensayadas, con la raíz cuadrada del tiempo de fritura (ecuación 01), asumiendo una relación lineal:

$$X = a - b t^{1/2} \tag{01}$$

Dónde: X : contenido de humedad (g/100 g bh), al tiempo t (s); t : tiempo de fritura (s); a , b : constantes.

Baumann & Escher (1995) propusieron un modelo exponencial (ecuación 02) para la descripción de la deshidratación del tipo:

$$W = a e^{-b t} \quad (02)$$

Dónde: W : humedad (g/g bs); t : tiempo de fritura (s); a y b : constantes.

Krokida, Oreopoulou, & Maroulis (2000), empleando una ecuación cinética de primer orden, relacionaron la pérdida de agua y la absorción de aceite en función del tiempo de fritura para modelar este proceso. Asumiendo que la temperatura del aceite permanece constante; la concentración inicial de agua es uniforme en el producto y el flujo de agua es independiente del flujo de aceite en el alimento. En el caso de la pérdida de agua, a tiempo cero, la humedad es X_0 y el contenido de aceite es nulo. La determinación de sus parámetros se realizó aplicando una regresión no lineal (ecuación 03).

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = e^{(-k_x t)} \quad (03)$$

Dónde: t : tiempo (s); W : contenido de agua (g/g bs), al tiempo t ; W_e : contenido de agua (g/g bs), en el equilibrio; W_0 : contenido de agua inicial (g/g bs); k_x : constante de relación de pérdida de agua (s^{-1}).

ii. Modelos difusionales

La teoría difusional fue desarrollada por Lewis en 1921 y, posteriormente, por Sherwood en 1929. Este tipo de modelos son de fácil formulación y, normalmente, arrojan resultados razonables. Su principal inconveniente radica en las suposiciones que se consideran para poder resolverlo. Los procesos de fritura por inmersión y de secado son muy semejantes, por lo cual las ecuaciones básicas que gobiernan la transferencia de masa y de energía son las mismas (Mulet, 1994; Simal et al., 1998).

Simal et al. (1998) obtuvieron la ecuación (04) de gobierno del problema de transferencia de materia para una geometría de lámina infinita, a partir de la ley de Fick, realizando un balance de materia en un volumen de control:

$$\frac{\partial W_p(x,t)}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 W_p(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (04)$$

Dónde: W_p : humedad (g/g bs); D_{eff} : difusividad efectiva ($m^2 s^{-1}$); x : distancia desde el plano de simetría en la dirección de la geometría de lámina infinita (m); t : tiempo (s).

De acuerdo a Simal et al. (1998), para describir la evolución de la humedad en un punto del sólido, se asume que el material es homogéneo e isotrópico y que la difusividad efectiva se mantiene constante. La ecuación (04) se puede resolver de manera analítica utilizando el método de separación de variables (ecuación 05), considerando que: el volumen y el coeficiente de difusión de la muestra permanecen constantes durante el proceso; la humedad crítica de la muestra es su humedad inicial; la humedad en la superficie corresponde al equilibrio con el medio; la concentración de humedad se expresa de forma adimensional (Ψ):

$$\Psi = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} \quad (05)$$

Realizando la integración para el volumen considerado se obtienen valores promedio en el producto (ecuación 06):

$$\Psi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff}}{4l^2} t \right] \quad (06)$$

Dónde: W : humedad al tiempo t (g/g bs); t : tiempo (s); W_0 : humedad crítica que se considera igual a la humedad inicial; W_e : humedad en el equilibrio; l : semi espesor de la lámina (m).

Math, Velu, Nagender, & Rao (2004) y Budzaki & Segura (2005) determinaron el coeficiente de difusividad para describir el mecanismo de transporte del agua. Para ello, consideraron que el espesor de una lámina de alimento es significativamente menor que su diámetro, y utilizaron la resolución de la ley de Fick para una geometría de lámina infinita, correspondiente a la ecuación (06), considerando D_{eff} como constante. Adicionalmente, asumieron que la humedad en el equilibrio es cero y consideraron un solo término del desarrollo en serie; obteniendo, entonces, la ecuación (07).

$$\frac{W}{W_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 D_{eff}}{4l^2} t \right) \quad (07)$$

El efecto de la temperatura en el coeficiente de difusión, es descrito utilizando una relación tipo Arrhenius (ecuación 08):

$$D_{eff} = D_0 e^{\left(- \frac{E_a}{RT} \right)} \quad (08)$$

Dónde: E_a : energía de activación (kJ/mol); R : constante universal de los gases (8.314 J/K mol); T : temperatura absoluta (° K); D_0 : factor pre-exponencial (m^2/s).

iii. Modelos de frente de recesión

En los modelos de frente de recesión o frontera móvil, se considera que existe una interfase móvil agua - vapor de agua. En este tipo de modelos, debido a la formación de la corteza en el alimento, se considera que la fritura debe ser estudiada de manera similar a otros procesos tales como: la congelación del agua, la fusión del hielo y la fusión de metales, donde se presenta dicha interfase (Singh, 2000).

Farkas et al. (1996) desarrollaron un sistema de ecuaciones matemáticas para modelar la transferencia de calor y de masa en el proceso de fritura por inmersión, con el fin de predecir perfiles de humedad y temperatura y el espesor de la corteza que se forma. Para realizar su estudio emplearon un alimento homogéneo e isotrópico, considerándolo como una lámina infinita por su forma y tamaño. Además, supusieron lo siguiente: la composición inicial de la región interna estaba compuesta de agua líquida, material sólido y una cantidad insignificante de gas; la corteza estaba compuesta de vapor de agua, aceite, material sólido y una cantidad insignificante de agua líquida; la energía se transmitía principalmente por conducción y convección; y la cantidad de aceite que ingresaba al alimento es despreciable. Todos los flujos de masa y energía eran perpendiculares a la superficie del material y sus propiedades cambiaban sólo en esa dirección.

El flujo del agua líquida fue modelado y resuelto usando la teoría de difusión, considerando que la difusividad era constante.

Farid & Chen (1998) desarrollaron un modelo con base en teorías y experiencias de la solidificación y fusión de materiales. Para describir la transferencia de calor durante la fritura tuvieron en cuenta dos zonas en el producto separadas por una interfase, y resolvieron el modelo por el método de las diferencias finitas.

Tangduangdee, Bhumiratana, & Tia (2003) aplicaron el modelo mencionado anteriormente para describir la transferencia de materia en la fritura de alimentos compuestos. Por su parte, Farid (2001); Farid (2002) y Smith & Farid (2004) buscaron optimizar el modelo para aplicarlo al proceso de fritura.

iv. Modelos que consideran la estructura

Yamsaengsung & Moreira (2002), considerando los cambios físicos, hicieron una correlación entre los cambios estructurales del alimento con los fenómenos de transferencia de masa y calor que ocurren en los procesos de fritura de *chips* de tortilla y de enfriamiento después de la fritura. Para ello, asumieron que el material es higroscópico y constituye seis fases: agua libre y ligada, vapor, aire, aceite y la matriz sólida. Desarrollaron un modelo de medio poroso multifase al considerar la variación del volumen del producto con base en las

ecuaciones de transporte de masa y energía para ese medio y para cuantificar el cambio estructural se utilizaron correlaciones semi-empíricas.

Las relaciones toman como punto de partida, las definiciones de porosidad y de saturación, y del hecho de que, durante la fritura de un medio poroso, el transporte de materia se da por la difusión del vapor y del aire, por capilaridad del líquido (agua y aceite), y por diferencia de presión de líquido, vapor y aire. El modelo matemático que se propuso para describir la transferencia de masa durante la fritura es un complejo conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, no lineales. El modelo fue resuelto utilizando la técnica de los elementos finitos (Yamsaengsung & Moreira, 2002).

2.2.2.4. *Modelado de la absorción de aceite*

El modelado de la cinética de absorción de aceite se realiza conjuntamente con el modelado de la pérdida de agua, para la mayoría de autores, utilizando métodos similares. Generalmente, se realiza con métodos empíricos, debido a la falta de conocimiento del mecanismo de transferencia que ocurre, principalmente en la etapa de enfriamiento (Garayo & Moreira, 2002).

Así, Gamble et al. (1987) aplicaron un método empírico que relacionaba la absorción de aceite en función de la raíz cuadrada del tiempo de fritura, utilizando la ecuación (01), descrita anteriormente.

Moreira et al. (1995); Krokida et al. (2000) y Budzaki & Segura (2005), para modelar este proceso, consideraron la absorción de aceite en función del tiempo de fritura y aplicaron una ecuación cinética de primer orden, como se describe en la ecuación (09). Al momento de plantear el modelo asumieron que: la temperatura del aceite permanece constante, el flujo de agua en el alimento es independiente del flujo de aceite y a tiempo cero el contenido de aceite es nulo. La determinación de sus parámetros se realizó aplicando una regresión no lineal.

$$Y = Y_e [1 - e^{(-ky t)}] \tag{09}$$

Dónde: Y : contenido de aceite (kg/kg bs), al tiempo t (s); Y_e : contenido de aceite (kg/kg bs), en el equilibrio o máximo contenido; ky : constante de relación de absorción de aceite (s^{-1}).

Moyano & Pedreschi (2006) consideraron dos modelos empíricos, uno basado en la cinética de primer orden, mostrado en la ecuación (09), y otro a partir de la ecuación (10):

$$Y = \frac{Y_e ky t}{1 + ky t} \tag{10}$$

Los resultados mostraron que hubo un buen ajuste entre los valores experimentales y los calculados para el contenido de aceite. Sin embargo, para Moyano & Pedreschi (2006), la ecuación (10) ajusta mejor los datos para el máximo contenido de aceite.

Según Nielsen (2004), el modelo de Monod describe cinéticas de absorción de aceite y su representación gráfica es muy semejante al comportamiento que presentan los datos experimentales de absorción de aceite; este modelo es conocido como la hipérbola rectangular y se representa con la ecuación (11):

$$Y = \frac{a t}{b+t} \quad (11)$$

Dónde: Y : cantidad de aceite (kg/kg bs) al tiempo t (s); a , b : constantes.

Chen & Moreira (1997) aplicaron un modelo difusivo para *chips* de tortilla y señalaron que la difusión del aceite en el producto presentó valores muy bajos durante el proceso de fritura.

Bouchon & Pyle (2005) emplearon un modelo basado en las fuerzas capilares y las diferencias de presión para describir la absorción de aceite durante el enfriamiento posterior al proceso de fritura.

2.3. Antecedentes del tema

2.3.1. Aspectos generales de la pérdida de agua y absorción de aceite en procesos de fritura

Aguilera (1997); Demirkol, Ferruh, & Koray (2006) y Kozempel, Tomasula, & Craig (1991) determinaron que cuanto mayor es el contenido de humedad de los productos alimenticios sometidos al proceso de fritura por inmersión, mayor es la absorción de aceite, y se presume que, cuanto menor contenido de humedad, especialmente en las capas externas del producto, hay una menor evaporación de agua y consecuentemente menor porosidad interna en la que se sitúa el aceite absorbido.

Lamberg (1990) determinó que el contenido de humedad en la superficie del alimento podría ser el parámetro crítico en la absorción de aceite en tajadas de papa frita. Se evidenció menor absorción de aceite en la superficie a medida que disminuía la humedad en muestras sometidas a operaciones de escaldado y secado hasta humedades comprendidas entre 1.1 y 2.86%.

Costa & Oliveira (1999) mencionan que la pérdida de agua no es uniforme en el producto, ya que ocurre primero en la superficie y, según transcurre el calentamiento, gradualmente, seguirá al interior del mismo. Moreira (2001) consideró que la difusión es el principal mecanismo de transferencia de agua durante el proceso de fritura, asimismo,

asumió que la difusividad se mantiene constante y resolvió el modelo propuesto aplicando la técnica de diferencias finitas.

Baumann & Escher (1995) exponen que al aumentar la temperatura, la velocidad de pérdida de agua se incrementa, reduciéndose el tiempo de fritura.

Moreira et al. (1995) observaron que mientras transcurre el tiempo de fritura, el contenido de aceite en la superficie del alimento (en su caso en tortillas de maíz), se incrementaba, especialmente en el período de enfriamiento y que está regido por fuerzas capilares.

Asimismo, Garayo & Moreira (2002) observaron que durante los primeros 150 s del proceso, el contenido de aceite aumentaba con el tiempo a todas las temperaturas ensayadas en *chips* de patata, siendo mayor cuanto mayor era la temperatura. No obstante, se determinó que la temperatura del aceite no afecta el contenido final del mismo. Por ello sugieren que el contenido final de aceite depende del tiempo de fritura, más que de la temperatura, ya que cuando la temperatura del aceite disminuye y se quiere lograr un mismo nivel de humedad final se debe aumentar el tiempo de fritura.

Por su parte, Gamble et al. (1987) reportaron que el contenido de aceite no estaba relacionado de manera directa con la temperatura, sino más bien, con la humedad residual del alimento. Así, Moreira et al. (1995) demostraron que la mayor retención de aceite en el producto se presenta cuando la mayor cantidad de agua ha salido del mismo. Por el contrario, Shyu & Hwang (2001) y Shyu, Hau, & Hwang (2005) observaron que el contenido de aceite aumentaba con la temperatura y tiempo de fritura en *chips* de manzana y zanahoria, respectivamente. No obstante, acuerdan también en que el contenido en aceite parece estar relacionado con el contenido de humedad final.

Yamsaengsung & Moreira (2002) encontraron, además, que la temperatura a la que se enfría el producto afecta el contenido de aceite. Para lo cual, sugiere evitar un cambio brusco de temperatura durante la etapa de enfriamiento del producto, con el fin de que este no absorba mucha cantidad de aceite. En cuanto al aceite empleado, Aguilera (1997) y Dobarganes et al. (2000) mencionan que la absorción de aceite depende en mayor grado de la calidad que del tipo de aceite. Una absorción excesiva de aceite y el oscurecimiento del producto son consecuencia de los cambios que sufre el aceite, tales como, la degradación térmica e incorporación de compuestos extraídos del producto, así como también, la producción de surfactantes.

La aplicación de pretratamientos como el escaldado y el secado, permiten controlar la absorción de aceite. Asimismo, el uso de ciertos aditivos (celulosa en polvo) y la aplicación de recubrimientos (batidos y apanados), controlan la pérdida de agua y reducen la absorción de aceite durante la fritura (Aguilera, 1997).

La aplicación de postratamientos, como sumergir el producto en difluoroclorometano o rociarlo con agua caliente después de la fritura, permiten eliminar parte del aceite que se une en la superficie del producto (Aguilera, 1997).

Por otro lado, Krokida et al. (2000) indicaron que el transporte de agua y aceite es más intenso cuando el espesor de la muestra es menor. Por ejemplo, si el alimento se procesa en láminas, las más gruesas presentan una menor área específica; y, en consecuencia, se reduce el área relativa disponible para perder el agua; Costa & Oliveira (1999), además, mencionaron que el camino interno que recorre el agua es más largo y se requiere más energía en forma de calor para evaporarla, además la corteza que se forma impide que el agua salga con facilidad.

2.3.2. Modelado de la pérdida de agua y absorción de aceite en fritura de papa

Krokida et al. (2000) emplearon un modelo cinético de primer orden para predecir la pérdida de humedad y la absorción de aceite de papas fritas en función del tiempo de fritura.

Moyano & Berna (2002) y Pedreschi, Hernández, Figueroa, & Moyano (2005) modelaron la pérdida de agua durante la fritura de papas cortadas en tiras, para ello, utilizaron la resolución de la segunda ley de Fick asumiendo que la geometría de las tiras de patatas es el resultado de la multiplicación de tres láminas infinitas.

Math et al. (2004) utilizaron un modelo exponencial de primer orden para estudiar los mecanismos de transferencia de humedad y absorción de aceite durante la fritura de papas.

Yildiz, Palazoglu, & Erdogan (2007) determinaron los parámetros de transferencia de calor y masa durante la fritura por inmersión en aceite de girasol de rebanadas de papa en forma de paralelepípedo de 8.5 x 8.5 x 70 mm, empleando temperaturas de 150, 170 y 190 °C. Los coeficientes de difusión para esas temperaturas, respectivamente, fueron de $9.2 \pm 1.1 \times 10^{-9}$, $11.0 \pm 1.0 \times 10^{-9}$ y $18.2 \pm 0.7 \times 10^{-9}$ m²/s.

Moya (2011) realizó el modelado de la pérdida de agua y la absorción de aceite en papas fritas tipo bastón; utilizando el modelo de Crank y un modelo empírico de primer orden, respectivamente.

2.3.3. Modelado de la pérdida de agua y absorción de aceite en fritura de materiales vegetales diferentes a la papa

Moreira et al. (1995) predijeron la pérdida de humedad de tajadas de tortilla de maíz durante la fritura, aplicando un modelo difusional con geometría de láminas infinitas, encontrando una alta absorción de aceite.

Baik & Mittal (2005) modelaron la transferencia de humedad y de calor en la fritura de láminas de tofu. Para ello, consideraron que la difusividad variaba en función de la humedad y temperatura del producto, resolviendo, simultáneamente, las ecuaciones de difusión de calor y materia basándose en la técnica de las diferencias finitas.

Bravo-Vásquez (2008) realizaron el modelado de pérdida de agua y absorción de aceite en láminas de manzana de la variedad *Granny smith* durante la fritura al vacío. La cinética de pérdida de agua fue estudiada con el modelo de Fick, mientras que la cinética de absorción de aceite se estudió con el modelo de Monod.

Jibaja (2010) modeló matemáticamente la cinética de absorción de aceite durante el proceso de fritura al vacío de hojuelas de tomate de árbol en rodajas de 3 mm de espesor aplicando tres modelos empíricos, de los cuales el modelo de Monod y el modelo propuesto por Moyano & Pedreschi (2006), describieron adecuadamente la cinética de absorción de aceite durante el proceso de fritura en condiciones de vacío. La curva de pérdida de humedad presentó la forma típica de las curvas de secado en el período decreciente. A partir de los 120 s del proceso de fritura, la humedad se mantuvo en equilibrio, alrededor del 2 %. El contenido de aceite se incrementó rápidamente en los primeros 30 s y luego alcanzó el equilibrio a partir de los 90 s del tiempo de fritura. El contenido máximo de aceite en las hojuelas fue de 0.1306 g/g bs.

Bermúdez, Pasos, & Paternina (2010) encontraron modelos de mecanismos de transferencia de masa durante la fritura por inmersión de trozos de dos variedades de ñame, calculando la pérdida de humedad a varias temperaturas y tiempos de freído, aplicando un modelo exponencial de primer orden; y estudiaron el efecto de la temperatura de freído en la absorción de aceite y evaporación de agua en función del tiempo de freído. En los resultados obtenidos, observaron que a 180 s y temperatura de 140 °C hay mayor absorción de aceite, teniendo en cuenta simultáneamente la pérdida de humedad a 180 °C durante 540 s. Los datos experimentales se ajustaron a un modelo exponencial de primer orden para la transferencia de humedad ($r > 0,9$) en ambos cultivares. El coeficiente de difusión de la humedad de las dos variedades de ñame, freídos a temperaturas de 140, 160 y 180 °C en tiempos de 1 a 9 minutos fueron de 8.11 ± 0.76 , 8.21 ± 0.81 y $8.62 \pm 0.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, para la variedad Diamante 22, y 8.32 ± 0.82 , 8.38 ± 0.78 , $8.54 \pm 0.84 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para la variedad Pico de Botella, y la energía de activación fue de 24.43 kJ/mol para la variedad Diamante 22 y 21.27 kJ/mol para la variedad Pico de Botella.

Ortega & Montes (2014) evaluaron los cambios humedad y absorción de aceite ocurridos en el freído por inmersión de rodajas de yuca sometidas a pre-tratamientos de escaldado y osmodeshidratación en solución salina para determinar los parámetros cinéticos de absorción de aceite y pérdida de humedad, empleando el modelo matemático de Moyano & Pedreschi (2006) y la ley de Fick de la difusión, respectivamente, encontrando que la difusividad efectiva de humedad tuvo valores entre 10.44×10^{-9} y $14.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. El

coeficiente convectivo de transferencia de humedad tuvo valores entre 1.37×10^{-5} y 7.37×10^{-5} m/s con un comportamiento lineal con respecto a la temperatura del aceite. El contenido de aceite absorbido en el equilibrio estuvo entre 0.1391 y 0.3607 g aceite/g sólidos y las velocidades específicas entre 8.14×10^{-3} y 77.08×10^{-3} s⁻¹.

Osorio et al. (2015) y Osorio, Cerón, Rodríguez, Castellanos, & Chávez (2015) realizaron la cinética de absorción de aceite y pérdida de humedad en *chips* de arveja (*Pisum sativum* L.) en diferentes condiciones de fritura a presión atmosférica y de vacío. Se determinó dependencia de la difusividad con la temperatura y la presión; al evaluarla con la ecuación de Arrhenius se obtuvieron E_a de 5.5868, 4.7169 y 3.82427 kJ/mol y E_a de 18.672, 13.829 y 13.753 kJ/mol a presiones de 78, 43 y 9 kPa para absorción de aceite y pérdida de humedad, respectivamente. El modelo de Monod utilizado para simular el proceso de absorción de aceite durante la fritura de arveja, mostró una buena calidad de ajuste sobre las curvas experimentales, validando su utilización.

Asimismo, Barrios, Osorio, & Cerón (2015) realizaron la cinética de pérdida de humedad y absorción de aceite durante la fritura por inmersión de arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Sureña, empleando un modelo exponencial para la cinética de absorción de aceite, mientras que la pérdida de humedad se estudió con el modelo de Newton. Los modelos estudiados describieron adecuadamente los dos fenómenos de transferencia de masa. Las constantes cinéticas calculadas a temperaturas de 160, 180 y 200 °C fueron: absorción de aceite 0.0084, 0.0088 y 0.0094 s⁻¹; y pérdida de humedad 0.0125, 0.0144 y 0.0194 s⁻¹; mientras que los valores de difusividad obtenidos fueron 0.1551×10^{-9} , 0.1787×10^{-9} y 0.2371×10^{-9} m²/s. Tanto la difusividad como los parámetros cinéticos presentaron dependencia con la temperatura al evaluarlos, con la ecuación de Arrhenius se obtuvo la energía de activación 18.13 kJ/mol.

3. HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis nula H_0

La temperatura y el tiempo durante el proceso de fritura convencional no ejercen un efecto significativo sobre las medias de los resultados de la razón de contenido de agua y del contenido de aceite en rodajas de papa (*Solanum phureja*), de las variedades Ratona Morada y Andina.

$$\mu_i = \mu_j \text{ para algún } i, j.$$

3.2. Hipótesis alterna H_a

La temperatura y tiempo durante el proceso de fritura convencional ejercen un efecto significativo sobre las medias de los resultados de la razón de contenido de agua y del contenido de aceite en rodajas de papa (*Solanum phureja*), de las variedades Ratona Morada y Andina.

$$\mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i, j.$$

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Modelar las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional (a presión atmosférica) de dos genotipos de papa nativa (*Solanum phureja*), Ratona Morada y Andina, cultivados en el departamento de Nariño.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar algunas características físicas y bromatológicas de las dos variedades de papa (*Solanum phureja*).
- Construir y modelar las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de las dos variedades de papa (*Solanum phureja*).
- Determinar los modelos matemáticos empíricos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de las dos variedades de papa (*Solanum phureja*).
- Calcular la difusividad del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) requerida en los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de las dos variedades de papa (*Solanum phureja*).

5. METODOLOGÍA

5.1. Localización

La investigación se realizó en el Laboratorio de Investigación en Conservación y Calidad de Alimentos (imagen 5.1) de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Nariño sede Torobajo, Pasto (Nariño), localizada a 2527 msnm., con una temperatura promedio de 14 °C y una humedad relativa de 70% (Cerón et al., 2015).



Imagen 5.1. Laboratorio de Investigación en Conservación y Calidad de Alimentos

Fuente: Este estudio

5.2. Material vegetal experimental

Se utilizaron tubérculos frescos de papa nativa (*Solanum phureja*) de las variedades nativas Ratona Morada y Andina, proporcionados a través del proyecto “Mejoramiento tecnológico y productivo del sistema de papa en el departamento de Nariño”. La recolección de las variedades se realizó en el quinto mes de iniciada la siembra, en los terrenos de cultivo de la Granja Experimental Botana (imagen 5.2); localizada en el Altiplano de Pasto (Nariño) a 2820 msnm, en las coordenadas 01° 09' 12" Latitud Norte y 77° 18' 31" Longitud Oeste, con temperatura promedio de 13 °C y 970 horas sol/año, precipitación pluvial promedio de 803 mm/año y humedad relativa del 82% (Morillo, Villota, Lagos, & Ordóñez, 2011), condiciones favorables para el cultivo. En la imagen 5.3 se muestran las variedades utilizadas en esta investigación.



Imagen 5.2. Cultivo y recolección de papa (*Solanum phureja*). Granja Experimental Botana

Fuente: esta investigación

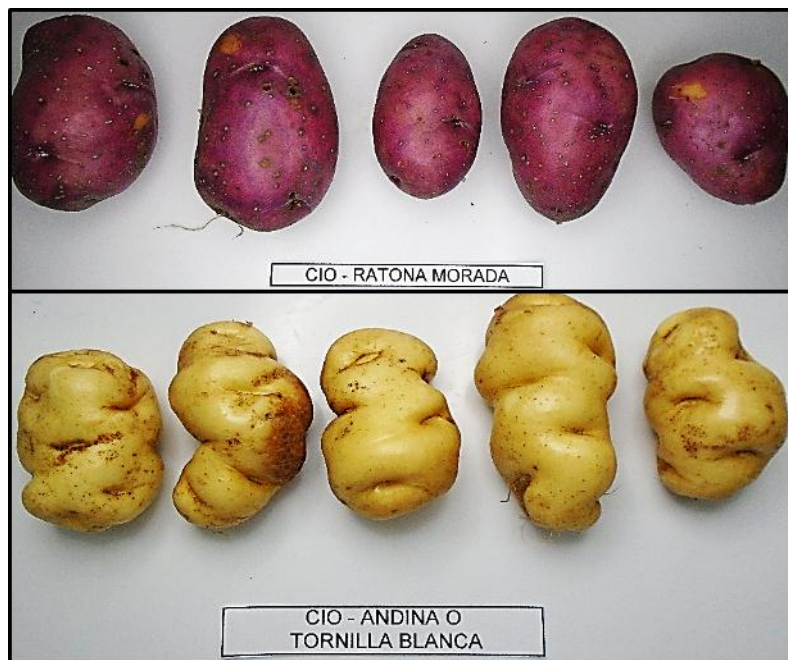


Imagen 5.3. Variedades de papa de estudio (*Solanum phureja*)

Fuente: esta investigación

5.2.1. Operaciones preliminares

5.2.1.1. Limpieza

Se realizó un lavado manual mediante aspersion con agua potable y uso de esponjillas (imagen 5.4), con el fin de retirar restos de tierra adherida a los tubérculos.



Imagen 5.4. Limpieza de los tubérculos

Fuente: esta investigación

5.2.1.2. Selección

Se realizó visualmente teniendo en cuenta la ausencia de brotes, magulladuras, daños por plagas y pudrición (imagen 5.5).

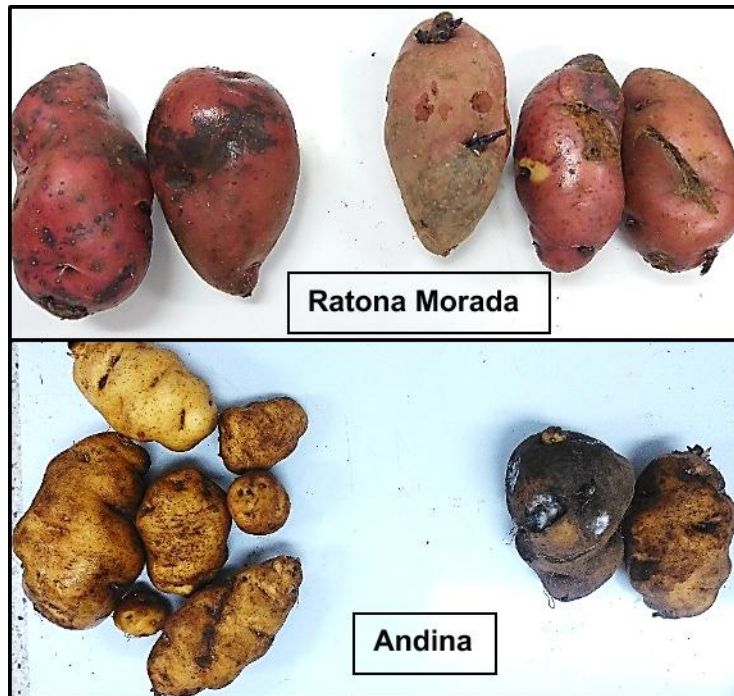


Imagen 5.5. Selección de los tubérculos

Fuente: esta investigación

5.2.1.3. Clasificación

Se trabajaron tubérculos de tamaño adecuado para obtener rodajas más homogéneas (imagen 5.6).

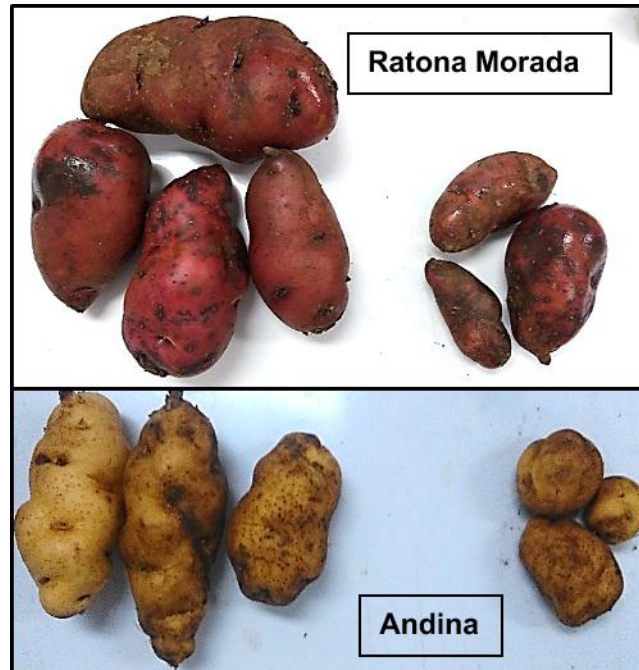


Imagen 5.6. Clasificación de los tubérculos

Fuente: esta investigación

5.3. Determinación de algunas características físicas y bromatológicas de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*)

5.3.1. Determinación de características morfológicas

Se utilizó la metodología descrita por Gómez (2000) para la descripción de las variables cualitativas de las variedades de papa nativa de la especie *Solanum phureja*. Se tomaron tubérculos representativos de cada variedad en estado fresco y se les determinó los parámetros físicos que se describen a continuación. La caracterización se llevó a cabo dentro de la semana posterior a su cosecha. Cada medición cuantitativa se realizó 5 veces.

- Forma, de manera visual.
- Profundidad de ojos, de manera visual.
- Volumen (cm^3), por desplazamiento de agua en un beaker de 500 cm^3 .
- Peso (g), mediante una balanza analítica (OHAUS, modelo PA214) con precisión 0.0001 g .
- Gravedad específica, mediante cálculo matemático.

- Diámetro (polar y ecuatorial) (cm), mediante un calibrador (DISCOVER) con precisión 0.1 cm.
- Color (piel y pulpa), utilizando un espectrofotómetro (KONIKA MINOLTA, modelo CM-5) con iluminante D65 y ángulo del observador 10°. El sistema utilizado fue el CIE L^* a a^* b^* , siendo el parámetro L^* la claridad o luminosidad y a^* y b^* los índices de cromaticidad, concretamente a^* el componente rojo-verde y b^* el componente amarillo-azul (Castro Lara, 2008).

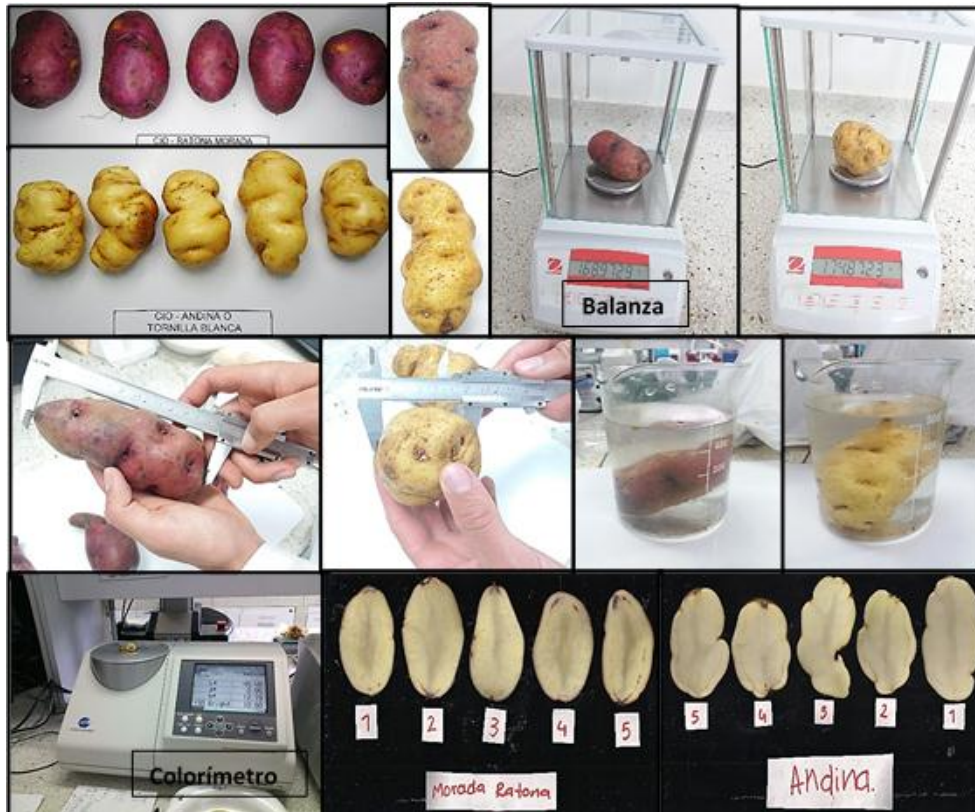


Imagen 5.7. Caracterización física de los tubérculos

Fuente: esta investigación

5.3.2. *Determinación de características bromatológicas o análisis químico proximal*

La caracterización químico proximal del material fresco se realizó mediante métodos descritos para el análisis químico de alimentos del laboratorio de bromatología de la Universidad de Nariño, basado en las técnicas de la AOAC (Cuniff, 1997) y las metodologías de análisis de alimentos propuestas por Bernal (1998), sobre las cuales se aplicaron los principios de la tabla 5.1. Cada muestra se constituyó por $500.0 \text{ g} \pm 0.001 \text{ g}$ de papa y se enviaron para su análisis en un periodo no mayor a las 24 h posterior a su cosecha. Los reactivos que se utilizaron fueron de grado analítico.

Tabla 5.1. Análisis químico proximal y minerales

Parámetro	Método	Técnica
Humedad	Secado estufa	Gravimétrica
Materia seca	Secado estufa	Gravimétrica
Ceniza	Incineración Mufla	Gravimétrica
Extracto etéreo	Extracción Soxhlet	Gravimétrica
Fibra cruda	Digestión ácida-básica	Gravimétrica
Proteína	Kjeldahl (N*6.25)	Titulométrica
Extracto No Nitrogenado	Cálculo matemático	Cálculo matemático
Calcio	Oxidación húmeda, EAA	Espectrofotométrica
Hierro	Oxidación húmeda, EAA	Espectrofotométrica

Fuente: (Bernal, 1998)

5.3.3. Análisis estadístico

Los resultados de las características físicas se expresaron como la media más o menos la desviación estándar y fueron analizados estadísticamente con el programa Statgraphics Centurion © Plus versión XVI. (Stat Point, Inc., Statistical Graphics Corporation, Rockville, USA). Para identificar si existen diferencias significativas entre las medias de los valores, se efectuó el análisis de varianza con el procedimiento ANOVA y, en caso de existir diferencias, la prueba de múltiples rangos a través del método LSD de Fisher a un 5 % de nivel de significancia se utilizó para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

5.4. Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*)

5.4.1. Proceso de fritura convencional

Cada unidad experimental se constituyó por 5.00 ± 0.05 g de papa de cada variedad, a manera de finas rodajas. El corte de las rodajas se realizó con una tajadora industrial (JAVAR, modelo CHEF GSG) con regulación de corte de 2 mm de espesor, ingresando tubérculos enteros con cáscara. El proceso de fritura se llevó a cabo en batch, utilizando una freidora de inmersión (KRAMER, modelo FR-08) de capacidad 8 Litros, provista de una termocupla tipo K (EXTECH, modelo SDL 200) con bulbo de 3 mm de diámetro para el registro de la temperatura. Se utilizó aceite vegetal 100% de girasol, cero colesterol con punto de humo de 230 °C de acuerdo a los requisitos de la Norma Técnica NTC 3272 (ICONTEC, 1997). Se evaluaron tres temperaturas de fritura: 140 °C, 160 °C y 180 °C con una variación de ± 2 °C por tiempos de hasta 150 segundos. La relación producto/aceite se mantuvo constante 1:150 (p/v). El exceso de aceite superficial se eliminó con toallas de papel absorbente según la metodología descrita por Bravo-Vásquez (2008).

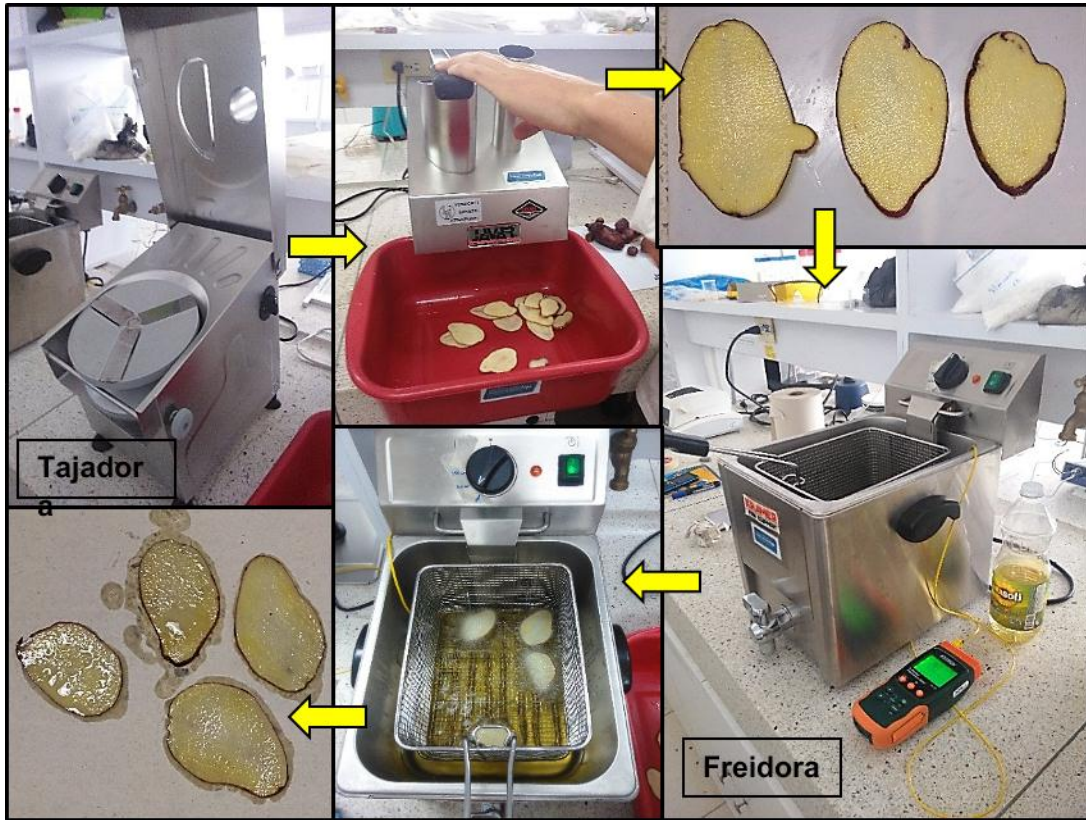


Imagen 5.8. Proceso de fritura convencional

Fuente: esta investigación

5.4.2. Construcción y modelado de la cinética de pérdida de agua

5.4.2.1. Determinación del contenido de agua

Se determinó según la metodología descrita por Bernal (1998). En una balanza analítica (OHAUS, modelo PA214) se pesaron 2.00 ± 0.05 g de cada tratamiento, aparte de ello se pesó una cápsula de porcelana previamente seca al calor. Se calentó a 100 ± 2 ° C en un horno eléctrico (PIRON, modelo PF6004_CT0), por un tiempo de 24 horas hasta lograr un peso constante. Se enfrió y se pesó; los resultados se expresaron en base seca (g de agua / g sólido seco). El análisis se llevó a cabo por triplicado.

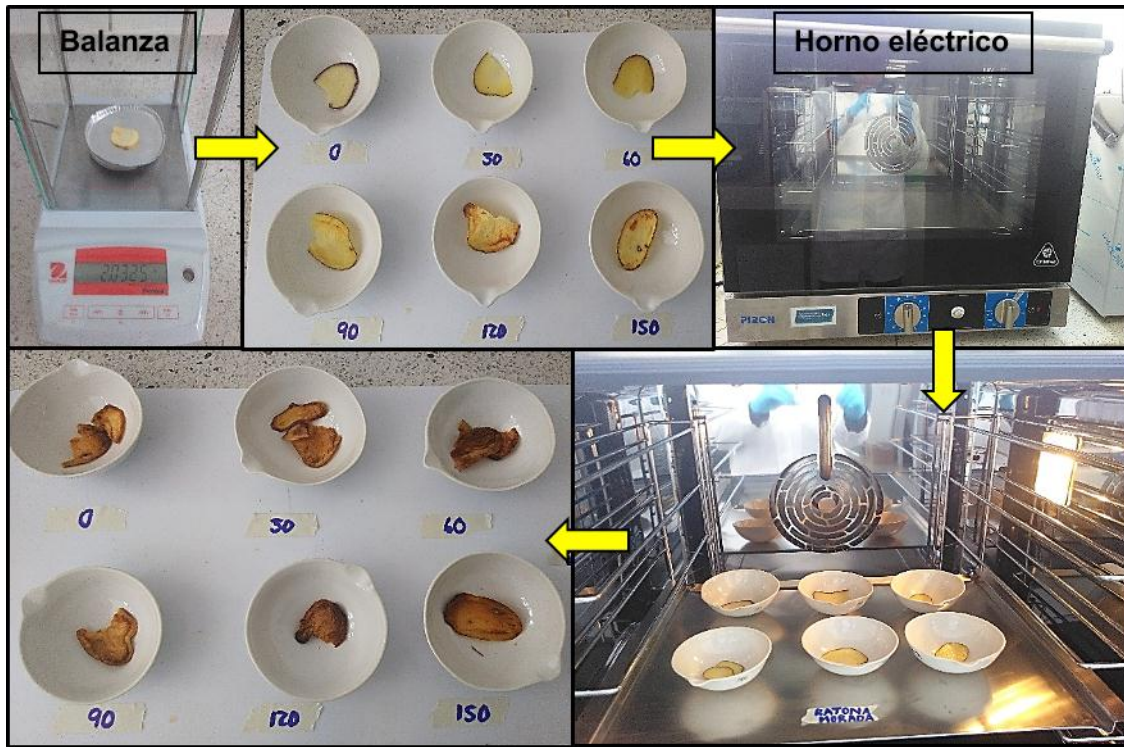


Imagen 5.9. Determinación del contenido de agua en las rodajas de papa

Fuente: esta investigación

5.4.2.2. Construcción de la cinética de pérdida de agua

Con los resultados experimentales de contenido de agua obtenidos, se construyó la cinética de pérdida de agua de las variedades de estudio, representando los valores medidos de contenido de agua de las rodajas como valores adimensionales; dividiendo el contenido de agua a tiempo real (M_t) entre el contenido de agua inicial (M_0) de cada muestra en función del tiempo de fritura para cada temperatura evaluada. La gráfica resultante fue obtenida mediante el programa Microsoft Excel™ (v.16.0).

5.4.2.3. Modelado matemático de la cinética de pérdida de agua

Para modelar matemáticamente la cinética de pérdida de agua, se aplicaron tres modelos empíricos expuestos por Vega, Ireland, & Lemus (2007); Soto, Ortega, Flores, & Orozco (2010); y Da Rocha et al. (2012); ecuaciones 12, 13 y 14, respectivamente.

I. Modelo de Newton

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = e^{(-k_1 t)}$$

(12)

II. Modelo de Henderson – Pabis

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = a e^{(-k_2 t)}$$

(13)

III. Modelo de Page

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = e^{(-k_3 t^n)}$$

(14)

Dónde: *MR*: relación de humedad adimensional; *M_t*: contenido de agua al tiempo *t* (g de agua/g de sólido seco); *M_e*: contenido de agua en el equilibrio (g de agua/g de sólido seco); *M₀*: contenido de agua inicial (g de agua/g de sólido seco); *k₁, k₂, k₃*: constantes de velocidad de pérdida de agua (s⁻¹); *t*: tiempo de pérdida de agua en la fritura (s); *a* y *n*: constantes de los modelos.

Para el contenido de agua en el equilibrio, se consideraron los valores más pequeños de contenido de agua residual obtenidos a las condiciones máximas de temperatura (180 °C) al terminar el proceso de fritura.

El ajuste de los datos experimentales de *MR* a los modelos matemáticos se realizó aplicando regresiones no lineales con una variable independiente (tiempo de fritura) mediante el programa Statgraphics Centurion © Plus versión XVI. (Stat Point, Inc., Statistical Graphics Corporation, Rockville, USA). La estimación inicial de los parámetros empíricos se llevó a cabo mediante representaciones graficas con ayuda del programa Microsoft Excel™ (v.16.0), mientras que la determinación se efectuó con el método de Marquardt a un nivel de significancia del 5%, el cual es muy utilizado por ser rápido y confiable, ya que considera el método de linealización de Gauss-Newton y el método de descenso de mayor pendiente (Araujo & Gandur, 2008).

5.4.3. Construcción y modelado de la cinética de absorción de aceite

5.4.3.1. Determinación del contenido de aceite

Se procesaron 2.00 ± 0.05 g de cada tratamiento. Se empleó un equipo de extracción Soxhlet, utilizando como solvente éter etílico al 99.8%, según la metodología descrita por Bernal (1998) y con un reflujo de 8 h. El contenido de aceite se pesó en una balanza analítica (OHAUS, modelo PA214). La recuperación del solvente se hizo en el mismo extractor Soxhlet. Posteriormente, el extracto se secó por 30 minutos en un horno eléctrico (PIRON, modelo PF6004_CT0) a 60 ± 2 °C, hasta eliminar el solvente residual, se enfrió y

se pesó. Los resultados se expresaron en base seca (g de aceite / g sólido seco). El análisis se llevó a cabo por triplicado.

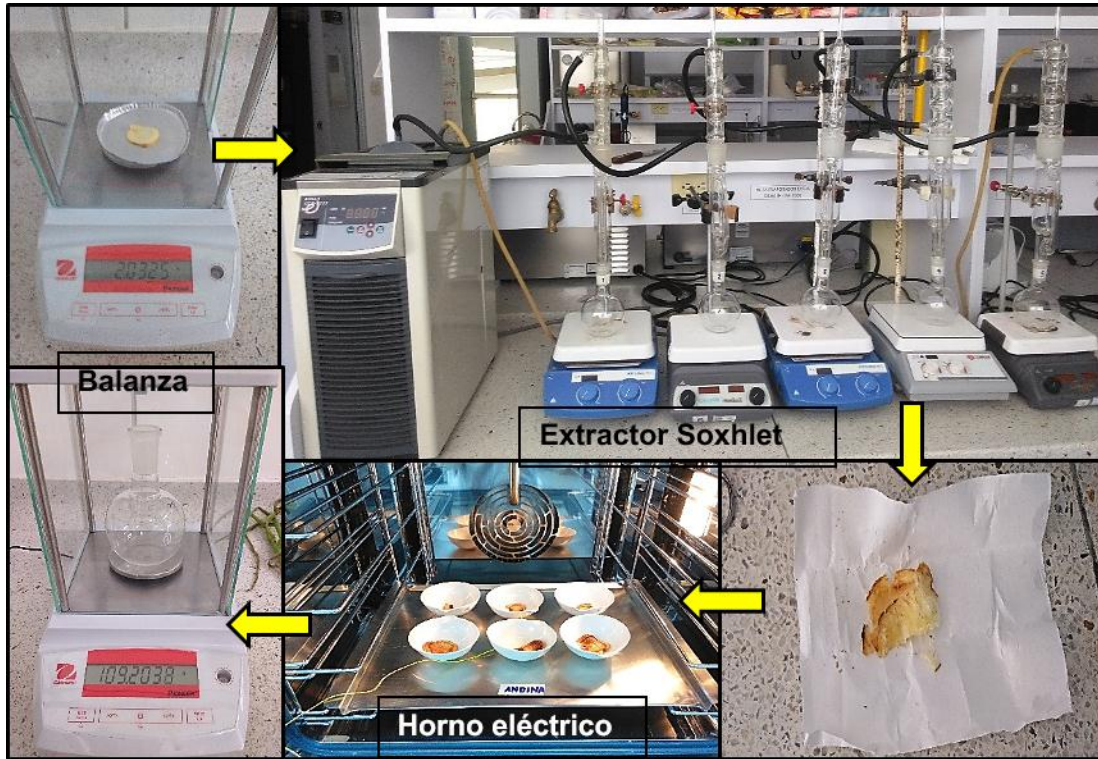


Imagen 5.10. Determinación del contenido de aceite en las rodajas de papa

Fuente: esta investigación

5.4.3.2. Construcción de la cinética de absorción de aceite

Se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 5.4.2.2., con los resultados experimentales de contenido de aceite en base seca obtenidos en función del tiempo de fritura para cada temperatura.

5.4.3.3. Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite

Se determinó mediante la aplicación de tres modelos empíricos expuestos por Bravo-Vásquez (2008); Moyano & Pedreschi (2006); y Krokida et al. (2000); ecuaciones 15, 16 y 17, respectivamente.

I. Modelo de Monod

$$Y = \frac{Y_{e1} t}{b+t} \quad (15)$$

II. Modelo de Moyano – Pedreschi

$$Y = \frac{Y_{e2} k_1 t}{1+(k_1 t)} \tag{16}$$

III. Modelo de primer orden

$$Y = Y_{e3} [1 - e^{(-k_2 t)}] \tag{17}$$

Dónde: Y : contenido de aceite al tiempo t (g de aceite/g de sólido seco); Y_{e1} , Y_{e2} , Y_{e3} : contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite, a tiempo infinito (g de aceite/g de sólido seco); k_1 , k_2 : constantes de velocidad de absorción de aceite (s^{-1}); t : tiempo de absorción de aceite en la fritura (s); b : tiempo de fritura durante el cual se ha adquirido la mitad del contenido máximo de aceite (s).

El ajuste de los datos experimentales de Y a los modelos matemáticos, la estimación inicial y la determinación de los parámetros empíricos de los modelos se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 5.4.2.3.

5.4.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico del contenido de agua, del contenido de aceite y de los parámetros cinéticos de los modelos de cada tratamiento, se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 5.3.3.

5.5. Determinación de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*).

5.5.1. Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados

La calidad de ajuste de los modelos se evaluó por medio de parámetros estadísticos mediante el programa Statgraphics Centurion © Plus versión XVI. (Stat Point, Inc., Statistical Graphics Corporation, Rockville, USA): el coeficiente de determinación (R^2), la suma de los errores cuadrados (SSE , por sus siglas en inglés *Sum of Squared Error*), la raíz media de los errores cuadrados ($RMSE$, por sus siglas en inglés *Root Mean Squared Error*) y la media del error absoluto (MAE , por sus siglas en inglés *Mean Absolute Error*); representadas en las ecuaciones 18, 19, 20 y 21, respectivamente.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{exp,i} - V_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^N V_{exp,i}^2 + \sum_{i=1}^N V_{cal,i}^2} \tag{18}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (V_{exp,i} - V_{cal,i})^2 \quad (19)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{exp,i} - V_{cal,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|V_{exp,i} - V_{cal,i}|}{N} \quad (21)$$

Dónde: $V_{exp,i}$: valor experimental o medido; $V_{cal,i}$: valor calculado por el modelo; N : número de determinaciones.

5.5.2. Selección del mejor modelo matemático

Entre los modelos aplicados, se seleccionaron aquellos que cumplen con lo que señalan Gutiérrez & de la Vara (2008) y Brousse, Vergara, Zubreski, & Martos (2014). Según estos autores, un buen ajuste es indicado por valores pequeños de $RMSE$, SSE y MAE , (tendiendo a cero) y un coeficiente de determinación (R^2) > 0.85 (lo más cercano a 1). Además, se consideró que la validez del ajuste del modelo sea satisfactoria y que describa adecuadamente el comportamiento de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite.

5.6. Cálculo de la difusividad del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) de los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*).

5.6.1. Estudio de la transferencia de agua como modelo difusivo

Se utilizó la metodología descrita por Melquíades, López, & Rosas (2009) a partir de la segunda Ley de Fick, ecuación de difusión, la cual se expresa en la ecuación (22).

$$\frac{\partial y}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (22)$$

Para resolver esta ecuación se consideró que: (i) el contenido de humedad inicial es uniforme; (ii) la geometría se mantiene continua durante el proceso y se asume, para las rodajas de papa, como placas infinitas truncadas; (iii) la superficie consigue la humedad de saturación en un instante determinado. La condición inicial es el contenido de humedad de la muestra al principio del proceso. Asumiendo estas hipótesis, la solución de la ecuación (22) se obtiene analíticamente por el método de separación de variables que empleando sólo el primer término de la serie solución, resulta:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} \pi^2 t}{4 L^2}\right) \quad (23)$$

Dónde: MR : relación de humedad adimensional; D_{eff} : coeficiente de difusión del agua en la rodaja (m^2/s); t : tiempo (s) y L : mitad del espesor de la rodaja (m). La ecuación (23) se puede simplificar en forma logarítmica mediante linealización como se muestra en la ecuación (24).

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{D_{eff} \pi^2 t}{4 L^2} \quad (24)$$

De esta forma, se obtuvieron valores de D_{eff} para cada tratamiento, graficando $\ln MR$ experimental vs t a partir de la pendiente de la línea recta.

5.6.2. Energía de activación para el fenómeno de pérdida de agua

Se determinó a partir del coeficiente de difusión (D_{eff}), que se ajusta a la ecuación de Arrhenius (ecuación 25), debido a su dependencia con la temperatura (Melquíades et al., 2009).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (25)$$

Dónde: D_0 : factor pre-exponencial (m^2/s); E_a : energía de activación (kJ/mol); T : temperatura absoluta (K) y R : constante de los gases (8.314 J/mol K).

Al linealizar la ecuación (25) aplicando logaritmos en ambos lados, se obtuvo la ecuación (26), de la cual se despejó E_a a partir de la pendiente de la gráfica de $\ln D_{eff}$ vs $1/T$.

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (26)$$

5.6.3. Energía de activación para el fenómeno de absorción de aceite

Se utilizó la metodología descrita por Ortega & Montes (2014) para describir la variación del contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite absorbido con la temperatura de fritura, mediante el parámetro Y_e experimental ajustado a la ecuación de Arrhenius (ecuación 27).

$$Y_e = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (27)$$

Dónde: D_0 : factor pre-exponencial (m^2/s); E_a : energía de activación (kJ/mol); T : temperatura absoluta (K) y R : constante de los gases (8.314 J/mol K).

Al linealizar la ecuación (27) aplicando logaritmos en ambos lados, se obtuvo la ecuación (28), de la cual se despejó E_a a partir de la pendiente de la gráfica de $\text{Ln } Y_e$ vs $1/T$.

$$\text{Ln } Y_e = \text{Ln } D_0 - \frac{E_a}{R T} \quad (28)$$

5.6.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados de D_{eff} y E_a se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 5.3.3.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Determinación de algunas características físicas y bromatológicas de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*)

6.1.1. Características físicas

En la tabla 6.1 se presentan los resultados de los parámetros físicos evaluados para las muestras frescas de papa (*Solanum phureja*) de las variedades Ratona Morada y Andina; los cuales pueden servir como criterio de calidad para la industria de papas fritas en hojuela.

Tabla 6.1. Caracterización física de papa de las variedades Ratona Morada y Andina

VA	F	PO	**P	**V	**GE	**DP	**DE
RM	Elíptica	Superficiales	98.00 ± 11.14 ^a	85.0 ± 10.0 ^a	1.154 ± 0.067 ^a	8.346 ± 0.407 ^a	4.680 ± 0.474 ^a
A	Elíptica reniforme	Profundos	93.60 ± 11.74 ^a	90.0 ± 4.47 ^a	1.005 ± 0.094 ^b	7.456 ± 0.742 ^b	5.056 ± 0.366 ^a
VA	**CPI			**CPU			
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
RM	54.28 ± 3.807 ^a	6.892 ± 1.094 ^a	29.69 ± 2.201 ^a	80.04 ± 2.495 ^a	2.880 ± 0.777 ^a	46.87 ± 0.677 ^a	
A	64.47 ± 5.440 ^b	7.736 ± 1.198 ^a	36.30 ± 1.285 ^b	84.74 ± 0.911 ^b	0.184 ± 0.178 ^b	25.53 ± 2.046 ^b	

**Valores promedio (n = 5) ± desviación estándar; VA = variedad de papa; RM = Ratona Morada; A = Andina; F = forma; PO = profundidad de ojos; P = peso (g); V = volumen (cm³); GE = gravedad específica; DP = diámetro polar (cm); DE = diámetro ecuatorial (cm); CPI = color de piel; CPU = color de pulpa; L*, a*, b* = factores de color. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 2).

Fuente: Este estudio

Como se observa en la tabla 6.1, las propiedades físicas de las dos variedades mostraron homogeneidad en los datos, excepto para el factor de color a*; el cual presentó una desviación estándar de 0.777 para Ratona Morada y 0.178 para Andina, que corresponde a un coeficiente de desviación del 26.98% y del 96.74%, respectivamente.

La forma encontrada para los tubérculos de la variedad Ratona Morada pertenece a la forma general (redonda, comprimida, ovalada, obovada, elíptica, oblonga); mientras que para la Andina, la forma presenta una variante secundaria que la coloca en la forma rara o inusual (concertinada, fusiforme, falcada, reniforme, aplanada, enroscada); según la clasificación de Gómez (2000). De acuerdo a Ligarreto & Suárez (2003), la forma general de los tubérculos, especialmente redonda y comprimida, es la requerida por la industria para papa frita. Por otro lado, la variedad Ratona Morada, contrario a lo observado en la Andina, muestra una profundidad de ojos aceptable para el procesamiento industrial

(superficial o medio), la cual favorece las operaciones de limpieza y pelado (Ligarreto & Suárez, 2003).

El peso de los tubérculos de las dos variedades se encuentra en la clase 0 (mayor a 50 g) (Ligarreto & Suárez, 2003) y no presentó diferencias significativas entre sí, al igual que en el volumen y en el diámetro ecuatorial. Mientras que las propiedades de gravedad específica, y diámetro polar si mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las dos variedades tal como se muestra en la tabla 6.1. Los resultados obtenidos para el peso representan una ventaja para estas variedades, ya que Ligarreto & Suárez (2003), citando a Talburt, afirman que los tubérculos de menor tamaño (definido por el peso y diámetros) tienden a acumular mayor contenido de azúcares reductores, lo cual se asocia con el oscurecimiento y la disminución del valor nutricional, inadecuados para procesos de fritura.

Los resultados obtenidos de gravedad específica proveen una estimación del contenido de materia seca y almidón. Así, valores altos indican mayor contenido de materia seca y almidón; y como consecuencia, menor contenido de agua (Alvarez & Canet, 2009). Mientras que, durante la fritura, la absorción de aceite resulta ser menor (Aguilera, 1997). Según Andreu & Da Silva (2007), valores superiores a 1.080 son adecuados para la industria de papas fritas. Teniendo en cuenta este requerimiento, la variedad Ratona Morada es apta para el procesamiento industrial.

Ligarreto & Suárez (2003) señalan que el diámetro polar es una característica de la calidad externa del tubérculo, asociada con el tamaño y la forma. Las pérdidas durante el pelado son mayores en tubérculos de tamaño pequeño, además, las hojuelas de dimensiones muy grandes se rompen en las bolsas. Por esta razón, los tubérculos deben tener un diámetro longitudinal entre 4 y 6 cm (Herrera, 2000). En la tabla 6.1 se observa que las variedades estudiadas presentan un diámetro polar mayor a 4 cm; sin embargo, sobrepasan el límite establecido para hojuelas fritas.

Respecto al color, los resultados arrojaron que la variedad Ratona Morada presenta color principal de piel morado, con una intensidad intermedia; mientras que, para la Andina, el color principal de piel fue amarillo con intensidad clara. El color secundario de piel se encontró ausente en ambas variedades. El genotipo Ratona Morada presentó tubérculos de pulpa de color principal crema, y amarillo para el genotipo Andina. El color secundario de pulpa se encontró ausente en ambas variedades. Según Ligarreto & Suárez (2003) para el procesamiento de papa frita se necesita un color de pulpa amarillo en el tubérculo.

El parámetro L^* presentó diferencias estadísticamente significativas entre las dos variedades, siendo la variedad Andina la más clara tanto en piel como en pulpa. Este parámetro es uno de los más utilizados como indicador de los cambios en el color del tubérculo (Papadakis, Abdul-Malek, Kamdem, & Yam, 2000). Cantos, Tudela, Gil, & Espín (2002) usaron la luminosidad (L^*) para definir la susceptibilidad de diferentes

variedades de papa al pardeamiento enzimático cuando el tubérculo se corta y se expone al oxígeno. Los valores de a* y b*, al igual, mostraron diferencias significativas. Sin embargo, no se consideran para evaluar el oscurecimiento enzimático en papa fresca y sólo indican las distintas tonalidades de color de piel y pulpa (Gil, Tudela, & Espín, 2005).

6.1.2. Características bromatológicas o análisis químico proximal

En la tabla 6.2 se muestran los resultados de los parámetros bromatológicos evaluados para las muestras frescas de papa (*Solanum phureja*) de las variedades Ratona Morada y Andina. Además, con el fin de realizar una comparación con la especie común *Solanum tuberosum*, se han incluido en la tabla 6.2 los resultados de la variedad Diacol Capiro, la cual es ampliamente usada en la industria para la producción de bastones y hojuelas (CCB, 2015).

Tabla 6.2. Caracterización químico proximal de papa de las variedades Ratona Morada, Andina y Diacol Capiro

*Parámetro	<i>Solanum phureja</i> var. Ratona Morada	<i>Solanum phureja</i> var. Andina	<i>Solanum tuberosum</i> var. Diacol Capiro
Humedad	74.88	81.47	80.31
Materia seca	25.12	18.53	19.69
Cenizas	1.370	1.090	0.990
Extracto etéreo	0.110	0.090	0.060
Fibra cruda	0.370	0.410	0.000
Proteína	2.220	2.000	1.410
Extracto No Nitrogenado	21.04	14.95	17.23
Calcio	12.52	13.88	8.070
Hierro	3.950	1.940	0.530

* g / 100 g de parte comestible en base húmeda.

Fuente: Este estudio

Los resultados obtenidos del análisis químico proximal de las variedades de la especie *Solanum phureja* son similares a los encontrados en la literatura para papa criolla (Guerrero & Rivera, 2006) y exhiben un alto valor nutricional como una importante fuente de proteínas, fibra y minerales como el calcio y el hierro para el desempeño de las funciones reguladoras del organismo (Navas-Ríos & Díaz-Díez, 2012). En la tabla 6.2 se observa que los contenidos de ceniza, extracto etéreo, fibra cruda, proteína, calcio y hierro de las variedades Ratona Morada y Andina superan a los de la variedad Capiro, mientras que en humedad, materia seca y extracto no nitrogenado existen variaciones entre estas tres variedades. Además, el contenido de proteína, calcio y hierro en las variedades nativas es aproximadamente un 50% mayor que en la variedad Capiro, lo cual coincide con lo reportado por Gómez (2014), al afirmar que la papa criolla presenta el doble de nutrientes con respecto a la papa común.

De los parámetros evaluados, la humedad y el contenido de materia seca son importantes para el proceso de fritura. En la tabla 6.2 se observa que las variedades Ratona Morada y Andina presentan un alto contenido humedad, siendo mayor en la Andina. Según Aguilera (1997), los tubérculos con mayor contenido de humedad, absorben más aceite. Respecto al contenido de materia seca, a nivel industrial, es de gran importancia ya que contenidos altos se relacionan con mayores rendimientos; para la elaboración de papas fritas se requiere un contenido de materia seca superior al 20 % (Hasbún, Esquivel, Brenes, & Alfaro, 2009). En la tabla 6.2 se observa que este requerimiento es cumplido por la variedad Ratona Morada con un contenido de materia seca del 25.12%, lo cual la hace apta para el procesamiento industrial.

La materia seca, además, está relacionada con un alto porcentaje de almidón, el cual representa un 60-80% de la materia seca (Bu-Contreras & Rao, 2002). Un contenido alto de almidón hace que las papas sean una buena fuente de energía e influye en los factores de calidad del producto (Bu-Contreras & Rao, 2002; Hasbún et al., 2009; Talburt & Smith, 1975). Un contenido de materia seca alto permite que los tubérculos sean menos susceptibles a la desintegración cuando se someten a cocción en agua caliente, debido a que los gránulos de almidón se hinchan al absorber agua (Alvarez & Canet, 2009).

6.2. Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*)

6.2.1. Cinética de pérdida de agua

La variación del contenido de agua para rodajas de papa (*Solanum phureja*) de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura por inmersión a temperaturas de 140, 160 y 180 °C en función del tiempo se muestran en la tabla 6.3. Para una mejor visualización, entendimiento y normalización, los datos y las curvas de la cinética de pérdida de agua para ambas variedades comienzan desde la unidad (1.00) hasta el contenido final de agua, puesto que el contenido inicial de la misma fue diferente para cada una de las variedades (ver anexo 3). Lo anterior se consiguió dividiendo el contenido de agua en base seca a tiempo t (M_t) (g de agua/g sólido seco) entre la humedad inicial en base seca correspondiente a cada variedad (M_0), de esta manera, los datos de contenido de agua se presentan como valores adimensionales. Los resultados del contenido de agua expresados en base seca (bs) a las temperaturas y tiempos dados para cada variedad se muestran en el anexo 3. Los tiempos (0) segundos en la tabla 6.3 indican las condiciones iniciales de las muestras antes del proceso de fritura, donde la pérdida de agua es nula y representan el contenido de agua inicial de las rodajas.

Tabla 6.3. Contenido de agua adimensional en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina en función del tiempo durante la fritura convencional a diferentes temperaturas

Tiempo (s)	*Contenido de agua M_t/M_0 (adimensional)					
	Ratona Morada			Andina		
	140 °C	160 °C	180 °C	140 °C	160 °C	180 °C
0	1.0000 ± 0.0000	1.0000 ± 0.0000	1.0000 ± 0.0000	1.0000 ± 0.0000	1.0000 ± 0.0000	1.0000 ± 0.0000
30	0.6670 ± 0.0073 ^a	0.6122 ± 0.0085 ^a	0.4990 ± 0.0057 ^a	0.6414 ± 0.0055 ^a	0.4907 ± 0.0179 ^a	0.3872 ± 0.0253 ^a
60	0.4558 ± 0.0048 ^b	0.3704 ± 0.0073 ^b	0.2622 ± 0.0074 ^b	0.3975 ± 0.0108 ^b	0.2924 ± 0.0091 ^b	0.2153 ± 0.0101 ^b
90	0.2794 ± 0.0126 ^c	0.2520 ± 0.0083 ^c	0.1523 ± 0.0105 ^c	0.2670 ± 0.0091 ^c	0.1702 ± 0.0098 ^c	0.0903 ± 0.0048 ^c
120	0.2050 ± 0.0075 ^d	0.1563 ± 0.0067 ^d	0.0989 ± 0.0047 ^d	0.1544 ± 0.0048 ^d	0.0974 ± 0.0059 ^d	0.0495 ± 0.0079 ^d
150	0.1742 ± 0.0055 ^e	0.1255 ± 0.0085 ^e	0.0829 ± 0.0051 ^e	0.1176 ± 0.0070 ^e	0.0705 ± 0.0137 ^e	0.0387 ± 0.0042 ^e

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 7.A).

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.3 se observa que el mínimo contenido residual de agua de las rodajas de papa, durante el tiempo de fritura, fue de 0.0829 para la variedad Ratona Morada; y 0.0387 para la variedad Andina (0.2508 g/g bs y 0.2073 g/g en bs para Ratona Morada y Andina, respectivamente; ver anexo 3, tablas 3.3 y 3.6). Lo anterior representa una pérdida de un 91.7% y un 96.1% de agua en el producto frito respecto al contenido inicial, respectivamente.

Los resultados de contenido final de agua obtenidos son menores a los reportados en investigaciones de fritura convencional para diferentes muestras vegetales. Así, Moya (2011) obtuvo rodajas fritas de papa con contenidos finales de agua en los rangos de 0.680 a 0.697 g/g bs para tiempos de fritura de 720 s; Bermúdez et al. (2010) informaron rangos de contenido de agua finales de 0.377 a 0.4107 g/g bs en dos variedades de ñame en tiempos de 540 s; y Alvis-Bermúdez, Romero-Barragan, & Arrázola-Paternina (2016) reportaron un contenido de agua final de 0.346 g/g en base húmeda en rodajas de plátano para tiempos de 105 s. Las diferencias en los resultados obtenidos en este estudio con los reportados en la literatura se pueden atribuir al tipo de producto, la humedad inicial, el espesor y tamaño de este, la temperatura y los tiempos de operación, el uso de pretratamientos, los mecanismos de deshidratación, entre otros (Gokhale & Lele, 2011; Gómez, 2012; Moya, 2011; Schmalcko & Alzamora, 2005).

El análisis de varianza ANOVA indicó que la temperatura y el tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo (p < 0.05; ver anexo 7) sobre el contenido de agua de las

rodajas de papa de las dos variedades sometidas al proceso de fritura. Este comportamiento se corrobora en las figuras 6.1 y 6.2, en la cinética de pérdida de agua en función del tiempo de fritura para rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina, respectivamente; para cada temperatura evaluada. Cada punto en las curvas es el promedio de 3 repeticiones.

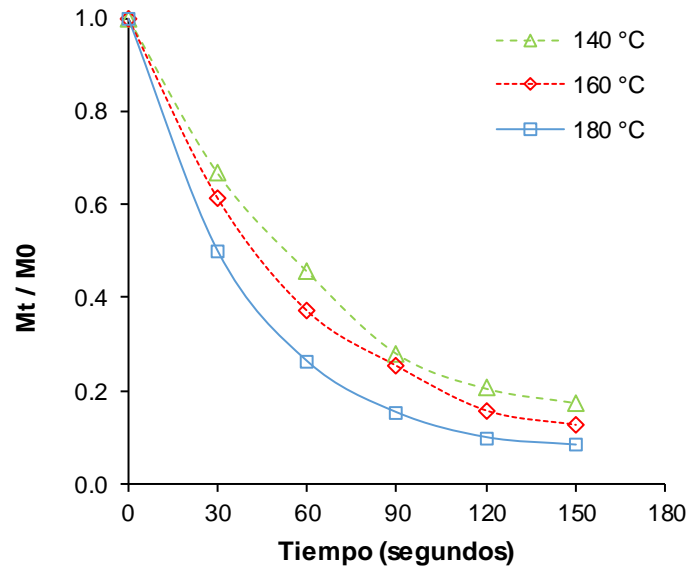


Figura 6.1. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso

Fuente: Este estudio

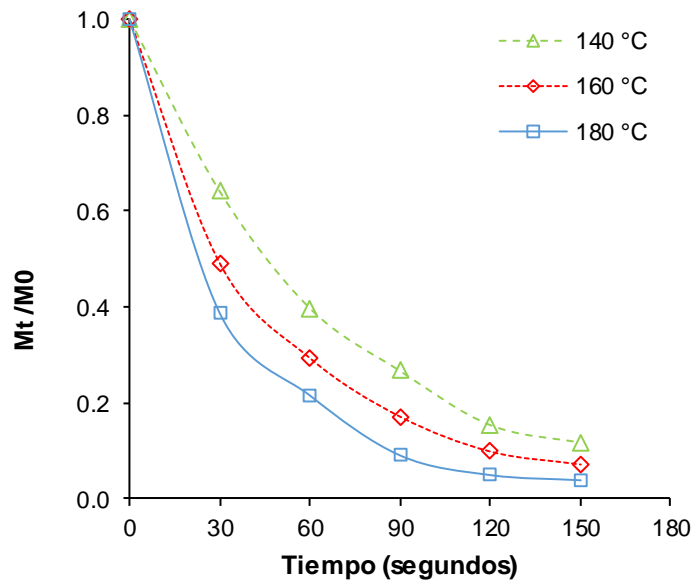


Figura 6.2. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso

Fuente: Este estudio

Se observa que las curvas mencionadas presentan una tendencia exponencial decreciente con el tiempo; y muestran las formas típicas de las curvas de secado en la etapa de velocidad decreciente; dada la rápida pérdida de agua, reportadas por Vega & Lemus (2006); Montes et al. (2008); y Salcedo, Mercado, Vanegas, Fernández, & Vertel (2014). Las curvas también son similares a las obtenidas en fritura convencional de otros productos fritos (Krokida, Oreopoulou, Maroulis, & Marinou-Kouris, 2001; Pedreschi et al., 2005; Vitrac, Dufour, Trystram, & Raoult-Wack, 2002).

En las Figuras 6.1 y 6.2 también se puede apreciar una etapa inicial para cada condición de temperatura; la cual está representada por la pendiente del primer tramo de las curvas durante los primeros 30 segundos del proceso. En esta etapa se evidencia que el contenido de agua disminuye rápidamente para ambas variedades, ya que la velocidad de pérdida de agua es alta; debido principalmente a la eliminación rápida del agua superficial del alimento, donde el vapor de agua se libera uniformemente como pequeñas burbujas a través de toda la superficie (Moya, 2011). Pasado ese tiempo, la velocidad de pérdida de agua decrece en un periodo más o menos largo, tendiendo a alcanzar un valor de contenido de agua en equilibrio. Esta disminución puede ser explicada por la combinación de dos aspectos ocurridos a medida que transcurre el tiempo de fritura: primero; el encogimiento progresivo que se presenta en las dimensiones del producto que hace que los poros disminuyan su tamaño (Kassama & Ngadi, 2005), dificultando que el agua abandone el alimento desde el interior y, segundo; la formación de la costra en la superficie del producto, la cual aumenta de espesor; y por su baja conductividad térmica, disminuye la transferencia de calor en la interfase costra e interior del alimento y, como consecuencia, la salida de agua del interior del alimento (Aguilera, 1997; Farkas et al., 1996). Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por otros autores; utilizando diferentes materias primas (Alvis-Bermúdez et al., 2016; Jibaja, 2010; Moya, 2011), donde la tasa de evaporación aumenta inicialmente y decrece hasta que finalmente la evaporación es relativamente constante para los tiempos finales de fritura.

Con respecto al efecto de la temperatura, las curvas en ambas variedades, corroboran que el contenido final de agua en las muestras freídas a 140 °C es mayor que en aquellas freídas a 160 °C, y éste a su vez, mayor que en las de 180°C, con lo cual se evidencia una disminución significativa en el contenido residual de agua conforme se incrementa la temperatura (ver anexo 7). Así, los mayores valores de contenido de agua residual (tabla 6.3) corresponden a la temperatura de 140 °C, con una reducción en el contenido de agua del 82.6% y del 88.2%, respecto al valor inicial (Ratona Morada y Andina, respectivamente); mientras que a 160 °C la reducción fue del 87.5% y del 93.0% (Ratona Morada y Andina, respectivamente) y del 91.7% y 96.1% a 180 °C (Ratona Morada y

Andina, respectivamente). Todo lo anterior permite concluir, en este estudio, que, a mayor temperatura en un tiempo determinado, mayor es la pérdida de agua en el producto. Conclusiones similares fueron reportadas en fritura convencional y al vacío (Bermúdez et al., 2010; Bravo-Vásquez, 2008; Gómez, 2012; Ortega & Montes, 2014).

Pedreschi, Moyano, Santis, & Pedreschi (2006) exponen que al aumentar la temperatura de fritura, la velocidad de pérdida de agua se incrementa; ya que se incrementa, al igual, la tasa de evaporación; con la consecuente disminución del tiempo de fritura. Otros autores coinciden con la conclusión anterior (Budzaki & Segura, 2005; Garayo & Moreira, 2002).

Por otro lado, en las Figuras 6.3, 6.4, 6.5 se observa que la evolución de la pérdida de agua es diferente para cada variedad. Así, rodajas de papa de la variedad Ratona Morada a todas las temperaturas perdieron significativamente menos agua que las de la variedad Andina al terminar el proceso de fritura (ver anexo 7).

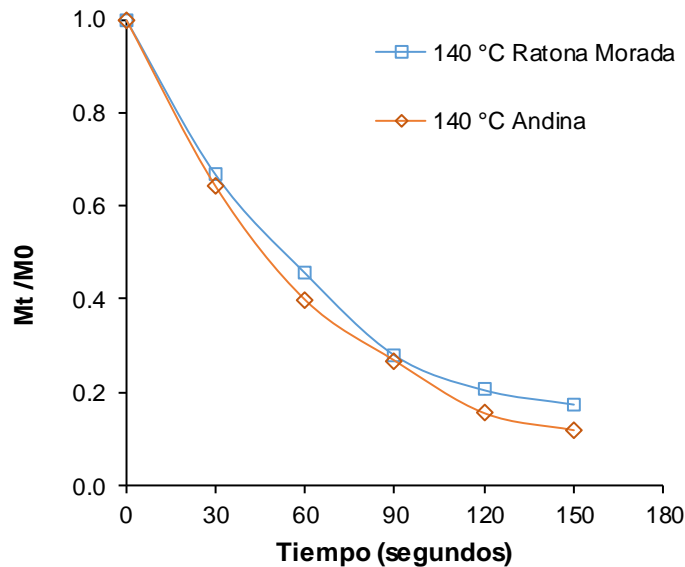


Figura 6.3. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 140 °C

Fuente: Este estudio

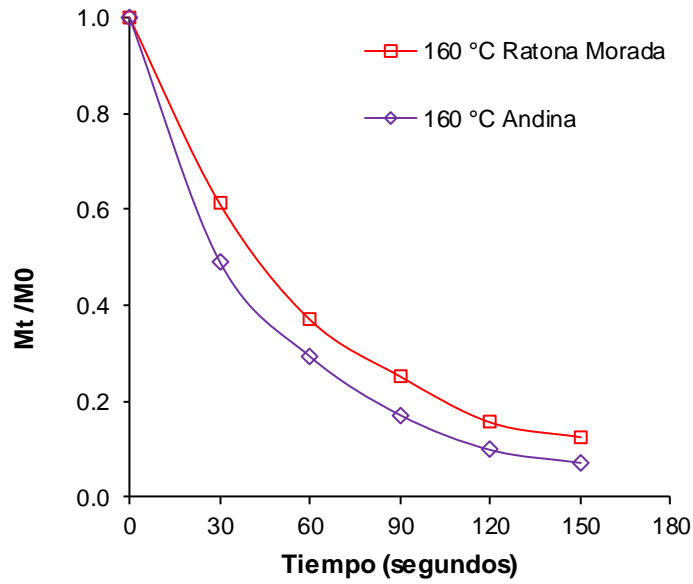


Figura 6.4. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 160 °C

Fuente: Este estudio

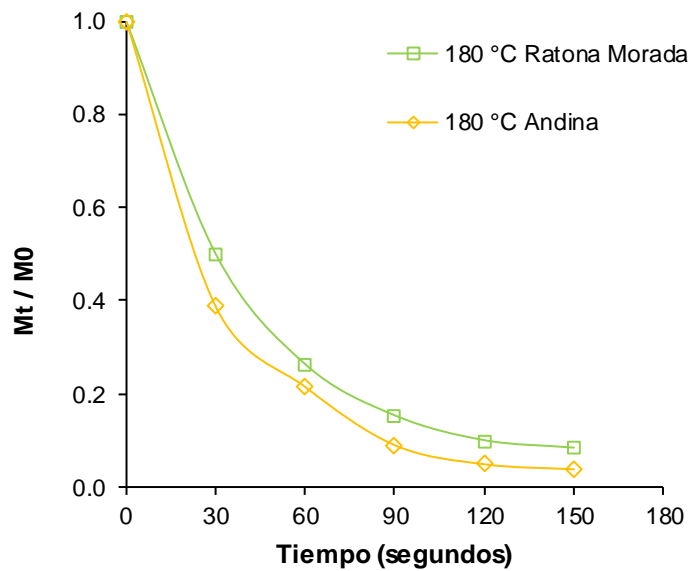


Figura 6.5. Cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 180 °C

Fuente: Este estudio

En este punto, es importante resaltar que las muestras de la variedad Ratona Morada comenzaron el proceso de fritura con un contenido de agua menor (3.024 g/g bs, ver anexo

3.A), alrededor de un 43% menos que el de las muestras de Andina (5.362 g/g bs, ver anexo 3.B); y concuerda con los resultados de humedad en base húmeda del análisis químico proximal de la tabla 6.2.; con lo cual, se presenta una menor evaporación en las muestras con menor contenido de agua; ya que existe menos agua libre disponible para ser removida durante la fritura (Moya, 2011). Así, el mínimo contenido de agua residual alcanzado en la variedad Ratona Morada fue de 0.0829, mientras que para la variedad Andina fue de 0.0387 (ver tabla 6.3). Resultados similares han sido reportados en muestras con diferente contenido inicial de agua previo al proceso de fritura, mostrando menor pérdida de agua en aquellas muestras con contenido inicial de agua menor (Bermúdez et al., 2010; Gómez, 2012; Moya, 2011; Ortega & Montes, 2014).

6.2.2. Modelado de la cinética de pérdida de agua

6.2.2.1. Modelo de Newton

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Newton, con ayuda del programa Statgraphics Centurion, se muestran en la tabla 6.4 para cada temperatura de fritura y variedad de papa evaluadas.

Tabla 6.4. Parámetros cinéticos del modelo de Newton para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Variedad	T (°C)	*k ₁ x 10 ⁻² (s ⁻¹)
Ratona Morada	140	1.5713 ± 0.0403 ^a
	160	1.9021 ± 0.0336 ^b
	180	2.7070 ± 0.0584 ^c
Andina	140	1.6257 ± 0.0285 ^a
	160	2.3125 ± 0.0624 ^d
	180	3.1590 ± 0.1244 ^e

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; k₁ = constante de velocidad de pérdida de agua. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 9.A).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Newton que describe el comportamiento de la cinética de pérdida de agua para las variedades Ratona Morada y Andina (ecuaciones 29 y 30, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 140 °C, las ecuaciones quedan:

$$MR = e^{(-k_1 t)} = e^{(-0.01571 t)} \tag{29}$$

$$MR = e^{(-k_1 t)} = e^{(-0.01626 t)} \tag{30}$$

El parámetro empírico de la ecuación de Newton, indica que la constante de velocidad de pérdida de agua (k) en el tiempo de fritura es de 0.01571 s^{-1} y 0.01626 s^{-1} (valores para Ratona Morada y Andina, respectivamente).

El análisis de varianza ANOVA arrojó un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 9.A) para las medias de los valores del parámetro k_1 del modelo de Newton, al realizar la comparación entre las temperaturas evaluadas en cada variedad de papa. Esto es un indicativo de que existe dependencia significativa de las constantes k_1 con la temperatura; mostrando valores significativamente más altos a mayor temperatura, tal como se muestra en la tabla 6.4. Resultados semejantes frente a esta dependencia reportaron Moyano & Pedreschi (2006); Troncoso & Pedreschi (2009); y Barrios et al. (2015) aplicando este modelo en fritura de rodajas de papa, papa pre-tratada y arveja; respectivamente.

6.2.2.2. Modelo de Henderson-Pabis

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Henderson-Pabis, con ayuda del programa Statgraphics Centurion, se muestran en la tabla 6.5 para cada temperatura de fritura y variedad de papa evaluadas.

Tabla 6.5. Parámetros cinéticos del modelo de Henderson-Pabis para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Variedad	T (°C)	* $k_2 \times 10^{-2} (\text{s}^{-1})$	* a
Ratona Morada	140	1.5829 ± 0.0525^a	1.0075 ± 0.0179
	160	1.9111 ± 0.0424^b	1.0052 ± 0.0118
	180	2.7153 ± 0.0707^c	1.0038 ± 0.0127
Andina	140	1.6355 ± 0.0354^a	1.0057 ± 0.0116
	160	2.2966 ± 0.0760^d	0.9923 ± 0.0168
	180	3.1486 ± 0.1484^e	0.9959 ± 0.0217

*Valores promedio ($n = 3$) \pm desviación estándar; k_2 = constante de velocidad de pérdida de agua; a = constante del modelo. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 9.B).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Henderson-Pabis que describe el comportamiento de la cinética de pérdida de agua para las variedades Ratona Morada y Andina (ecuaciones 31 y 32, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 140 °C, las ecuaciones quedan:

$$MR = a * e^{(-k_2 t)} = 1.0075 e^{(-0.01583 t)} \tag{31}$$

$$MR = a * e^{(-k_2 t)} = 1.0057 e^{(-0.01636 t)} \tag{32}$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Henderson-Pabis, indican que la constante de velocidad de pérdida de agua (k) en el tiempo de fritura es de 0.01583 s^{-1} y 0.01636 s^{-1} y la constante propia del modelo es de 1.0075 y 1.0057 (valores para Ratona Morada y Andina, respectivamente).

Al efectuar la comparación en las medias de los valores de la constante cinética k_2 del modelo de Henderson-Pabis entre las temperaturas para ambas variedades, según el análisis de varianza ANOVA, se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 9.B); lo cual demuestra que éste parámetro cinético depende significativamente de la temperatura. Así, en la tabla 6.5, se observa que la constante k_2 aumenta significativamente a medida que se incrementa la temperatura. Estos resultados, en relación a este comportamiento, concuerdan con los obtenidos por Bermúdez et al. (2010) y Osorio et al. (2015), en fritura de trozos de ñame y *chips* de arveja, respectivamente.

Respecto al parámetro a , se obtuvo un valor de $p > 0.05$ (ver anexo 9.B), no existiendo dependencia estadísticamente significativa con la temperatura, considerándose como constante. Este resultado coincide con lo reportado por Vega & Lemus (2006) en cinéticas de secado de papaya, quienes señalan que este parámetro podría estar más ligado a la estructura propia del tejido del alimento que de la temperatura del proceso.

6.2.2.3. Modelo de Page

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Page, con ayuda del programa Statgraphics Centurion, se muestran en la tabla 6.6 para cada temperatura de fritura y variedad de papa evaluadas.

Tabla 6.6. Parámetros cinéticos del modelo de Page para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Variedad	T (°C)	* $k_3 \times 10^{-2} (\text{s}^{-1})$	* n
Ratona Morada	140	1.1827 ± 0.2666^a	1.0664 ± 0.0526
	160	1.5102 ± 0.1882^{ab}	1.0554 ± 0.0301
	180	1.9755 ± 0.2511^b	1.0806 ± 0.0330
Andina	140	1.3113 ± 0.1697^a	1.0505 ± 0.0304
	160	3.3529 ± 0.5076^c	0.9081 ± 0.0375
	180	4.4623 ± 0.1576^d	0.9099 ± 0.0928

*Valores promedio ($n = 3$) \pm desviación estándar; k_3 = constante de velocidad de pérdida de agua; n = constante del modelo. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 9.C).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Page que describe el comportamiento de la cinética de pérdida de agua para las variedades Ratona Morada y Andina (ecuaciones 33 y 34, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 140 °C, las ecuaciones quedan:

$$MR = e^{(-k_3 t^n)} = e^{(-0.01183 t^{1.0664})} \tag{33}$$

$$MR = e^{(-k_3 t^n)} = e^{(-0.01311 t^{1.0505})} \tag{34}$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Page, indican que la constante de velocidad de pérdida de agua (k) en el tiempo de fritura es de 0.01183 s^{-1} y 0.01311 s^{-1} y la constante propia del modelo es de 1.0664 y 1.0505 (valores para Ratona Morada y Andina, respectivamente).

En la tabla 6.6 se observa que, para ambas variedades, conforme aumenta la temperatura, la constante k_3 del modelo de Page se incrementa; evidenciando que éste parámetro cinético presenta dependencia significativa con la temperatura. Lo anterior se corrobora mediante el análisis de varianza ANOVA, donde se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 9.C) en las medias de los valores de la constante cinética k_3 , al hacer la comparación entre las temperaturas trabajadas. Este comportamiento es similar al reportado en fritura al vacío de arveja (Osorio et al., 2015).

Respecto al parámetro n , se obtuvo un valor de $p > 0.05$ (ver anexo 9.C), no existiendo dependencia estadísticamente significativa con la temperatura, considerándose como constante. Este resultado concuerda con lo informado por Vega et al (2007), quienes señalan que este parámetro; al igual que la constante a del modelo de Henderson-Pabis, depende del tipo de producto que va a ser sometido a deshidratación, y de las condiciones de secado, más que de la temperatura del proceso.

6.2.3. Cinética de absorción de aceite

En la tabla 6.7 se muestran los valores obtenidos de la variación del contenido de aceite absorbido en base seca (g de aceite/g sólido seco) para rodajas de papa (*Solanum phureja*) de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura por inmersión a temperaturas de 140, 160 y 180 °C en función del tiempo. Los tiempos (0) segundos indican las condiciones iniciales de las muestras antes del proceso de fritura, donde el contenido de aceite absorbido es nulo.

Tabla 6.7. Contenido de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina en función del tiempo durante la fritura convencional a diferentes temperaturas

Tiempo (s)	*Contenido de aceite Y (g de aceite / g bs)					
	Ratona Morada			Andina		
	140 °C	160 °C	180 °C	140 °C	160 °C	180 °C
0	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000
30	0.2887 ± 0.0073 ^a	0.2826 ± 0.0085 ^a	0.2549 ± 0.0057 ^a	0.3046 ± 0.0055 ^a	0.3046 ± 0.0179 ^a	0.2818 ± 0.0253 ^a

60	0.3675 ± 0.0048 ^b	0.3324 ± 0.0073 ^b	0.3113 ± 0.0074 ^b	0.3769 ± 0.0108 ^b	0.3732 ± 0.0091 ^b	0.3347 ± 0.0101 ^b
90	0.3832 ± 0.0126 ^c	0.3626 ± 0.0083 ^c	0.3174 ± 0.0105 ^b	0.4254 ± 0.0091 ^c	0.3968 ± 0.0098 ^c	0.3613 ± 0.0048 ^c
120	0.4033 ± 0.0075 ^d	0.3712 ± 0.0067 ^c	0.3318 ± 0.0047 ^c	0.4356 ± 0.0048 ^{cd}	0.4223 ± 0.0059 ^d	0.3675 ± 0.0079 ^c
150	0.4166 ± 0.0055 ^d	0.3858 ± 0.0085 ^d	0.3425 ± 0.0051 ^c	0.4477 ± 0.0070 ^d	0.4226 ± 0.0137 ^d	0.3793 ± 0.0042 ^c

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; bs = base seca. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 8.A).

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.7 se observa que el máximo contenido de aceite absorbido por las rodajas de papa en el tiempo de fritura fue de 0.4166 g/g bs y 0.4477 g/g bs para las variedades Ratona Morada y Andina; lo cual representa una ganancia de un 41.7 % y un 44.8 % de aceite en base seca en el producto frito, respectivamente. Varios autores señalan que la cantidad de aceite absorbido a presión atmosférica en papas fritas a la francesa o tipo bastón oscila entre un 10 a 13.5 %; mientras que en láminas o tipo *chips*, como las de este estudio (ver anexo 1, tabla 1.1), se encuentra entre el 35 al 40 % (Losada, 2011; Montes et al., 2015).

De igual manera, se han reportado resultados similares en investigaciones de fritura convencional de diferentes materiales vegetales. Así, Moya (2011) obtuvo contenidos máximos de aceite absorbido en los rangos de 26.9 a 33.3% en base seca, en muestras de papa para tiempos de fritura de 1500 s. Por su parte, Bravo-Vásquez (2008) informó un contenido máximo de aceite de 26.2% en base seca, en láminas de manzana en tiempos de 150 s; y Barrios et al. (2015) obtuvieron un contenido de aceite de 33.9% en base seca, en fritura de arveja para tiempos de 480 s.

De manera global, los factores más importantes en la absorción de aceite son: las propiedades del producto como el tamaño, la forma, la relación superficie/volumen, la porosidad y la composición; las propiedades del aceite de fritura como la viscosidad, la tensión superficial y la calidad; los factores del proceso como los pretratamientos, el tiempo y la temperatura de fritura; y las condiciones de post-fritura (Freitas et al., 2009; Rimac et al., 2004; Ziaifar, Achir, Courtois, Trezzani, & Trystram, 2008); puesto que la absorción de aceite es considerada como un balance entre las fuerzas de adhesión como la capilaridad y el drenaje o escurrido (Ziaifar et al., 2008).

El análisis de varianza ANOVA indicó que la temperatura y el tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo (p < 0.05; ver anexo 8) sobre el contenido de aceite absorbido en las rodajas de papa de las dos variedades sometidas al proceso de fritura. Este comportamiento se corrobora en las figuras 6.6 y 6.7, en la cinética de absorción de aceite en función del tiempo de fritura para rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y

Andina, respectivamente; para cada temperatura evaluada. Cada punto en las curvas es el promedio de 3 repeticiones.

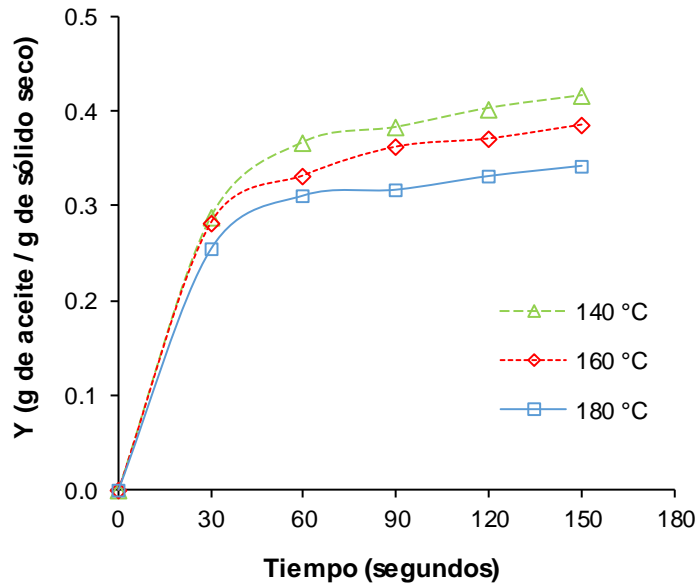


Figura 6.6. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso

Fuente: Este estudio

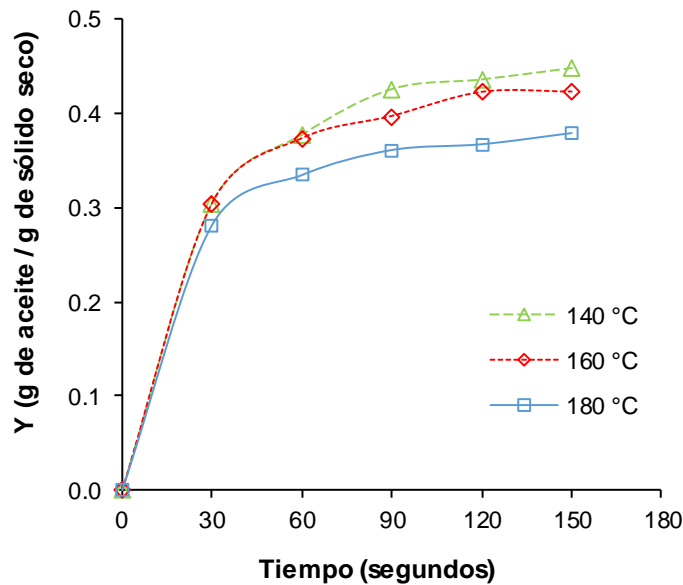


Figura 6.7. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a diferentes temperaturas de proceso

Fuente: Este estudio

En ambas figuras 6.6 y 6.7 se muestra que la velocidad de absorción de aceite; que viene dada por la pendiente del primer tramo de las curvas para cada temperatura, se incrementa en los primeros 30 segundos del proceso, aumentando rápidamente el contenido de aceite para ambas variedades; y coincide con el tiempo en el que se pierde una considerable cantidad de agua en las rodajas (figuras 6.1 y 6.2); resultado que concuerda con lo reportado por Bravo-Vásquez (2008) y Gómez (2012) en fritura de manzana y kiwi, respectivamente. Lo anterior se debe; principalmente, a que hay mayor evaporación del agua superficial; y los espacios capilares dejados por la misma son reemplazados por el aceite (Alvis-Bermúdez et al., 2016; Moya, 2011). Los resultados obtenidos permiten ratificar la relación que existe entre la pérdida de agua y la absorción de aceite y, que además, la absorción de aceite es un fenómeno complejo que ocurre a nivel superficial; tal como lo señalan Krokida et al. (2000); Mellema (2003); Moyano & Pedreschi (2006); y Troncoso & Pedreschi (2009).

Yamsaengsung & Moreira (2002) afirman que dicha porosidad juega un papel muy importante en la absorción de aceite; puesto que el aceite se adhiere a la superficie, y su entrada en la estructura del alimento es impedida por las presiones internas mayores (Pedreschi, Cocio, Moyano, & Troncoso, 2008), y sólo se absorbe en los poros cuando el producto es retirado del aceite; es decir, en el periodo de enfriamiento (Mai Tran, Dong Chen, & Southern, 2007). En este momento se desarrolla rápidamente un gradiente de presión positiva que produce un efecto de vacío que genera la fuerza que succiona el aceite dentro de los poros (Yamsaengsung & Moreira, 2002). Bouchon & Pyle (2005); Durán, Pedreschi, Moyano, & Troncoso (2007); y Pedreschi et al. (2008) coinciden con las afirmaciones anteriores.

En las figuras 6.6 y 6.7 también se aprecia que, pasados los 30 segundos del proceso, el contenido de aceite tiende a disminuir; debido a que, por un lado, los espacios capilares quedan saturados con aceite y, por otro lado, el encogimiento y la formación de la costra superficial, conforme transcurre el tiempo, dificultan la absorción de aceite (Aguilera, 1997; Villada, Villada, & Mosquera, 2009). Esta misma tendencia fue informada en diferentes productos fritos (Alvis-Bermúdez et al., 2016; Jibaja, 2010; Moya, 2011); hasta alcanzar un valor de equilibrio, el cual representa la máxima cantidad de aceite que el producto frito podría absorber.

Respecto al efecto de la temperatura, las curvas en ambas variedades corroboran que el contenido final de aceite en las muestras freídas a 140 °C es mayor que en aquellas freídas a 160 °C, y éste a su vez, mayor que en las de 180°C, con lo cual se evidencia una disminución significativa en el contenido de aceite conforme se incrementa la temperatura (ver anexo 8). Así, los valores máximos de contenido de aceite absorbido (tabla 6.7) corresponden a la temperatura de 140 °C, para luego disminuir en un 7.4% a 160 °C y 17.8% a 180 °C para Ratona Morada y 5.6% a 160 °C y 15.3% a 180 °C para Andina. Todo lo anterior permite concluir, en este estudio, que, a mayor temperatura en un tiempo dado,

menor es la absorción de aceite en el producto. Conclusiones similares fueron reportadas en fritura convencional (Alvis, González, & Arrázola, 2015; Moya, 2011; Ortega & Montes, 2014).

Durán et al. (2007); Taiwo & Baik (2007); Ziaifar, Achir, Courtois, Trezzani, & Trystram (2008); y Moreira, Da Silva, & Gomes (2009) afirman que a mayor temperatura, se gelatinizan más rápido los almidones; y la cantidad de agua libre se agota en el producto, lo cual crea una barrera para el escape de vapor que causa una expansión abrupta en los poros capilares; que al aumentar su tamaño, disminuyen la presión capilar y la absorción de aceite. Otro factor importante se considera cuando al aumentar la temperatura, la mayoría del agua se ha evaporado; entonces la tensión superficial se incrementa y la velocidad de absorción de aceite disminuye; aun cuando aumenta el área de contacto con el producto (Durán et al., 2007; Kim, Lim, Bae, Lee, & Lee, 2011; Ziaifar et al., 2008).

Moyano & Pedreschi (2006) coinciden de igual manera con que a mayor temperatura menor es la absorción de aceite. Sin embargo, Troncoso & Pedreschi (2009) afirman que a pesar de la existencia de estudios enfocados en determinar el efecto de la temperatura, aún no hay concordancia con dicho fenómeno. Por ejemplo, y contrario a lo observado en este estudio, algunos autores han reportado aumento del contenido de aceite conforme se incrementa la temperatura de éste en fritura convencional y al vacío para *chips* de zanahoria (Liu-Ping, Min-Zhang, Gong-Nian, Jin-Cai, & Qian-Tao, 2005), para láminas de manzana (Bravo-Vásquez, 2008) y *chips* de papa (Garayo & Moreira, 2002). Alvis et al. (2015) afirman que esto es válido y justificado porque consideran la pérdida de agua y la absorción como procesos simultáneos durante el freído.

Cuando se fríe a mayor temperatura, la velocidad de evaporación del agua se incrementa; lo cual resulta en una mayor pérdida de agua, generando mayor cantidad de espacios capilares vacíos en la estructura del alimento, destinados para la entrada del aceite (Alvis, Cortés, & Páez, 2009; Alvis et al., 2015; Kassama & Ngadi, 2005; Moreira et al., 2009). Según lo expuesto anteriormente, varios autores afirman que existe una relación inversamente proporcional entre el contenido de aceite y la pérdida de agua (Alvis-Bermúdez et al., 2016; Bravo-Vásquez, 2008; Jibaja, 2010).

No obstante; Bouchon, Aguilera, & Pyle (2003) señalan que si bien la pérdida de agua y la absorción de aceite están relacionadas, el contenido final de aceite no es equivalente a la cantidad total de agua perdida. Las diferencias en el comportamiento del contenido de aceite pueden deberse al hecho de que la absorción de aceite es un fenómeno que depende de los cambios en la microestructura del alimento relacionados con el encogimiento y, de igual manera, de la microestructura y de las propiedades de permeabilidad de la costra que se va formando (Bravo-Vásquez, 2008; Budzaki & Segura, 2005; Mellema, 2003; Moyano & Pedreschi, 2006; Troncoso & Pedreschi, 2009). Por su parte, Garayo & Moreira (2002)

mencionan que el tiempo de fritura influye en el contenido de aceite absorbido más que la temperatura.

Por otro lado, en las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 se observa que la evolución de la absorción de aceite es diferente para cada variedad. Así, rodajas de papa de la variedad Ratona Morada a todas las temperaturas absorbieron significativamente menos aceite que las de la variedad Andina al terminar el proceso de fritura (ver anexo 8). Este comportamiento era esperado ya que alimentos con un contenido menor de agua; principalmente agua superficial, resulta una menor evaporación y por tanto, menor porosidad interna donde se pueda ubicar el aceite absorbido (Aguilera, 1997; Demirkol et al., 2006; Kozempel et al., 1991), con lo cual se puede afirmar, en este estudio, que la absorción de aceite también se relaciona con la humedad inicial del producto.

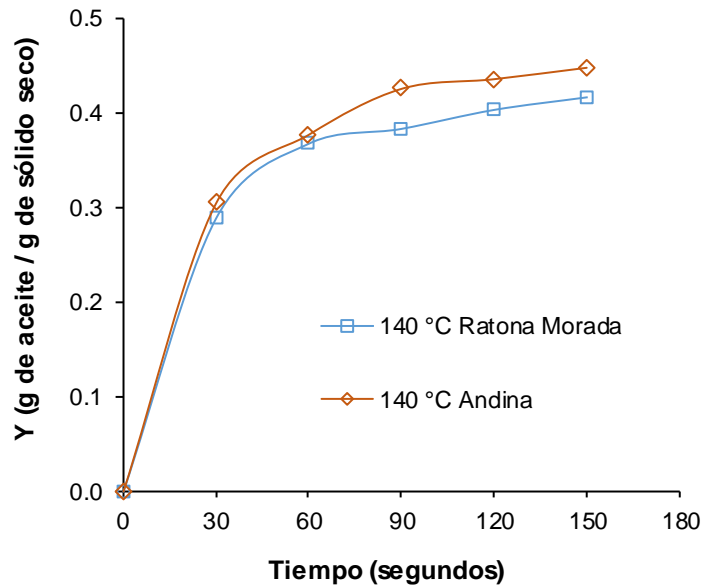


Figura 6.8. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura convencional a 140 °C

Fuente: Este estudio

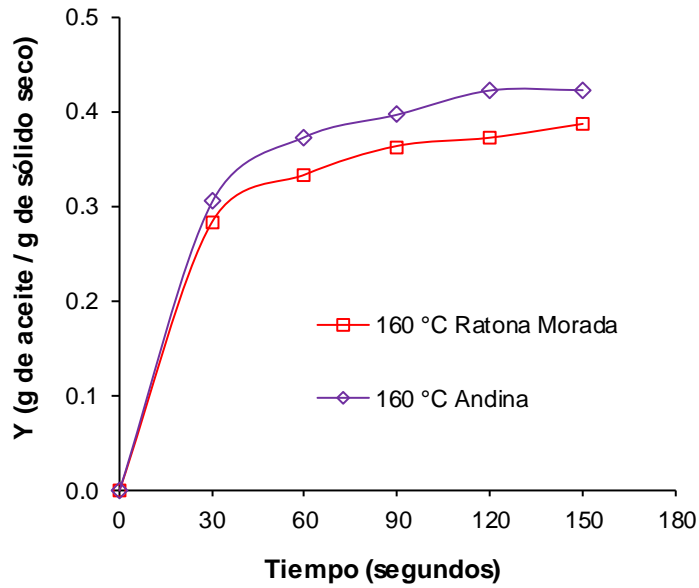


Figura 6.9. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura convencional a 160 °C

Fuente: Este estudio

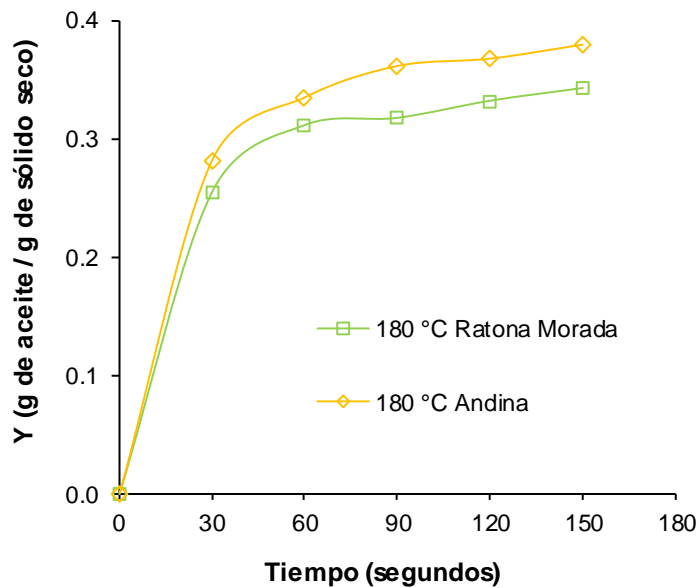


Figura 6.10. Cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina durante la fritura convencional a 180 °C

Fuente: Este estudio

Resultados similares se han obtenido en diversas investigaciones con materiales vegetales en los que se difería el nivel inicial de contenido de agua previo al proceso de

fritura, evidenciando menor absorción de aceite en aquellas muestras con menor contenido inicial de agua (Bermúdez et al., 2010; Gómez, 2012; Moya, 2011; Ortega & Montes, 2014).

De manera similar, Gamble et al. (1987) ha encontrado que la absorción de aceite está relacionada con la humedad residual del alimento; lo cual se explica recíprocamente con la humedad inicial, ya que muestras con menor humedad inicial presentan una humedad final mayor y menor absorción de aceite, mientras que muestras con mayor humedad inicial muestran una humedad residual menor y mayor absorción de aceite debido a que, como se dijo, la evaporación en las primeras es menor durante la fritura.

6.2.4. Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite

6.2.4.1. Modelo de Monod

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Monod, con ayuda del programa Statgraphics Centurion, se muestran en la tabla 6.8 para cada temperatura de fritura y variedad de papa evaluadas.

Tabla 6.8. Parámetros cinéticos del modelo de Monod para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Variedad	T (°C)	*Y _{e1} (g aceite / g bs)	*b (s)
Ratona Morada	140	0.4647 ± 0.0071 ^a	17.745 ± 1.3878 ^a
	160	0.4208 ± 0.0041 ^b	15.003 ± 0.8378 ^{bc}
	180	0.3704 ± 0.0060 ^c	13.188 ± 1.3355 ^b
Andina	140	0.5116 ± 0.0071 ^d	20.451 ± 1.3233 ^d
	160	0.4735 ± 0.0053 ^a	16.520 ± 0.9769 ^{ac}
	180	0.4141 ± 0.0028 ^b	14.058 ± 0.5632 ^b

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; Y_{e1} = contenido de aceite en equilibrio o máximo contenido; bs = base seca; b = tiempo de fritura durante el cual se ha adquirido la mitad de Y_{e1}. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 10.A).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Monod que describe el comportamiento de la cinética de absorción de aceite para las variedades Ratona Morada y Andina (ecuaciones 35 y 36, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 140 °C, las ecuaciones quedan:

$$Y = \frac{Y_{e1} t}{b+t} = \frac{0.4647 t}{17.745+t} \tag{35}$$

$$Y = \frac{Y_{e1} t}{b+t} = \frac{0.5116 t}{20.451+t} \tag{36}$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Monod, indican que el contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite absorbido (Y_e) en el tiempo de fritura es de 0.4647 g/g bs y 0.5116 g/g bs y cuando han transcurrido 17.7 s y 20.5 s del proceso (parámetro b), el producto adquiere la mitad del máximo contenido de aceite (valores para Ratona Morada y Andina, respectivamente).

El análisis de varianza ANOVA arrojó un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 10.A) para las medias de los valores de los parámetros cinéticos Y_e y b del modelo de Monod, al realizar la comparación entre las temperaturas evaluadas en cada variedad de papa. Esto es un indicativo de que existe dependencia significativa de los parámetros Y_e y b con la temperatura; mostrando valores significativamente más bajos a mayor temperatura, tal como se muestra en la tabla 6.8. Resultados semejantes frente a esta dependencia fueron reportados por Bravo-Vásquez (2008) en la aplicación de este modelo en fritura de láminas de manzana.

6.2.4.2. Modelo de Moyano-Pedreschi

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Moyano-Pedreschi, con ayuda del programa Statgraphics Centurion, se muestran en la tabla 6.9 para cada temperatura de fritura y variedad de papa evaluadas.

Tabla 6.9. Parámetros cinéticos del modelo de Moyano-Pedreschi para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Variedad	T (°C)	* Y_{e2} (g aceite / g bs)	* $k_1 \times 10^{-2}$ (s ⁻¹)
Ratona Morada	140	0.4648 ± 0.0071 ^a	5.6348 ± 0.4401 ^{ab}
	160	0.4208 ± 0.0041 ^b	6.6659 ± 0.3716 ^{cd}
	180	0.3704 ± 0.0060 ^c	7.5817 ± 0.7674 ^e
Andina	140	0.5116 ± 0.0071 ^d	4.8899 ± 0.3154 ^a
	160	0.4735 ± 0.0052 ^a	6.0533 ± 0.3579 ^{bc}
	180	0.4141 ± 0.0028 ^b	7.1129 ± 0.2851 ^{de}

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; Y_{e2} = contenido aceite en equilibrio o máximo contenido; bs = base seca; k_1 = constante de velocidad de absorción de aceite. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 10.B).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Moyano-Pedreschi que describe el comportamiento de la cinética de absorción de aceite para las variedades Ratona Morada y Andina (ecuaciones 37 y 38, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 140 °C, las ecuaciones quedan:

$$Y = \frac{Y_{e2} k_1 t}{1+(k_1 t)} = \frac{0.4647*0.05635 t}{1+(0.05635 t)} \quad (37)$$

$$Y = \frac{Y_{e2} k_1 t}{1+(k_1 t)} = \frac{0.5116*0.04890 t}{1+(0.04890 t)} \quad (38)$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Moyano-Pedreschi, indican que el contenido de aceite en el equilibrio o el máximo contenido de aceite absorbido (Y_e) en el tiempo de fritura es de 0.4647 g/g bs y 0.5116 g/g bs y la constante de velocidad de absorción de aceite (k) es de 0.05635 s⁻¹ y 0.04890 s⁻¹ (valores para Ratona Morada y Andina, respectivamente).

Al efectuar la comparación en las medias de los valores de los parámetros Y_e y k del modelo de Moyano-Pedreschi entre las temperaturas para ambas variedades, según el análisis de varianza ANOVA, se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 10.B); lo cual demuestra que éstos parámetros cinéticos dependen significativamente de la temperatura. Así, en la tabla 6.9, se observa que Y_e disminuye significativamente a medida que se incrementa la temperatura, mientras que el parámetro k aumenta. Estos resultados, respecto a este comportamiento, concuerdan con los obtenidos por Ortega & Montes (2014) y Moyano & Pedreschi (2006) respecto a este comportamiento en fritura de rodajas de yuca y papa, respectivamente.

6.2.4.3. Modelo Exponencial de primer orden

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo Exponencial de primer orden, con ayuda del programa Statgraphics Centurion, se muestran en la tabla 6.10 para cada temperatura de fritura y variedad de papa evaluadas.

Tabla 6.10. Parámetros cinéticos del modelo Exponencial de primer orden para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Variedad	T (°C)	* Y_{e3} (g aceite / g bs)	* $k_2 \times 10^{-2}$ (s ⁻¹)
Ratona Morada	140	0.4065 ± 0.0056 ^a	4.0106 ± 0.2641 ^{ab}
	160	0.3738 ± 0.0067 ^b	4.4037 ± 0.4069 ^{bc}
	180	0.3327 ± 0.0045 ^c	4.7351 ± 0.3536 ^c
Andina	140	0.4416 ± 0.0070 ^d	3.6641 ± 0.2563 ^a
	160	0.4172 ± 0.0060 ^e	4.1582 ± 0.2953 ^{ab}
	180	0.3701 ± 0.0050 ^b	4.5527 ± 0.3248 ^{bc}

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; Y_{e3} = contenido aceite en equilibrio o máximo contenido; bs = base seca; k_2 = constante de velocidad de absorción de aceite. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 10.C).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación exponencial de primer orden que describe el comportamiento de la cinética de absorción de aceite para las variedades Ratona Morada y Andina (ecuaciones 39 y 40, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 140 °C, las ecuaciones quedan:

$$Y = Y_{e_3} [1 - e^{(-k_2 t)}] = 0.4065 [1 - e^{(-0.04011 t)}] \quad (39)$$

$$Y = Y_{e_3} [1 - e^{(-k_2 t)}] = 0.4416 [1 - e^{(-0.03664 t)}] \quad (40)$$

Los parámetros empíricos de la ecuación exponencial de primer orden, indican que el contenido de aceite en el equilibrio o el máximo contenido de aceite absorbido (Y_e) en el tiempo de fritura es de 0.4065 g/g bs y 0.4416 g/g bs y la constante de velocidad de absorción de aceite (k) es de 0.04011 s⁻¹ y 0.03664 s⁻¹ (valores para Ratona Morada y Andina, respectivamente).

En la tabla 6.10 se observa que, conforme aumenta la temperatura, el parámetro Y_e disminuye; mientras que el parámetro k aumenta para ambas muestras; evidenciando que éstos parámetros empíricos presentan dependencia significativa con la temperatura. Lo anterior se corrobora mediante el análisis de varianza ANOVA, donde se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 10.C) en las medias de los parámetros Y_e y k del modelo de primer orden, al hacer la comparación entre las temperaturas en las dos variedades de papa trabajadas. Este comportamiento es similar al reportado en fritura de Nuggets de camarón (Nasiri, Mohebbi, Yazdi, & Haddad Khodaparast, 2011); rodajas de papa (Moya, 2011) y *chips* de arveja (Barrios et al., 2015).

6.3. Selección de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos variedades de papa (*Solanum phureja*)

6.3.1. Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de pérdida de agua

Un primer criterio para evaluar la calidad de ajuste de un modelo es la observación gráfica, en la cual se juzga la forma en que los valores calculados del modelo se ajustaron a los datos experimentales (Gutiérrez & de la Vara, 2008). Con base en este criterio, en las figuras 6.11 a la 6.16; las cuales muestran la representación gráfica de los datos de pérdida de agua (MR en función del tiempo) calculados con los modelos propuestos y los obtenidos experimentalmente para las dos variedades de papa estudiadas, a las diferentes temperaturas del proceso de fritura, se observa que, en términos generales, los valores calculados de cada

modelo se ajustan adecuadamente a los valores experimentales, validando su utilización en la descripción del fenómeno de pérdida de agua en las rodajas de papa.

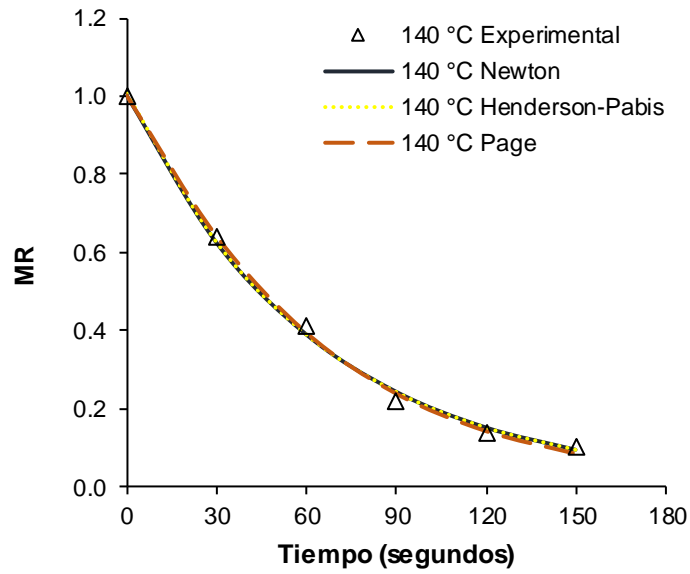


Figura 6.11. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 140 °C

Fuente: Este estudio

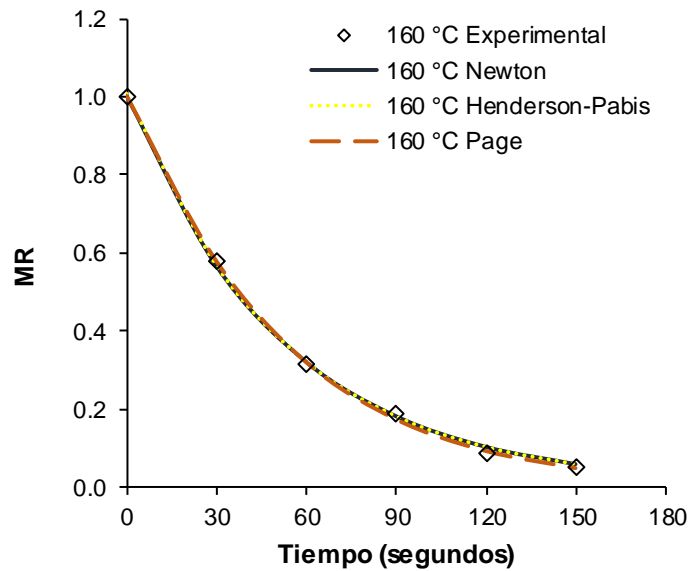


Figura 6.12. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 160 °C

Fuente: Este estudio

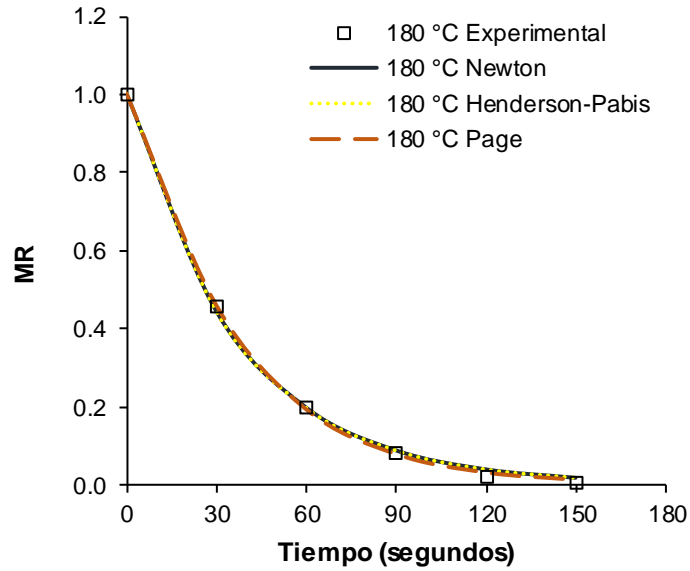


Figura 6.13. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 180 °C

Fuente: Este estudio

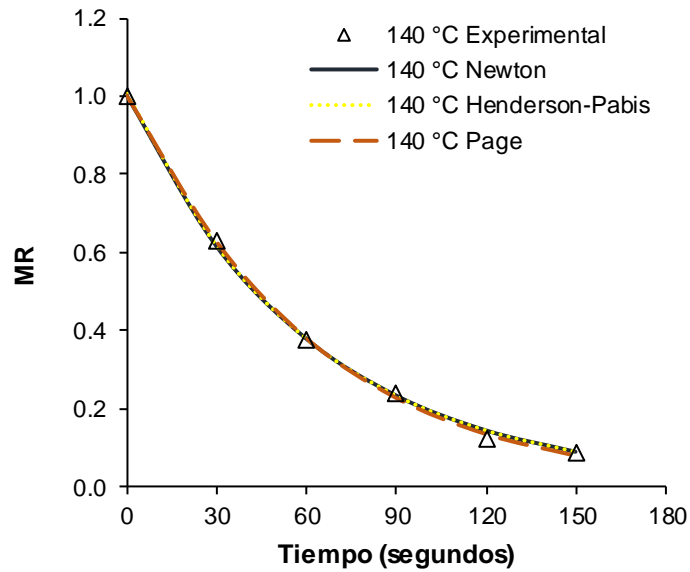


Figura 6.14. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 140 °C

Fuente: Este estudio

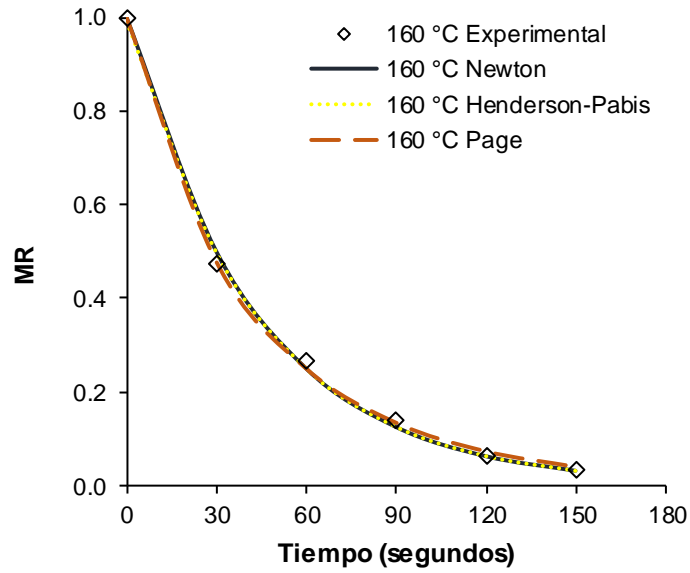


Figura 6.15. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 160 °C

Fuente: Este estudio

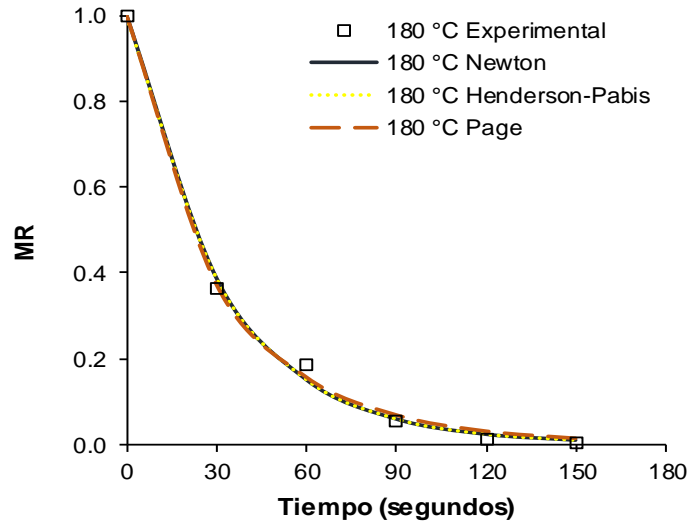


Figura 6.16. Cinética de pérdida de agua experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 180 °C

Fuente: Este estudio

De igual manera, Gutiérrez & de la Vara (2008) señalan que en un gráfico que representa los valores calculados en función de los valores experimentales o medidos, la aproximación de los puntos a la línea de referencia indica que los valores calculados son muy parecidos a los valores observados.

Atendiendo a lo expuesto por estos autores, las figuras 6.17 y 6.18 muestran la comparación de los valores calculados del contenido de agua obtenido en cada modelo frente a los valores experimentales, en el rango de temperaturas de 140 –180 °C para las variedades Ratona Morada y Andina, respectivamente. Donde *MR Cal* es el contenido de agua calculado y *MR Exp* es el experimental. Se puede observar, en general, que existe una correlación satisfactoria entre los datos experimentales y los calculados de cada modelo.

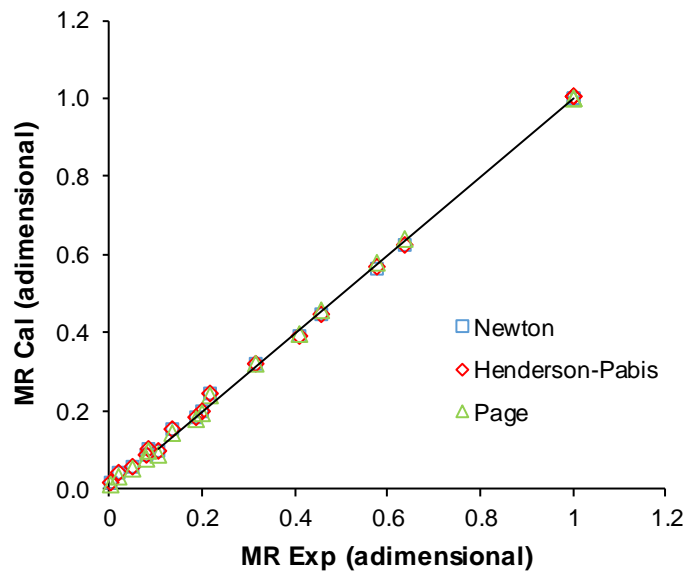


Figura 6.17. Valores de contenido de agua calculados y experimentales de la variedad Ratona Morada para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C

Fuente: Este estudio

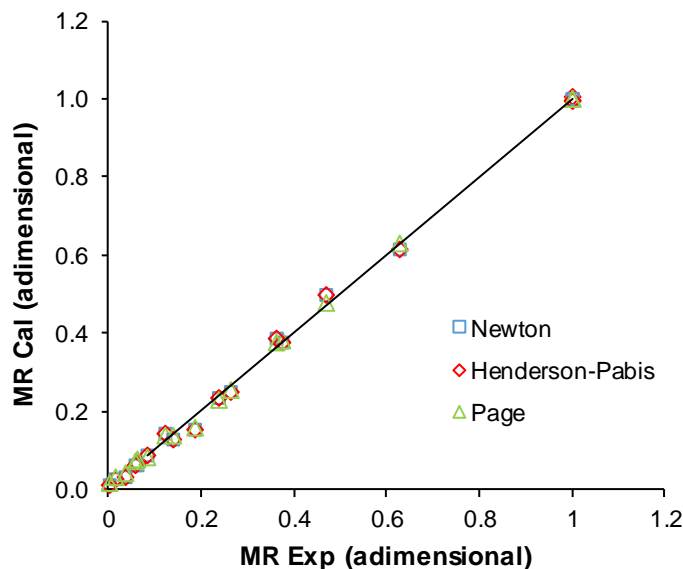


Figura 6.18. Valores de contenido de agua calculados y experimentales de la variedad Andina para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C

Fuente: Este estudio

El resumen de los parámetros estadísticos de los modelos aplicados obtenidos mediante el programa Statgraphics Centurion se presenta en la tabla 6.11 para cada temperatura de fritura y variedad de papa estudiadas.

Tabla 6.11. Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de pérdida de agua para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Modelo	T (°C)	Parámetros estadísticos							
		Ratona Morada				Andina			
		R ²	SSE x 10 ⁻⁴	RMSE x 10 ⁻²	MAE x 10 ⁻³	R ²	SSE x 10 ⁻⁴	RMSE x 10 ⁻²	MAE x 10 ⁻³
Newton	140	0.9975	15.39	1.754	13.81	0.9989	6.550	1.145	7.773
	160	0.9990	6.419	1.133	8.319	0.9981	12.63	1.589	10.54
	180	0.9991	6.907	1.175	8.728	0.9974	19.39	1.969	12.81
Henderson-Pabis	140	0.9976	14.74	1.920	14.49	0.9990	6.179	1.243	8.275
	160	0.9991	6.122	1.237	8.847	0.9982	12.00	1.732	11.16
	180	0.9991	6.752	1.299	9.189	0.9974	19.22	2.192	13.48
Page	140	0.9983	10.48	1.619	10.48	0.9994	3.481	0.933	5.896
	160	0.9996	2.969	0.862	4.710	0.9993	4.468	1.057	7.147
	180	0.9997	1.971	0.702	4.642	0.9979	15.12	1.945	13.31

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.11 se observa que, en términos generales, los valores de los parámetros estadísticos de los modelos a las temperaturas dadas, se encuentran en rangos óptimos: de 0.9974 a 0.9997 para R², 1.971 x 10⁻⁴ a 1.939 x 10⁻³ para SSE, 7.019 x 10⁻³ a 2.192 x 10⁻² para

RMSE y 4.642×10^{-3} a 1.449×10^{-2} para *MAE*; valores muy cercanos a 1, en el caso del parámetro R^2 ; y valores muy cercanos a 0, para los parámetros *SSE*, *RMSE* y *MAE*; lo cual indica que los modelos propuestos en este estudio describen de manera adecuada la cinética de pérdida de agua en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina, presentando un buen ajuste de los datos calculados con los datos experimentales.

6.3.2. Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de pérdida de agua

La tabla 6.12 resume el promedio de los resultados de los parámetros estadísticos de cada temperatura para cada modelo ajustado, como criterio de selección del mejor modelo para cada variedad de papa.

Tabla 6.12. Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de pérdida de agua para cada variedad de papa

Modelo	*Parámetros estadísticos							
	Ratona Morada				Andina			
	R^2	<i>SSE</i> x 10^{-4}	<i>RMSE</i> x 10^{-2}	<i>MAE</i> x 10^{-2}	R^2	<i>SSE</i> x 10^{-4}	<i>RMSE</i> x 10^{-2}	<i>MAE</i> x 10^{-2}
Newton	0.9985	9.571	1.354	1.029	0.9981	12.86	1.568	1.037
Henderson-Pabis	0.9986	9.206	1.485	1.084	0.9982	12.47	1.722	1.097
Page	0.9992	5.141	1.061	0.661	0.9989	7.691	1.311	0.878

*Valores promedio (n = 3).

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.12 se observa que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales de contenido de agua para cada variedad de papa es el modelo de Page, puesto que presentan una calidad de ajuste mayor con respecto a los modelos de Newton y de Henderson-Pabis, tendiendo valores de R^2 más próximos a 1 y valores de *SSE*, *RMSE* y *MAE* que tienden más a 0. En consecuencia, este modelo puede describir mejor el comportamiento cinético de pérdida de agua en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina para las diferentes condiciones del proceso de fritura convencional.

Resultados similares se han reportado en investigaciones previas por otros autores, en procesos de secado y fritura de diferentes productos alimenticios. Así, Vega & Lemus (2006) también obtuvieron el mejor ajuste de los datos experimentales con el modelo de Page frente a los modelos de Newton y de Henderson-Pabis en secado de papaya; informando los mayores valores de R^2 (0.98 a 0.99), *SSE* (9.0×10^{-4} a 2.0×10^{-3}); y *RMSE* (0.0292 a 0.0443); Garg, Sharma, Sadhu, & Sushmita (2014) informaron que el mejor ajuste de los datos experimentales del secado de láminas delgadas de arveja se dio con el modelo de Page, obteniendo altos valores de R^2 (0.9938), y valores bajos de *RMSE* (1.38×10^{-5}). Por su parte, Osorio et al. (2015) reportaron que el modelo de Page representaba mejor la cinética de pérdida de agua en fritura al vacío de arveja; con rangos de R^2 de 0.971 a 0.999, y rangos de *RMSE* de 0.052 a 0.424.

Según Vega & Lemus (2006), los mejores resultados obtenidos con el modelo de Page, se puede deber a que el parámetro n de este modelo, se encuentra en forma exponencial; con lo cual se obtiene una mejor aproximación matemática de los datos experimentales.

6.3.3. Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de absorción de aceite

Un primer criterio para evaluar la calidad de ajuste de un modelo es la observación gráfica, en la cual se juzga la forma en que los valores calculados del modelo se ajustaron a los datos experimentales (Gutiérrez & de la Vara, 2008). Con base en este criterio, en las figuras 6.19 a la 6.24; las cuales muestran la representación gráfica de los datos de absorción de aceite (g aceite / g bs en función del tiempo) calculados con los modelos propuestos y los obtenidos experimentalmente para las dos variedades de papa estudiadas, a las diferentes temperaturas del proceso de fritura, se observa que, en términos generales, los valores calculados de cada modelo se ajustan adecuadamente a los valores experimentales. También se puede apreciar que los modelos de Monod y de Moyano-Pedreschi exhiben curvas muy similares a pesar de presentar ecuaciones matemáticas diferentes. No obstante, si bien cada uno de los modelos aplicados describen adecuadamente el fenómeno de absorción de aceite, los modelos de Monod y de Moyano-Pedreschi se aproximan mucho más a los datos experimentales en todo el proceso en las dos variedades.

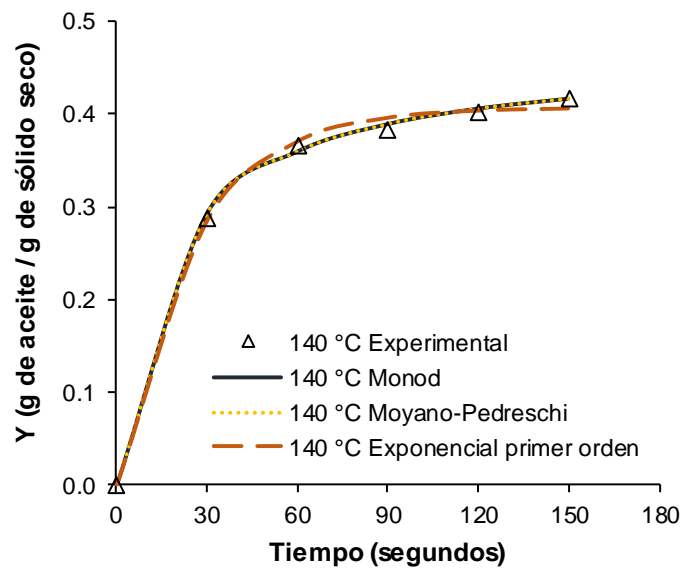


Figura 6.19. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 140 °C

Fuente: Este estudio

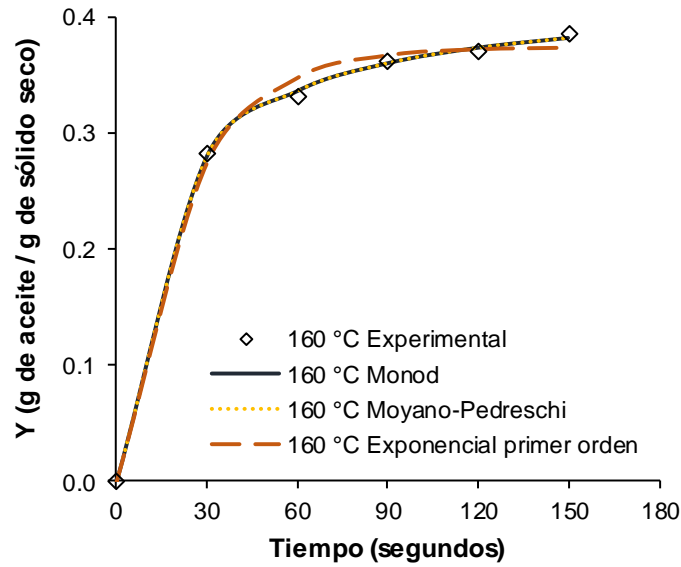


Figura 6.20. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 160 °C

Fuente: Este estudio

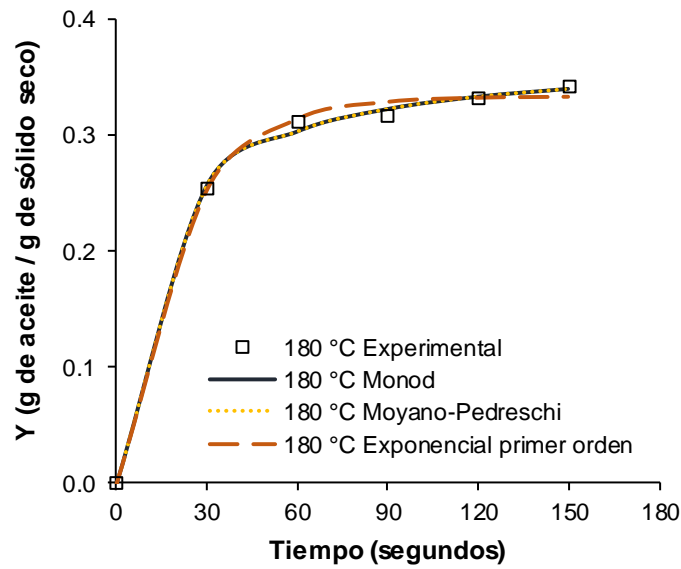


Figura 6.21. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Ratona Morada durante la fritura convencional a 180 °C

Fuente: Este estudio

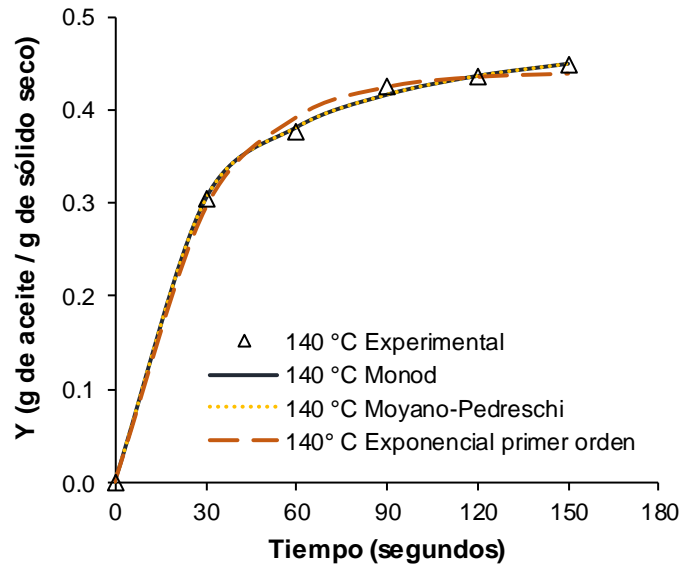


Figura 6.22. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 140 °C

Fuente: Este estudio

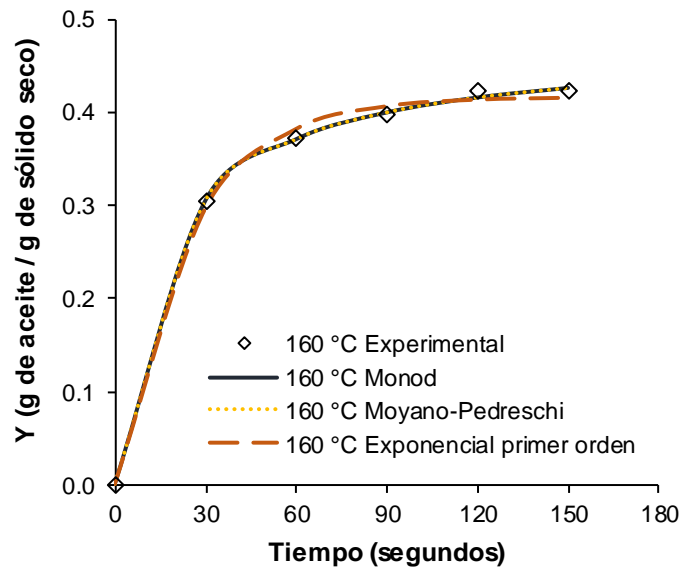


Figura 6.23. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 160 °C

Fuente: Este estudio

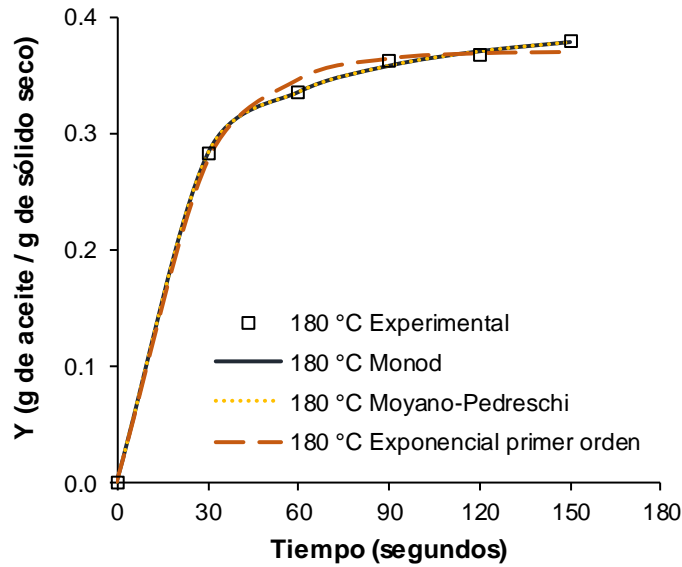


Figura 6.24. Cinética de absorción de aceite experimental y calculada en rodajas de papa de la variedad Andina durante la fritura convencional a 180 °C

Fuente: Este estudio

De igual manera, Gutiérrez & de la Vara (2008) señalan que en un gráfico que representa los valores calculados en función de los valores experimentales o medidos, la aproximación de los puntos a la línea de referencia indica que los valores calculados son muy parecidos a los valores observados.

Atendiendo a lo expuesto por estos autores, las figuras 6.25 y 6.26 muestran la comparación de los valores calculados del contenido de aceite absorbido obtenido en cada modelo frente a los valores experimentales, en el rango de temperaturas de 140 –180 °C para las variedades Ratona Morada y Andina, respectivamente. Donde Y_{Cal} es el contenido de aceite calculado e Y_{Exp} es el experimental. Se puede observar, en general, que existe una correlación satisfactoria entre los datos experimentales y los calculados de cada modelo. Sin embargo, los modelos de Monod y de Moyano-Pedreschi indican una mejor alineación de los puntos en las dos variedades.

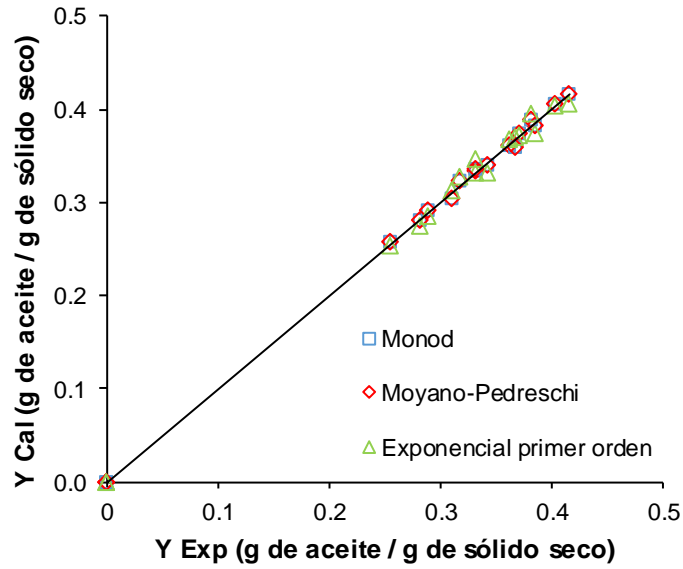


Figura 6.25. Valores de contenido de aceite calculados y experimentales de la variedad Ratona Morada para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C

Fuente: Este estudio

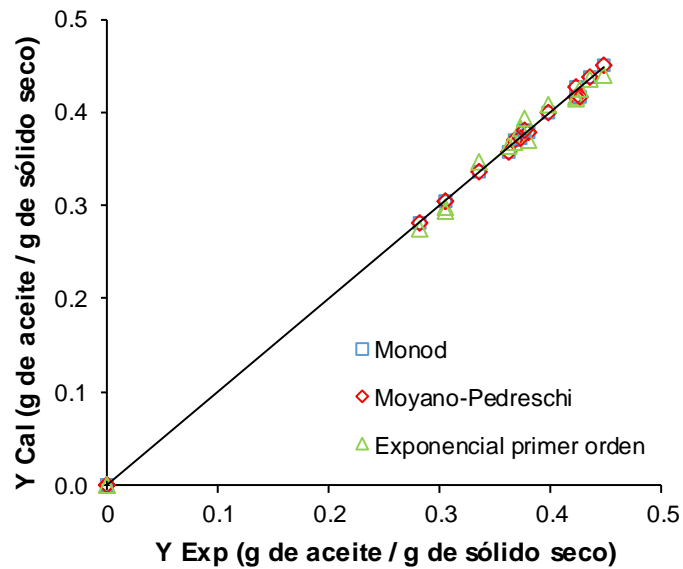


Figura 6.26. Valores de contenido de aceite calculados y experimentales de la variedad Andina para cada modelo en el rango de temperatura de fritura de 140 – 180 °C

Fuente: Este estudio

El resumen de los parámetros estadísticos de los modelos aplicados obtenidos mediante el programa Statgraphics Centurion se presenta en la tabla 6.13 para cada temperatura de fritura y variedad de papa estudiadas.

Tabla 6.13. Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Modelo	T (°C)	Parámetros estadísticos							
		Ratona Morada				Andina			
		R ²	SSE x 10 ⁻⁴	RMSE x 10 ⁻³	MAE x 10 ⁻³	R ²	SSE x 10 ⁻⁴	RMSE x 10 ⁻³	MAE x 10 ⁻³
Monod	140	0.9991	1.176	5.423	3.292	0.9993	1.032	5.080	2.939
	160	0.9996	0.447	3.344	2.390	0.9995	0.673	4.102	2.662
	180	0.9988	1.044	5.108	3.279	0.9998	0.214	2.310	1.332
Moyano-Pedreschi	140	0.9991	1.176	5.423	3.292	0.9993	1.032	5.080	2.939
	160	0.9996	0.447	3.344	2.390	0.9995	0.673	4.102	2.662
	180	0.9988	1.044	5.108	3.277	0.9998	0.214	2.310	1.332
Exponencial primer orden	140	0.9976	2.968	8.614	5.002	0.9972	4.112	10.14	5.722
	160	0.9956	4.660	10.79	6.790	0.9973	3.565	9.441	6.910
	180	0.9973	2.268	7.530	4.271	0.9975	2.652	8.142	5.116

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.13 se observa que, en términos generales, los valores de los parámetros estadísticos a las temperaturas dadas, se encuentran en rangos óptimos: de 0.9956 a 0.9998 para R^2 , 4.660×10^{-4} a 2.135×10^{-5} para SSE , 2.310×10^{-3} a 1.079×10^{-2} para $RMSE$ y 1.332×10^{-3} a 6.910×10^{-3} para MAE ; valores que son muy cercanos a 1, en el caso del parámetro R^2 ; y valores muy cercanos a 0, para los parámetros SSE , $RMSE$ y MAE ; lo cual indica que los modelos propuestos en este estudio describen de manera adecuada la cinética de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina, presentando un buen ajuste de los datos calculados con los datos experimentales.

6.3.4. Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de absorción de aceite

La tabla 6.14 resume el promedio de los resultados de los parámetros estadísticos de cada temperatura para cada modelo ajustado, como criterio de selección del mejor modelo para cada variedad de papa.

Tabla 6.14. Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada variedad de papa

Modelo	*Parámetros estadísticos							
	Ratona Morada				Andina			
	R ²	SSE x 10 ⁻⁴	RMSE x 10 ⁻³	MAE x 10 ⁻³	R ²	SSE x 10 ⁻⁴	RMSE x 10 ⁻³	MAE x 10 ⁻³
Monod	0.9991	0.889	4.625	2.987	0.9995	0.640	3.831	2.311
Moyano-Pedreschi	0.9991	0.889	4.625	2.986	0.9995	0.640	3.831	2.311
Exponencial primer orden	0.9969	3.299	8.979	5.354	0.9973	3.443	9.241	5.916

*Valores promedio (n = 3).

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.14 se observa que los modelos que mejor se ajustan a los datos experimentales de contenido de aceite absorbido para cada variedad de papa son los modelos de Monod y de Moyano-Pedreschi, puesto que presentan una calidad de ajuste mayor con respecto al modelo Exponencial, tendiendo valores de R^2 más próximos a 1 y valores de SSE , $RMSE$ y MAE que tienden más a 0. También se puede apreciar que estos dos modelos presentaron resultados muy similares. En consecuencia, cualesquiera de estos modelos pueden describir mejor el comportamiento cinético de absorción de aceite en rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina para las diferentes condiciones del proceso de fritura convencional. Sin embargo, los valores de contenido máximo de aceite absorbido obtenidos en los modelos de Monod y de Moyano-Pedreschi son relativamente mayores a los obtenidos experimentalmente (0.4166 g/g bs y 0.4477 g/g bs para Ratona Morada y Andina, respectivamente; ver tabla 6.7) y relativamente menores a los obtenidos con el modelo exponencial.

Resultados similares se han reportado en investigaciones previas por otros autores. Así, Jibaja (2010) también obtuvo el mejor ajuste de los datos experimentales con los modelos de Monod y de Moyano Pedreschi frente al modelo exponencial en fritura al vacío de hojuelas de tomate de árbol; informando los mayores valores de R^2 (0.9927), $RMSE$ (0.0031) y MAE (0.0021) para ambos modelos. Por su parte, Osorio et al. (2015) reportaron que el modelo de Monod representaba mejor la cinética de absorción de aceite en fritura al vacío de arveja; con rangos de R^2 de 0.8840 a 0.9926, y rangos de $RMSE$ de 0.221 a 1.110.

Según Nielsen (2004) el modelo de Monod; conocido como la hipérbola rectangular, describe cinéticas de ganancia, y su representación gráfica es muy similar a la forma que presentan los datos experimentales de absorción de aceite, validando su utilización. No obstante, el modelo de Moyano-Pedreschi también resulta ser una buena opción.

6.4. Determinación de la difusividad del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) requerida en los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*).

6.4.1. Difusividad efectiva del agua

Las figuras 6.27 y 6.28 muestran el ajuste lineal ($\ln MR$ vs t) del modelo de Fick de los datos experimentales para las rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina, respectivamente, freídas a las temperaturas evaluadas; para la determinación de la difusividad efectiva (D_{eff}). Los valores de D_{eff} obtenidos a través de la pendiente de las gráficas se presentan en la tabla 6.15.

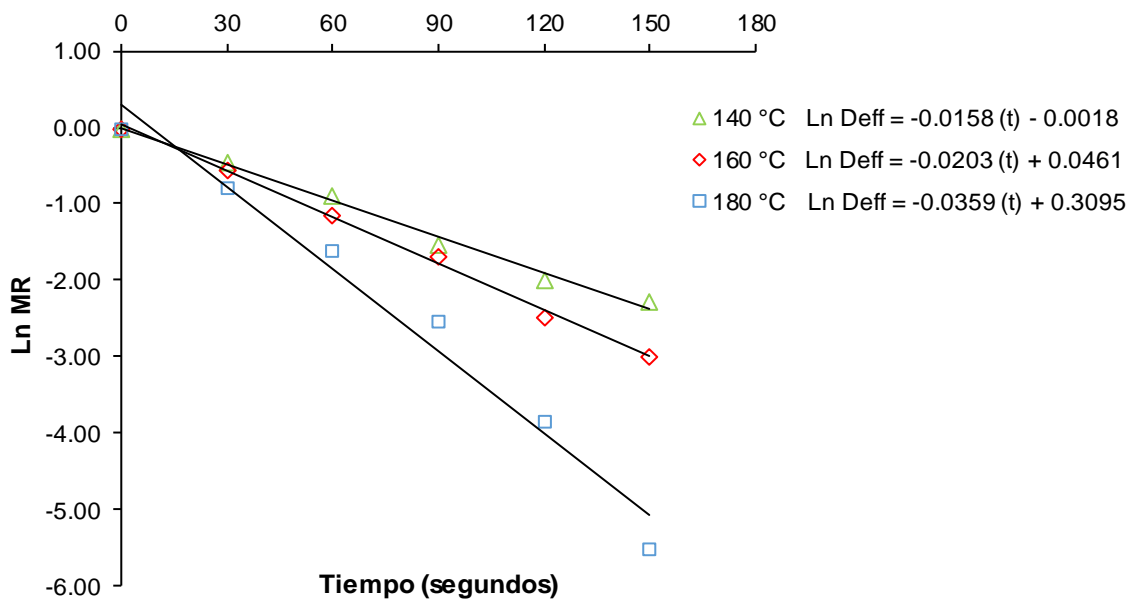


Figura 6.27. Relación de Ln MR con el tiempo de la variedad Ratona Morada para cada temperatura de fritura

Fuente: Este estudio

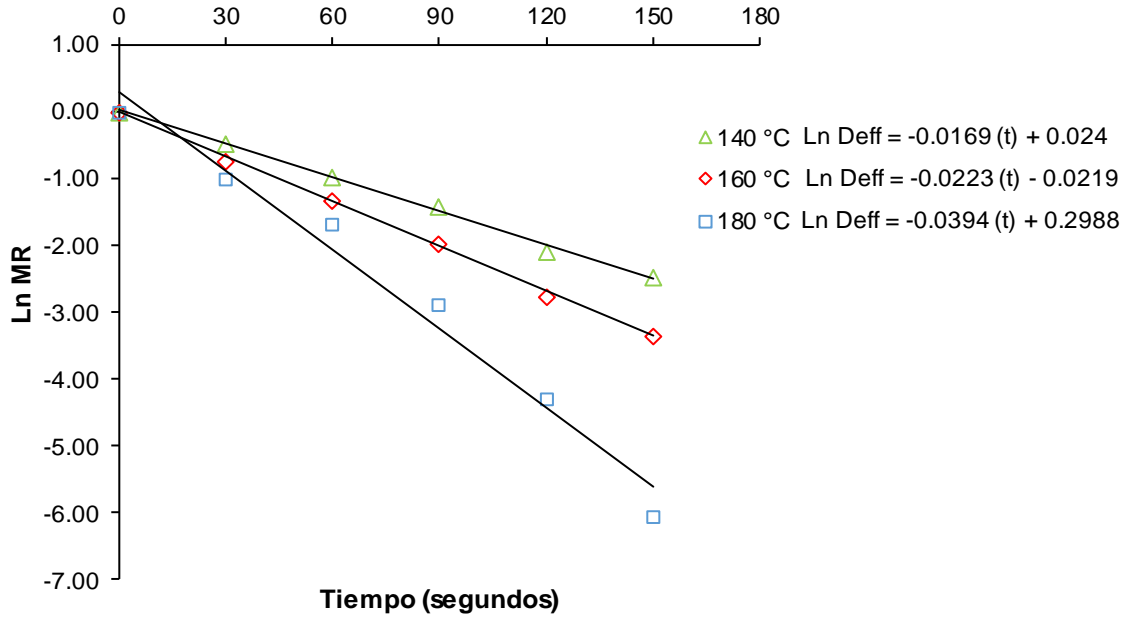


Figura 6.28. Relación de Ln MR con el tiempo de la variedad Andina para cada temperatura de fritura

Fuente: Este estudio

Tabla 6.15. Difusividad efectiva del modelo de Fick para cada temperatura de fritura y variedad de papa

Variedad	T (°C)	* $D_{\text{eff}} \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$	R^2
Ratona Morada	140	6.4035 ± 0.2837^a	0.9917
	160	8.2273 ± 0.2432^b	0.9965
	180	14.550 ± 1.2159^c	0.9750
Andina	140	6.8493 ± 0.2026^a	0.9964
	160	9.0378 ± 0.1621^b	0.9984
	180	15.968 ± 1.2159^d	0.9760

*Valores promedio ($n = 3$) \pm desviación estándar; D_{eff} = difusividad efectiva del agua. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 12).

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.15 se observa que los valores de coeficiente de determinación (R^2) son mayores que 0.97. Por tanto, se puede afirmar que el modelo de difusión de Fick describe satisfactoriamente la transferencia de agua en el proceso de fritura de las rodajas de papa de las variedades Ratona Morada y Andina. Los valores de D_{eff} obtenidos en este estudio varían entre 6.4035×10^{-9} y $1.5968 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para el rango de temperaturas estudiado; sin embargo, se encuentran en el orden de magnitud de 10^{-8} a $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para los alimentos deshidratados (Sacilik & Elicin, 2006).

Algunos valores de D_{eff} para otros materiales deshidratados en fritura convencional han sido reportados en la literatura. Así, para papas a la francesa fritas a temperaturas de entre 160 y 180 °C, los valores obtenidos están entre 4.14 y $6.7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Moyano & Berna, 2002). Alvis et al. (2015) reportaron valores en los rangos de 0.92 y $1.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para trozos de batata a temperaturas de 150, 170 y 190 °C, siendo mayores a los obtenidos por Tirado, Acevedo, & Guzmán (2015) en fruta de pan (1.08 a $10.86 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) a temperaturas en los rangos de 150 y 190 °C; aclarando que las diferencias pueden ser atribuidas a la naturaleza del producto, las condiciones del proceso como la temperatura, tamaño de la muestra y los métodos de determinación (Alvis et al., 2015; Ríos, Granados, Martínez, & Félix, 2013).

Por otra parte, el análisis de varianza ANOVA indicó que existe una influencia significativa de la temperatura de fritura sobre la difusividad efectiva de ambas variedades de papa ($p < 0.05$; ver anexo 12); lo cual se evidencia en la tabla 6.15, mostrando que los valores de D_{eff} aumentaron con el incremento de la temperatura, es decir que, a mayor temperatura, las muestras ofrecen menor resistencia interna a la migración de la humedad (Sosa Brito & Campos Marín, 2010). Esto puede ser explicado por Pedreschi et al. (2006) y Montes et al. (2008); ya que mayor temperatura, implica mayor porosidad, porque la tasa de evaporación aumenta; como consecuencia, hay una mayor área de transferencia de masa.

Krokida et al. (2000) ratifica esta afirmación al considerar que el transporte del agua es más rápido e intenso cuanto mayor es la temperatura del proceso; entendiéndose la difusividad como la facilidad con que el agua es removida del producto (Giraldo-Zuniga et al., 2010).

Otros estudios que también obtienen esta relación entre la temperatura y la difusividad del agua en fritura convencional y al vacío son los realizados por Yildiz et al. (2007) y Debnathb, Rastogia, Krishnab, & And Lokesh (2012) en trozos de papa; y Bravo, Sanjuán, Clemente, & Mulet (2011) en *chips* de manzana.

Los valores de difusividad efectiva presentaron equivalencias entre las dos variedades de papa a una temperatura dada, como se muestra en la tabla 6.15.

6.4.2. Energía de activación para el fenómeno de pérdida de agua

La influencia de la temperatura de fritura sobre la difusividad efectiva (D_{eff}) fue ajustada a la ecuación de Arrhenius mediante regresión lineal; la cual se muestra en la figura 6.29, con el fin de obtener la energía de activación (E_a) para el comportamiento cinético de pérdida de agua en las rodajas de papa de las variedades de papa Ratona Morada y Andina. Los valores de E_a obtenidos a través de la pendiente de las gráficas se presentan en la tabla 6.16.

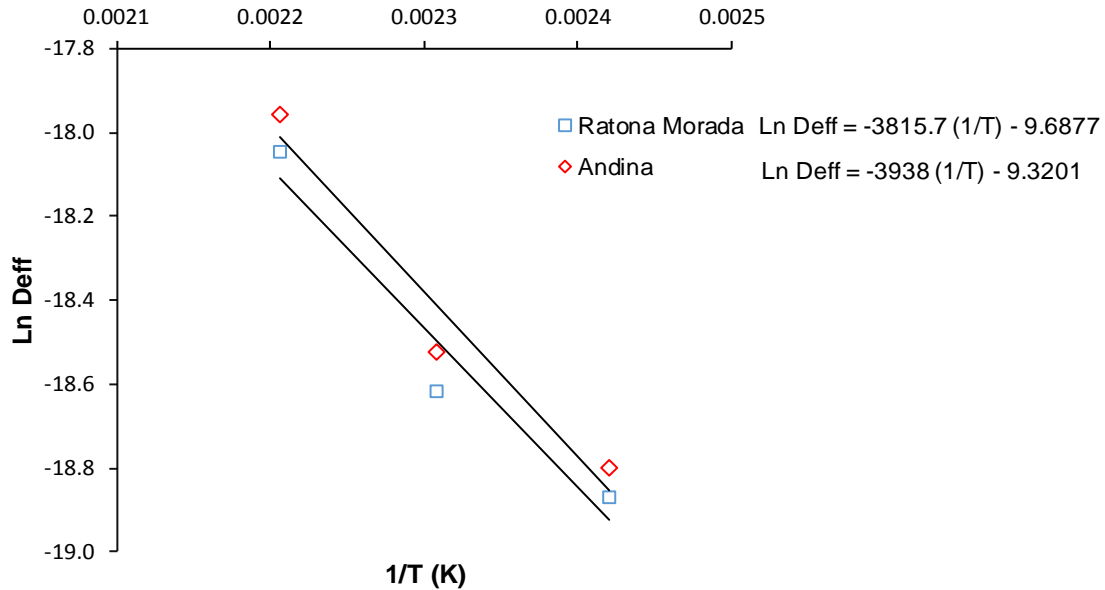


Figura 6.29. Gráfica de Arrhenius de la influencia de la temperatura con la difusividad del agua para las variedades Ratona Morada y Andina

Fuente: Este estudio

Tabla 6.16. Energía de activación del modelo de Arrhenius de la difusividad efectiva para cada variedad de papa

Variedad	*E _a (kJ/mol)	R ²
Ratona Morada	31.724 ± 8.0230	0.9399
Andina	32.741 ± 7.4327	0.9510

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio

Según Montes et al. (2008) y Melquíades et al. (2009), la energía de activación del fenómeno de pérdida de agua, representa termodinámicamente la energía requerida por las moléculas para iniciar la difusión del agua a través del producto; la cual proviene, inicialmente, de la energía térmica aportada por el aceite (Osorio et al., 2015). Así, los valores de energía de activación requerida para la difusión del agua en el proceso de fritura se muestran la tabla 6.16, siendo mayores a los obtenidos en la literatura para alimentos deshidratados: zanahorias (22.43 kJ/mol), para un rango de temperaturas de 50 a 80 °C (Toğrul, 2006) y papa (23.5 kJ/mol) para temperaturas entre 120 y 140 °C (Troncoso & Pedreschi, 2009); pero menores a los obtenidos por Faustino, Barroca, & Guiné (2007) en pimentones (47.10 kJ/mol), utilizando temperaturas de 30 a 40 °C y por Ortega & Montes (2014) en yuca (37.84 kJ/mol) para temperaturas de entre 140 y 180 °C. No obstante, estas magnitudes y las obtenidas en este estudio se encuentran dentro del rango informado en la literatura para productos alimenticios sometidos a deshidratación (12.7 a 110 kJ/mol)

(Montes et al., 2008). Espinoza-Saavedra (2011) señala que los valores de E_a dependen tanto de las temperaturas del proceso como del producto utilizado.

Respecto a la influencia de la temperatura, se evidencia que a mayor temperatura se requiere menor E_a para comenzar a promover la evaporación del agua interna del producto (Bravo-Vásquez, 2008), concordando en este estudio con el hecho de que a mayor temperatura, mayor es la pérdida de agua.

Por otra parte, el análisis de varianza ANOVA indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de E_a , al realizar la comparación de las variedades de papa ($p > 0.05$; ver anexo 14).

6.4.3. Energía de activación para el fenómeno de absorción de aceite

La variación del contenido máximo de aceite absorbido o contenido de aceite en equilibrio (Y_e) con respecto a la temperatura de fritura fue ajustada a la ecuación de Arrhenius mediante regresión lineal; la cual se muestra en la figura 6.30, con el fin de obtener la energía de activación (E_a) para el comportamiento cinético de absorción de aceite en las rodajas de papa de las variedades de papa Ratona Morada y Andina. Los valores de E_a obtenidos a través de la pendiente de las gráficas se presentan en la tabla 6.17.

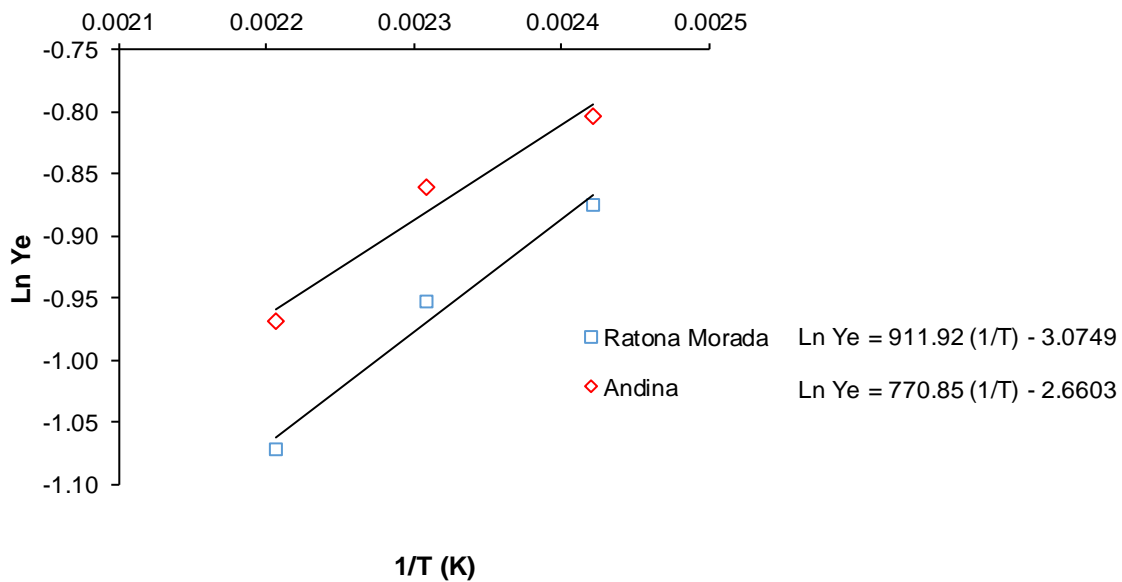


Figura 6.30. Gráfica de Arrhenius de la variación del contenido de aceite en equilibrio con la temperatura para las variedades Ratona Morada y Andina

Fuente: Este estudio

Tabla 6.17. Energía de activación del modelo de Arrhenius del contenido de aceite en equilibrio para cada variedad de papa

Variedad	E_a (kJ/mol)	R^2
Ratona Morada	-7.5817 ± 1.1473	0.9777
Andina	-6.4088 ± 1.3053	0.9602

*Valores promedio (n = 3) \pm desviación estándar.

Fuente: Este estudio

Según Melquíades et al. (2009), la energía de activación del fenómeno de absorción de aceite, representa termodinámicamente la energía que necesitan las moléculas para su migración o entrada hacia el interior del producto. Según lo anterior, en la tabla 6.17 se observa que los valores de E_a son negativos, lo cual se justifica al considerar que no existen barreras energéticas para que el aceite pueda entrar al alimento frito debido a que los espacios o huecos capilares dejados por la salida del agua del interior del producto son llenados con facilidad por el aceite. Resultados similares fueron reportados en rodajas de yuca, siendo el valor encontrado de -10.25 kJ/mol en muestra control para rangos de temperatura de 140 a 180 °C (Ortega & Montes, 2014) y en Nuggets de camarón (-13.45 a -27.58 kJ/mol) para temperaturas de entre 150 y 190 °C (Nasiri et al., 2011).

Respecto a la influencia de la temperatura, se evidencia que a mayor temperatura se requiere mayor E_a para comenzar a promover la absorción de aceite en el alimento (Bravo-Vásquez, 2008), concordando en este estudio con el hecho de que a mayor temperatura, menor es la absorción de aceite.

Por otra parte, el análisis de varianza ANOVA indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de E_a , al realizar la comparación de las variedades de papa ($p > 0.05$; ver anexo 16). No obstante, se observa que el efecto de la temperatura sobre el contenido máximo de aceite es mayor en la variedad Ratona Morada.

7. CONCLUSIONES

La temperatura afectó significativamente el contenido de agua y de aceite durante la fritura convencional de las rodajas de papa. Así, para ambas muestras, cuando la temperatura aumenta, para un instante de tiempo dado, el contenido de agua y de aceite disminuyen; por ende, a mayor temperatura, la pérdida de agua es mayor y la absorción de aceite es menor en el producto frito. El tiempo de residencia del alimento en el proceso de fritura también tuvo influencia, donde la velocidad de pérdida de agua y la velocidad de absorción de aceite aumentaron significativamente en los primeros instantes del proceso, y pasado ese tiempo, disminuyen hasta alcanzar un equilibrio en el contenido de agua y de aceite al finalizar el proceso.

La variedad Ratona Morada perdió menos agua durante el proceso de fritura y absorbió menos aceite que la variedad Andina.

Los datos obtenidos de contenido de agua y de aceite de los modelos matemáticos empíricos estudiados mostraron una buena calidad de ajuste sobre las curvas experimentales; con altos valores de R^2 (> 0.99), y bajos valores de SSE , $RMSE$ y MAE ($< 2.0 \times 10^{-2}$); validando su utilización para describir los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite. No obstante, el modelo de Page y los modelos de Monod y Moyano-Pedreschi describen mejor los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite, respectivamente, en ambas muestras; mostrando los valores más altos de R^2 , y los valores más bajos de SSE , $RMSE$ y MAE frente a los demás modelos aplicados.

La transferencia de agua durante la fritura por inmersión de las rodajas de papa fue descrita apropiadamente por la segunda ley de Fick para la geometría de placas infinitas truncadas y la difusividad efectiva mostró dependencia con la temperatura, siendo mayor, conforme aumenta la temperatura de fritura. Así mismo, los valores encontrados de D_{eff} se encuentran dentro del intervalo general de 10^{-8} a 10^{-11} m^2/s para alimentos deshidratados.

La difusividad efectiva y el contenido máximo de aceite o contenido en equilibrio se ajustaron a la ecuación de Arrhenius, permitiendo calcular la energía de activación requerida en el proceso, la cual se encuentran dentro del intervalo general de 12.7 a 110 kJ/mol para deshidratación de alimentos.

8. RECOMENDACIONES

Es importante señalar que los productos alimenticios pueden ser susceptibles a las altas temperaturas por largos tiempos de proceso, como es el caso del proceso de fritura; por ello es necesario estudiar algunos parámetros de calidad asociados a estos fenómenos de transferencia de masa y calor como son: calidad sensorial, valor nutricional, color, textura, entre otros.

Así mismo, es recomendable incorporar el estudio de fritura al vacío que permita reducir, por un lado, el contenido de grasa; componente principal de los productos fritos, y por otro, el riesgo de generación de compuestos potencialmente cancerígenos como la acrilamida, la cual está asociada a las altas temperaturas utilizadas en el proceso de fritura. Lo anterior, con el fin de ofrecer a los consumidores alimentos más saludables, pero sin sacrificar la calidad organoléptica.

Complementar el estudio mediante la aplicación de pretratamientos previos al proceso de fritura, los cuales reduzcan aún más el contenido de aceite en el producto final.

Profundizar en el estudio de las condiciones óptimas de temperatura, presión (fritura al vacío) y tiempo para estandarizar el proceso de fritura, con el fin de obtener un producto frito comercial con valor agregado, con bajas necesidades de energía, tiempo y costos; y así, contribuir al desarrollo socioeconómico de la región.

De igual manera, se recomienda evaluar otras variedades de papa nativa (*Solanum phureja*) en la elaboración de productos fritos; partiendo de este estudio como base para que los resultados de los nuevos trabajos expresen información diferente y novedosa y, permitan explotar aún más los recursos de papa nativa que posee el departamento de Nariño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J. (1997). *Temas en tecnología de alimentos, Volumen 1*. (Instituto Politécnico Nacional, Ed.). México, México.
- Alvarez, T., & Canet, W. (2009). Thermal Processing and Quality Optimization. In: Singh, J., and L. Kaur (eds). *Advances in Potato Chemistry and Technology*. Academic Press. USA.
- Alvis-Bermúdez, A., Romero-Barragan, P., & Arrázola-Paternina, G. (2016). Pérdida de humedad y absorción de aceite durante fritura de tajadas de plátano (musa paradisiaca l.). *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 14(2).
- Alvis, A., Cortés, L., & Páez, M. (2009). Transferencia de calor y materia durante la fritura de trozos de ñame (Dioscorea alata). *Información Tecnológica*, 20(1), 99–109.
- Alvis, A., González, A., & Arrázola, G. (2015). Efecto del Recubrimiento Comestible en las Propiedades de Trozos de Batata (Ipomoea Batatas Lam) Fritos por Inmersión. *Información Tecnológica*, 26(1), 103–116. <https://doi.org/doi: 10.4067/S0718-07642015000100012>
- Andreu, M. A., & Da Silva, A. (2007). Asociación entre el color de la peridermis de la papa con características de importancia industrial. *Agric. Téc.*, 67(1), 72–77.
- Araujo, A., & Gandur, M. (2008). “Statgraphics”, Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Informática y Comunicaciones. Bogotá, Colombia.
- Arévalo, A. O., & Rodríguez, L. E. (2012). *Tecnologías de producción y transformación de papa criolla*. Bogotá D.C, Colombia.
- Badui, S. (2006). *Química de los alimentos*. (Pearson educación, Ed.) (4ta ed.). Naucolpan de Juárez, México.
- Baik, O.-D., & Mittal, G. S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. *Food Research International*, 38, 183–191.
- Banga, J., Balsa-Canto, E., Moles, C., & Alonso, A. (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 131–144.
- Banga, J., & Singh, P. (1994). Optimization of Air Drying of Foods. *Journal of Food Engineering*, 23, 189–211.
- Barrios, L., Osorio, O., & Cerón, A. (2015). Estudio de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura de arveja (Pisum sativum L .). *Acta Agronómica*, 65(3), 1–16.
- Baumann, B., & Escher, F. (1995). Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices, rate of drying and oil uptake. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie*, 28,

395–403.

- Bello, L., & Pinzón, F. (1997). *Evaluación del efecto del tamaño del tubérculo-semilla sobre el rendimiento en papa criolla, variedad “Yema de Huevo” (Solanum phureja Juz. Et Buk)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia.
- Bermúdez, A. A., Pasos, C. V., & Paternina, G. A. (2010). Efecto de las condiciones de freído sobre la pérdida de humedad y ganancia de aceite en trozos de ñame (*Dioscorea alata*). *Ingeniería E Investigación*, 30(1), 41–44.
- Bernal, I. R. (1998). *Análisis de alimentos* (3ra edición). Bogotá, Colombia: Editora Guadalupe Ltda.
- Blasco, M., Garcia-Pérez, J., Bon, J., Carreres, J., & Mulet, A. (2006). effect of blanching and air flow rate on turmeric drying. *Food Science and Technology*, 12(4), 315.
- Bon, J., Simal, S., Rosselló, C., & Mulet, A. (1997). Drying Characteristics of Hemispherical Solids. *Journal of Food Engineering*, 34, 109–122.
- Bouchon, P., Aguilera, J., & Pyle, D. (2003). Structure oil-absorption relationships during deep-fat frying. *Journal of Food Science*, 68(9), 2711–2716.
- Bouchon, P., & Pyle, D. L. (2005). Modelling oil Absorption during Post-frying cooling I: Model Development. *Food and Bioproducts Processing*, 83(4), 253–260.
- Bravo-Vásquez, J. (2008). *Contribución al estudio de la fritura al vacío: deshidratación de rodajas de manzana (Tesis de Doctorado en Tecnología de Alimentos)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Bravo, J., Sanjuán, N., Clemente, G., & Mulet, A. (2011). Pressure Effect on Deep Fat Frying of Apple Chips. *Drying Technology: An International Journal*, 29(4), 472–477. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.560801>
- Brousse, M., Vergara, E., Zubreski, N., & Martos, M. (2014). Cinética de absorción de agua de tejidos de mandioca macerados con una poligalacturonasa microbiana. *Revista Ciencia Y Tecnología*, 16(22), 53–57.
- Bu-Contreras, R., & Rao, M. A. (2002). Review: Dynamic rheological behaviour of heated potatoes. *Food Science and Technology*, 8, 3–10.
- Budzaki, S., & Segura, B. (2005). Moisture loss and oil uptake during deep fat frying of “krostula” dough. *European Food Research and Technology*, 220, 90–95.
- Cabrera, J. A. (2013). *Evaluación de la fritura de patatas por microondas a nivel cinético y sensorial (tesis de máster en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Cantos, E., Tudela, J. A., Gil, M. I., & Espín, J. C. (2002). Phenolic compounds and related enzymes are not rate limiting in browning development of fresh-cut potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3015–3023.

- Castro Lara, M. C. (2008). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de la patata para fritura. Universidad de Burgos, España.
- CCB. (2015). Manual de Papa. Programa de apoyo Agrícola y Agroindustrial Vicepresidencia de fortalecimiento empresarial Cámara de Comercio de Bogotá. Bogotá D.C, Colombia.
- Cerón, A., Latorre, L., Bucheli, M., Osorio, O., Mejia, D., & Garcés, L. (2015). Determinación de constantes de velocidad de rehidratación y cambios sobre algunas propiedades físicas en semillas de arveja (*Pisum sativum* L .). *Revista Lasallista de Investigación*, 12(1), 21–32.
- Cevipapa. (2008). Centro de Desarrollo Tecnológico de la Papa de la Cadena Agroalimentaria. Caracterización del cultivo de la papa criolla en el departamento de Antioquia. Retrieved from www.cevipapa.org.co/publicaciones/publicaciones.php.
- Chen, Y., & Moreira, R. G. (1997). Modelling of a Batch Deep-Fat Frying Process for Tortilla Chips. *Food and Bioproducts Processing*, 75(3), 181–190.
- Chou, S. K., & Chua, K. J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 12, 359–369.
- Costa, R., & Oliveira, F. (1999). Modelling the kinetics of water loss during potato frying with a compartmental dynamic model. *Journal of Food Engineering*, (41), 177–185.
- Crank, J. (1975). The mathematics of Diffusion. Oxford University, Londres, England.
- Cueto, C., García, D., & Cepeda, J. (2007). Predibal 1.0: Herramienta informática para la predicción de la población de dos bacterias ácido lácticas, aisladas del suero costeño. *Alimentos Ciencia E Ingeniería*, 16(1), 52.
- Cuniff, P. (1997). Official methods of analysis of AOAC International. AOAC International.
- Da Rocha, R. P., Melo, E. D. C., Corbín, J. B., Berbert, P. A., Donzeles, S. M., & Tabar, J. A. (2012). Drying kinetics of thyme. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 16(6), 675–683.
- Debnath, S., Rastogia, N., Krishnab, G., & And Lokesh, B. (2012). Effect of frying cycles on physical, chemical and heat transfer quality of rice bran oil during deep-fat frying of poori: An Indian traditional fried food. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 249–256.
- Demirkol, E., Ferruh, & Koray. (2006). Analysis of mass transfer parameters (changes in mass flux, difusión coefficient and mass transfer coefficient during baking of cookies). *Journal of Food Engineering*, 72, 364–371.
- Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G., & Velasco, J. (2000). Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102, 521–528.

- Durán, M., Pedreschi, F., Moyano, P., & Troncoso, E. (2007). Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81:257:265.
- Espinal, C. F., Martínez, H. J., Pinzón, N., & Barrios, C. (2005). *La cadena de la papa en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinamica 1991-2005*. Min. Agricultura y Desarrollo Rural, Obs. Agrociencias Colombia. Bogotá D.C, Colombia. Retrieved from http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2005112145659_caracterizacion_caca_o.pdf
- Espinoza-Saavedra, J. L. (2011). *Aplicacion de un proceso de secado asistido por infrarrojo para la deshidratacion del fruto de Murtilla (Ugni Molinae Turcz.) (Tesis de pregrado en Ingeniería de Alimentos)*. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- FAO. (2009). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Año Internacional de la Papa 2008. Nueva luz sobre un tesoro enterrado.
- Farid, M. (2001). A unified approach to the heat and mass transfer in melting, solidification, frying and different drying processes. *Chemical Engineering Science*, 56, 5419–5427.
- Farid, M. (2002). The moving boundary problems from melting and freezing to drying and frying of food. *Chemical Engineering and Processing*, 41, 1–10.
- Farid, M. M., & Chen, X. D. (1998). The analysis of heat and mass transfer during frying of food using moving boundary solution procedure. *Heat and Mass Transfer*, 34, 69–77.
- Farkas, B., Singh, R., & Rumsey, T. (1996). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I. Model Development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211–226.
- Faustino, J. M. F., Barroca, M. J., & Guiné, R. P. F. (2007). Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. Trans IChemE, Part C. *Food and Bioproducts Processing*, 85, 163–170.
- Fellows, P. (1998). *Food processing technology: Principles and practice* (Second edi). Woodhead, New York, USA.
- Freitas, D., Garcia, S., Prati, P., Fakhouri, F., Collares, F., & Vicente, E. (2009). Reducing of fat uptake in cassava product during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 94, 390–394.
- Gamble, M., Rice, P., & Selman, J. (1987). Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. tubers. *International Journal of Food Science & Technology*, 22(3), 233–241.
- Garayo, J., & Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 181–191.
- Garg, M., Sharma, S., Sadhu, S. V., & Sushmita, S. (2014). Drying kinetics of thin layer

- pea pods using tray drying. *International Journal of Food and Nutritional Sciences*, 3(3), 61–66.
- Ghislain, M., Andrade, D., Rodríguez, F., Hijmans, R., & Spooner, D. (2006). Genetic analysis of the cultivated potato *Solanum tuberosum* L. Phureja Group using RAPDs and nuclear SSRs. *Theoretical and Applied Genetics*, 113, 1515–1527.
- Gil, M. I., Tudela, J. A., & Espín, J. C. (2005). Pardeamiento. In: González A., G. A., A. A. Gardea, y F. Cuamena (eds). *Nuevas Tecnologías de Conservación de Productos Vegetales Frescos Cortados*. Logiprint Digital S. de R.L. de C.V. México, D.F.
- Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Ferreira Silva, A., Ferreira Silva, P., Valdes-Serra, J. C., & De Menezes Pavlak, M. C. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência E Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 179–182.
- Gobernación de Cundinamarca, & Fedepapa. (2009). *Recopilación de la Investigación del sistema productivo papa criolla*. Bogotá, Colombia.
- Gokhale, S. V., & Lele, S. S. (2011). Dehydration of red beet root (*Beta vulgaris*) by hot air drying: Process Optimization and Mathematical Modeling. *Food Science and Biotechnology*, 2(4), 955–964.
- Gómez, A. (2014). *Análisis de la cadena productiva de la papa criolla en Colombia (tesis de grado en Administrador de Empresas Agropecuarias)*. Universidad de la Salle, Bogotá D.C, Colombia.
- Gómez, L., & Ramirez, J. (1999). *Manejo post-cosecha y comercialización de la papa*. Tudesco, Armenia.
- Gómez, M. (2008). *La papa, su comercialización y el caso especial frente a la comunidad de Pasquilla (tesis de grado en Especialista en Gerencia Social)*. Escuela superior de administración pública, Bogotá D.C, Colombia.
- Gómez, R. (2000). *Guía para las Caracterizaciones Morfológicas Básicas en Colecciones de Papas Nativas*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/267991711>
- Gómez, S. (2012). *Efecto de las condiciones de fritura a vacío en el procesado de chips de kiwi (Tesis de Master en Ingeniería de Alimentos)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Guerrero, A. P., & Rivera, C. A. (2006). *Estudio para la optimización del proceso de industrialización de la Papa criolla (Solanum phureja) precocida y congelada en san juan de Pasto - Nariño*. Universidad de Nariño, Pasto, Nariño.
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*, Segunda Edición, Editorial Mc Graw-Hill. México, México.
- Hasbún, J., Esquivel, P., Brenes, A., & Alfaro, I. (2009). Propiedades físico-químicas y parámetros de calidad para uso industrial de cuatro variedades de papa. *Agronomía*

Costarricense, 33(1), 77–89.

- Hernandez, N., & Suarez, J. (2009). *Caracterización de accesiones de Solanum phureja procedentes del banco de germoplasma vegetal que administra Corpoica por sus caracteres morfológicos, agronómicos e industriales (tesis de grado en Ingeniería de Alimentos)*. Universidad de la Salle, Bogotá D.C, Colombia.
- Herrera, C. (2000). Manejo integrado del cultivo de La papa. Manual técnico. Corpoica, regional uno.
- Himmelblau, D., & Bischoff, K. (1992). *Análisis y simulación de procesos*. (Editorial Reverté S.A., Ed.). Barcelona, España.
- Huamán, Z., & Spooner, D. (2002). Reclassification of landrace populations of cultivated potatoes (*Solanum* sect. *Petota*). *Am. J. Bot.*, (89), 947–965.
- ICONTEC. (1997). NTC 3272: Norma Técnica Colombiana sobre grasas y aceites comestibles para frito industrial. Bogotá, Colombia.
- Jibaja, H. (2010). *Modelado de la cinética de absorción de aceite durante el proceso de fritura al vacío de hojuelas de tomate de árbol (solanum betaceum cav.)*, (tesis de grado para Ingeniero Agroindustrial). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Kassama, L., & Ngadi, M. (2005). Pore development and moisture transfer in chicken meat during deep-fat frying. *Drying Technology: An International Journal*, 23, 907–923.
- Kim, D., Lim, J., Bae, I., Lee, H., & Lee, S. (2011). Effect of hydrocolloid coatings on the heat transfer and oil uptake during frying of potato strips. *Journal of Food Engineering*, 102, 317–320.
- Kozempel, M., Tomasula, P., & Craig, J. (1991). Correlation of moisture and oil concentration in french fries. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie*, 24(5), 445–448.
- Krochhar, P., & Gertz, C. (2004). New theoretical and practical aspects of the frying process. *European Journal of Lipid Science and Technology*, (106), 722.
- Krokida, M., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. (2000). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44(1), 39–46.
- Krokida, M., Oreopoulou, V., Maroulis, Z., & Marinou-Kouris, D. (2001). Effect of osmotic dehydration pretreatment on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*, 49, 339–345.
- Lamberg, I. (1990). *Transport phenomena in potato tissues. Dissertation, Departments of Food Engineering*. Lund University, Lund, Sweden.
- Ligarreto, G., & Suárez, M. (2003). Evaluación del potencial de los recursos genéticos de papa criolla (*solanum phureja*) por calidad industrial. *Agronomía Colombiana*, 21(1–3), 83–94.

- Liu-Ping, F., Min-Zhang, Gong-Nian, X., Jin-Cai, S., & Qian-Tao. (2005). The optimization of vacuum frying to dehydrate carrot chips. *International Journal of Food Science & Technology*, 40, 911–919.
- Losada, J. (2011). *Incidencia en la cantidad de grasa en la papa (solanum tuberosum) a la francesa freida en profundidad por el uso de aceite de mezclas vegetales reutilizado*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Madroñero, I. C., Rosero, J. E., Rodríguez, L. E., Navia, F., & Benavides, C. A. (2013). Caracterización morfoagronómica de genotipos promisorios de papa criolla (*Solanum tuberosum* L. Grupo andigenum) en Nariño. *Temas Agrarios*, 18(2), 50–66.
- Mai Tran, T., Dong Chen, X., & Southern, C. (2007). Reducing oil content of fried potato crisps considerably using a “sweet” pre-treatment technique. *Journal of Food Engineering*, 80, 719–726.
- Math, R., Velu, V., Nagender, A., & Rao, D. G. (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of potatoes. *Journal of Food Engineering*, 64(4), 429–434.
- Mellema, M. (2003). Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Food Science and Technology*, 14, 364–373.
- Melquíades, Y. I., López, C., & Rosas, M. E. (2009). Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus Carota*) deshidratadas. *Información Tecnológica*, 20(3), 65–72.
- Montes, E., Gallo, R., Pizarro, R., Pérez, O., Escobar, J. L., & Meza, I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Ingeniería E Investigación*, 28(2), 45–52.
- Montes, N., Millar, I., Provoste, R., Martínez, N., Fernández, D., Morales, G., & Valenzuela, R. (2015). Absorción de aceite en alimentos fritos. *Rev Chil Nutr*, 43(1), 5.
- Moreira, R. (2001). Deep-Fat Frying of Foods. In: J. Irudayaraj, Food Processing Operations Modeling. *Marcel Dekker Inc.* New York, USA.
- Moreira, R., Da Silva, P., & Gomes, C. (2009). The effect of a de-oiling mechanism on the production of high quality vacuum fried potato chips. *Journal of Food Engineering*, 92, 297–304.
- Moreira, R., Palau, J., & Sun, X. (1995). Deep-fat frying of tortilla chips: An engineering approach. *Food Technology*, 49(4), 146–150.
- Morillo, A., Villota, D., Lagos, T., & Ordóñez, H. (2011). Morphological and Molecular Characterization of 18 Introductions of Cape Gooseberry *Physalis peruviana* L. collection of the University of Nariño. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 64(2), 6043–6053.
- Moya, K. (2011). *Determinación de la calidad en papas tipo french fries mediante visión computacional y estudio de sus propiedades físicas (tesis de Ingeniería en Alimentos)*.

Universidad de Chile, Santiago, Chile.

- Moyano, P. C., & Berna, A. Z. (2002). Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technology: An International Journal*, 20(7), 1303–1318.
- Moyano, P., & Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT-Food Science and Technology*, 39, 285–291.
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22, 329–348.
- Nasiri, F. D., Mohebbi, M., Yazdi, F., & Haddad Khodaparast, M. H. (2011). Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 241–247.
- Navarro, C., Bolaños, L. C., & Lagos, T. C. (2010). Caracterización morfoagronómica y molecular de 19 genotipos de papa guata y chaucha (*Solanum tuberosum* L. y *Solanum phureja* juz et Buk) cultivados en el Departamento de Nariño. *Revista de Agronomía*, 27(1), 27–39.
- Ngadi, M., Watts, K., & Correia, L. (1997). Finite element method modelling of moisture transfer in chicken drum during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 32, 11–20.
- Nielsen, J. (2004). Microbial process kinetics, Basic Biotechnology. Cambridge, England.
- Ñustez., C. (2011). *Variedades colombianas de papa*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Ortega, F. a, & Montes, E. J. (2014). Parámetros cinéticos de transferencia de masa durante el freído por inmersión de rodajas de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Ingeniería Y Competitividad*, 16(2), 247–255.
- Osorio, O., Cerón, A., Rodríguez, G., Castellanos, F., & Chávez, A. (2015). Cinética de absorción de aceite en chips de arveja (*Pisum sativum* L.) en condiciones de fritura convencional y a vacío.
- Osorio, O., Rodríguez, G., Castellanos, F., & Chávez, A. (2015). Cinética de Pérdida de Agua en Chips de Arveja (*Pisum sativum* L.) en Condiciones de Fritura Convencional y a Vacío.
- Papadakis, S. E., Abdul-Malek, S., Kamdem, R. E., & Yam, K. L. (2000). A versatile and inexpensive technique for measuring colour of foods. *Food Technology*, 54, 48–51.
- Pedreschi, F., Cocio, C., Moyano, P., & Troncoso, E. (2008). Oil distribution in potato slices during frying. *Journal of Food Engineering*, 87, 200–212.
- Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C., & Moyano, P. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties*, 8, 289–299.

- Pedreschi, F., Moyano, P., Santis, N., & Pedreschi, R. (2006). Physical properties of pre-treated potato chips. *Journal Food Engineering*, 79(4), 1474–1482. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jfoo-deng.2006.04.029>.
- Peña, L. (2000). *Fisiología y manejo de tubérculos – semilla de papa. CORPOICA, CI. Obonuco. Boletín divulgativo.*
- Rahman, S. (2003). Manual de conservación de los alimentos, Editorial Acirbia S.A. Zaragoza, España.
- Ramírez, L. M., Zárate, L. M., & Otálora, N. A. (2011). *Caracterización de almidón nativo extraído de clones promisorios de papa criolla (Solanum phureja) para su aplicación en un derivado cárnico.* Bogotá D.C, Colombia.
- Rimac, S., Lelas, V., Rade, D., & Simundié, B. (2004). Decreasing of oil absorption in potato strips during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, (64), 237–241.
- Ríos, G., Granados, M. F., Martínez, G., & Félix, M. G. (2013). Modelado Matemático en el Secado de Betabel (*Beta vulgaris*) en un Secador de Lecho Fluidizado y Caracterización Físicoquímica del Producto Seco. In *11° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.*
- Rivera, J. E., Herrera, A., & Rodríguez, L. E. (2003). Procesamiento de papa criolla precocida y congelada mediante la técnica de congelación individual (IQF), en seis genotipos promisorios de papa criolla (*solanum phureja*). *Agronomía Colombiana*, 21(1–2), 95–101.
- Rodríguez, L., Ñustez, C., & Estrada, N. (2009). Criolla Latina, Criolla Paisa y Criolla Colombia, nuevos cultivares de papa criolla para el departamento de Antioquia (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(3), 289–303.
- Rozo, D. R., & Ramírez, L. N. (2011). La agroindustria de la papa criolla en Colombia. Situación actual y retos para su desarrollo. *Gestión Y Sociedad*, 4(2), 17–30.
- Sablany, S., Datta, A., Rahman, M., & Mujumdar, A. (2006). *Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques.* (Taylor & Francis Group, Ed.). Boca Raton, London.
- Sacilik, K., & Elicin, A. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal Food Engineering*, 73(3), 281–289.
- Saguy, I., & Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, (56), 143–152.
- Salcedo, J., Mercado, J. L., Vanegas, M., Fernández, A., & Vertel, M. (2014). Cinética de secado de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedad CORPOICA M-tai en función de la temperatura y de la velocidad de aire. *Revista ION*, 27(2), 29–42.
- Santamaría, M., Montañéz, J., & Sánchez, R. R. (2010). Evaluación de la producción




















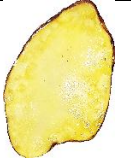
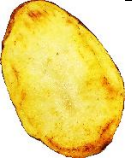




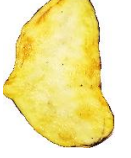




- limpia de papa criolla (*Solanum phureja*) en Madrid , Cundinamarca. *Revista Inventum*, (9), 8–12.
- Schmalcko, M., & Alzamora, S. (2005). Modelling the drying of a twig of “yerba mate” considering as a composite material Part II: mathematical model. *Journal of Food Engineering*, 67(3), 267–272.
- Shyu, S.-L., Hau, L.-B., & Hwang, L. S. (2005). Effects of processing conditions on the quality of vacuum-fried carrot chips. *Journal of the Science of the Food and Agriculture*, 85, 1903–1908.
- Shyu, S.-L., & Hwang, L. S. (2001). Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips. *Food Research International*, 34, 133–142.
- Simal, S., Rosselló, C., Berna, A., & Mulet, A. (1998). Drying of Shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, 37, 423–435.
- Singh, R., Farkas, B., & Rumsey, T. (1996). Modeling heat and mass transfer in immersion frying II. Model Solution and verification. *Journal of Food Engineering*, 22, 227.
- Singh, R. P. (2000). Moving Boundaries in Food Engineering. Food Technology. *Food Technology*, 54(2), 44–53.
- Smith, M. C., & Farid, M. (2004). A single correlation for the prediction of dehydration time in drying and frying of samples having different geometry and size. *Journal of Food Engineering*, 63, 265–271.
- Sosa Brito, H. L., & Campos Marín, K. P. (2010). *Influencia de la temperatura sobre la cinética de secado de frijol (vigna unguiculata), utilizando un secador discontinuo de bandejas*. Universidad de Oriente, Barcelona, España.
- Soto, G. M., Ortega, A. F., Flores, J. M., & Orozco, M. L. (2010). Características de secado de nopal (*Opuntia ficus-indica*) por lecho fluidizado. *Acta Universitaria*, 20(3), 70–76.
- Stier, R. (2004). Frying as a science - An introduction. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106, 715–721.
- Taiwo, K., & Baik, O. (2007). Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *LWT-Food Science and Technology*, 40, 661–668.
- Talbur, W. F., & Smith, O. (1975). Potato processing. 3 ed. Westport: The Avi Publishing Company.
- Tangduangdee, C., Bhumiratana, S., & Tia, S. (2003). Heat and mass transfer during deep-fat frying of frozen composite foods with thermal protein denaturation as quality index. *Science Asia*, 29, 355–364.
- Tirado, D., Acevedo, D., & Guzmán, L. (2015). Transferencia de Calor y Materia durante el Proceso de Freído de Alimentos: Tilapia (*Oreochromis niloticus*) y Fruta de Pan (*Artocarpus communis*). *Información Tecnológica*, 26(1), 85–94.

- Toğrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77, 610–619.
- Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *Food Sci Technol Res*, 42(6), 1164–1173. <https://doi.org/0.1016/j.lwt.2009.01.008>
- Vega, A., Ireland, C., & Lemus, R. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*gracilaria chilensis*). *INGENIARE-Revista Chilena de Ingeniería*, 15(1).
- Vega, A., & Lemus, R. (2006). Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea pubescens*). *Información Tecnológica*, 17(3), 23–31.
- Villada, D., Villada, H., & Mosquera, A. (2009). Evaluación del efecto de la deshidratación osmótica y fritura en dos variedades de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) en la producción de chips. *Dyna*, 76(160), 131–138.
- Villamizar, R., Quiceno, M., & Giraldo, G. (2011). Comparación de la fritura al vacío y atmosférica en la obtención de pasabocas de mango (*Manguifera indica l.*). *Temas Agrarios*, 16(1), 64–74.
- Villareal, H. (2011). Documento interno de trabajo de la Secretaria Técnica del Consejo Nacional de la papa. Bogotá, Colombia.
- Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., & Raoult-Wack, A.-L. (2002). Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53, 161–176.
- Vitrac, O., Trystram, G., & Raoult-Wack, A. L. (2000). Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 53(102), 529–538.
- Yamsaengsung, R., & Moreira, R. (2002). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying Part II. Model solution & validation. *Journal of Food Engineering*, 53, 11–25.
- Yildiz, A. T., Palazoglu, K., & Erdogdu, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 11–17.
- Zapata, L. (2006). *Manejo agronómico de la Papa Criolla para el procesamiento industrial*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. CORPOICA. Centro de Investigación “La Selva”. Rionegro Antioquia. Boletín Técnico No 19. 44.
- Ziaifar, A., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I., & Trystram, G. (2008). Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Engineering*, 43, 1410–1423.

ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADOS FOTOGRÁFICOS DEL PROCESO DE FRITURA

Tabla 1.1. Chips de papa frita de las variedades Ratona Morada y Andina a diferentes temperaturas en función del tiempo

t (s)	Ratona Morada			Andina		
	140 °C	160 °C	180 °C	140 °C	160 °C	180 °C
30						
60						
90						
120						
150						

Fuente: Este estudio

ANEXO 2. DATOS ESTADÍSTICOS DE LAS PRUEBAS FÍSICAS

Pruebas de Múltiple Rangos para el peso

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Andina	5	93,6	X
Ratona Morada	5	98,0	X

Pruebas de Múltiple Rangos para la gravedad específica

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Andina	5	1,005	X
Ratona Morada	5	1,1546	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el diámetro ecuatorial

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada	5	4,68	X
Andina	5	5,056	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el factor de color de piel a*

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada	5	6,892	X
Andina	5	7,736	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el factor de color de pulpa L*

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada	5	80,036	X
Andina	5	84,738	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el factor de color de pulpa b*

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Andina	5	25,532	X
Ratona Morada	5	46,87	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el volumen

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada	5	85,0	X
Andina	5	93,0	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el diámetro polar

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Andina	5	7,456	X
Ratona Morada	5	8,346	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el factor de color de piel L*

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada	5	54,276	X
Andina	5	64,47	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el factor de color de piel b*

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada	5	29,694	X
Andina	5	36,3	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el factor de color de pulpa a*

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Andina	5	0,184	X
Ratona Morada	5	2,88	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

ANEXO 3. DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA

A. Variedad Ratona Morada

Tabla 3.1. Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 140 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	X	\bar{X}	σ
0	1	64.293	2.1534	64.829	1.6173	3.0171	3.0243	0.0072
	2	66.700	2.0625	67.212	1.5509	3.0315		
	3	64.102	1.9935	64.597	1.4981	3.0243		
30	1	65.860	2.0643	66.543	1.3816	2.0239	2.0172	0.0223
	2	64.102	1.9546	64.746	1.3107	2.0353		
	3	66.700	2.1534	67.420	1.4337	1.9922		
60	1	64.293	2.0635	65.162	1.1947	1.3751	1.3784	0.0145
	2	66.700	1.9425	67.512	1.1312	1.3943		
	3	65.860	1.9836	66.699	1.1452	1.3658		
90	1	66.700	2.1003	67.851	0.9494	0.8249	0.8451	0.0181
	2	64.102	2.0352	65.201	0.9356	0.8509		
	3	64.293	1.9637	65.349	0.9077	0.8596		
120	1	64.293	1.9863	65.518	0.7613	0.6215	0.6201	0.0060
	2	66.700	1.9932	67.936	0.7579	0.6136		
	3	65.860	2.0255	67.106	0.7793	0.6253		
150	1	65.860	2.0424	67.201	0.7013	0.5229	0.5270	0.0040
	2	64.293	2.1035	65.667	0.7294	0.5309		
	3	64.102	1.9562	65.383	0.6752	0.5271		

t = tiempo (s); P1 = peso de la cápsula vacía seca (g); P2 = peso de la muestra húmeda (g); P3 = peso final constante cápsula + muestra seca (g); P4 = peso del contenido de agua (g); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 3.2. Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 160 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	X	\bar{X}	σ
0	1	64.293	2.1534	64.829	1.6173	3.0171	3.0243	0.0072
	2	66.700	2.0625	67.212	1.5509	3.0315		
	3	64.102	1.9935	64.597	1.4981	3.0243		
30	1	64.293	2.1605	65.051	1.4018	1.8475	1.8516	0.0067
	2	65.860	1.9410	66.539	1.2622	1.8593		
	3	64.102	2.0196	64.811	1.3105	1.8480		
60	1	66.700	2.0803	67.680	1.1006	1.1234	1.1201	0.0102
	2	65.860	2.1408	66.866	1.1349	1.1282		
	3	64.102	1.9746	65.038	1.0382	1.1086		
90	1	65.860	2.0362	67.018	0.8784	0.7587	0.7622	0.0056
	2	64.293	1.9973	65.428	0.8621	0.7594		
	3	64.102	1.9535	65.207	0.8490	0.7686		
120	1	66.700	1.9363	68.008	0.6284	0.4805	0.4726	0.0070
	2	65.860	1.9878	67.215	0.6328	0.4670		
	3	64.293	1.9763	65.637	0.6322	0.4704		
150	1	65.860	2.1736	67.431	0.6021	0.3831	0.3795	0.0040
	2	66.700	1.9637	68.123	0.5409	0.3801		
	3	64.293	2.0366	65.774	0.5556	0.3752		

t = tiempo (s); P1 = peso de la cápsula vacía seca (g); P2 = peso de la muestra húmeda (g); P3 = peso final constante cápsula + muestra seca (g); P4 = peso del contenido de agua (g); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 3.3. Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 180 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	X	\bar{X}	σ
0	1	64.293	2.1534	64.829	1.6173	3.0171	3.0243	0.0072
	2	66.700	2.0625	67.212	1.5509	3.0315		
	3	64.102	1.9935	64.597	1.4981	3.0243		
30	1	64.102	1.9966	64.897	1.2020	1.5128	1.5092	0.0123
	2	66.700	2.0425	67.511	1.2318	1.5193		
	3	64.293	2.1424	65.151	1.2839	1.4956		
60	1	64.293	2.0442	65.428	0.9091	0.8009	0.7929	0.0069
	2	66.700	2.1866	67.923	0.9639	0.7884		
	3	65.860	1.9737	66.963	0.8708	0.7895		
90	1	65.860	1.9366	67.177	0.6202	0.4711	0.4606	0.0091
	2	64.293	1.9746	65.650	0.6179	0.4555		
	3	66.700	2.0046	68.077	0.6272	0.4553		
120	1	64.102	2.1525	65.754	0.5007	0.3032	0.2992	0.0042
	2	64.293	2.1366	65.943	0.4865	0.2948		
	3	65.860	2.1137	67.486	0.4874	0.2997		
150	1	65.860	2.1524	67.573	0.4397	0.2567	0.2508	0.0097
	2	66.700	2.0014	68.294	0.4079	0.2559		
	3	64.293	1.9884	65.897	0.3844	0.2396		

t = tiempo (s); P1 = peso de la cápsula vacía seca (g); P2 = peso de la muestra húmeda (g); P3 = peso final constante cápsula + muestra seca (g); P4 = peso del contenido de agua (g); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

B. Variedad Andina

Tabla 3.4. Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 140 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	X	\bar{X}	σ
0	1	66.700	2.0025	67.015	1.6876	5.3590	5.3617	0.0024
	2	64.102	1.9263	64.405	1.6236	5.3635		
	3	65.860	1.9984	66.174	1.6843	5.3625		
30	1	64.293	1.9652	64.733	1.5255	3.4691	3.4388	0.0277
	2	66.700	1.9252	67.134	1.4909	3.4325		
	3	64.102	2.0366	64.563	1.5753	3.4148		
60	1	65.860	2.1553	66.547	1.4682	2.1370	2.1315	0.0172
	2	66.700	2.0256	67.351	1.3747	2.1122		
	3	64.102	1.9416	64.719	1.3243	2.1452		
90	1	66.700	1.9245	67.488	1.1363	1.4417	1.4315	0.0091
	2	64.102	2.1013	64.967	1.2360	1.4285		
	3	64.293	2.0366	65.133	1.1965	1.4243		
120	1	64.293	2.0143	65.386	0.9210	0.8423	0.8276	0.0181
	2	66.700	1.9873	67.784	0.9032	0.8332		
	3	64.102	1.9356	65.173	0.8647	0.8074		
150	1	65.860	2.0145	67.102	0.7723	0.6217	0.6305	0.0092
	2	64.102	2.1143	65.399	0.8170	0.6297		
	3	66.700	2.1012	67.981	0.8201	0.6402		

t = tiempo (s); P1 = peso de la cápsula vacía seca (g); P2 = peso de la muestra húmeda (g); P3 = peso final constante cápsula + muestra seca (g); P4 = peso del contenido de agua (g); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 3.5. Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 160 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	X	\bar{X}	σ
0	1	66.700	2.0025	67.015	1.6876	5.3590	5.3617	0.0024
	2	64.102	1.9263	64.405	1.6236	5.3635		
	3	65.860	1.9984	66.174	1.6843	5.3625		
30	1	64.293	2.1273	64.879	1.5414	2.6309	2.6311	0.0103
	2	64.102	1.9356	64.637	1.4011	2.6210		
	3	65.860	1.9684	66.401	1.4279	2.6415		
60	1	66.700	2.1576	67.536	1.3214	1.5803	1.5677	0.0213
	2	65.860	1.9987	66.646	1.2128	1.5431		
	3	64.102	1.9902	64.873	1.2187	1.5797		
90	1	65.860	1.9464	66.876	0.9308	0.9164	0.9124	0.0088
	2	64.293	1.9352	65.310	0.9179	0.9023		
	3	66.700	2.1536	67.823	1.0310	0.9184		
120	1	64.102	2.0046	65.415	0.6913	0.5264	0.5223	0.0140
	2	64.293	2.0388	65.622	0.7096	0.5339		
	3	66.700	2.2700	68.207	0.7635	0.5068		
150	1	65.860	1.9265	67.263	0.5238	0.3734	0.3777	0.0120
	2	66.700	1.9588	68.108	0.5509	0.3913		
	3	64.293	1.9883	65.746	0.5354	0.3685		

t = tiempo (s); P1 = peso de la cápsula vacía seca (g); P2 = peso de la muestra húmeda (g); P3 = peso final constante cápsula + muestra seca (g); P4 = peso del contenido de agua (g); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 3.6. Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 180 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	X	\bar{X}	σ
0	1	66.700	2.0025	67.015	1.6876	5.3590	5.3617	0.0024
	2	64.102	1.9263	64.405	1.6236	5.3635		
	3	65.860	1.9984	66.174	1.6843	5.3625		
30	1	66.700	1.9646	67.335	1.3299	2.0951	2.0761	0.0188
	2	64.293	1.9773	64.940	1.3306	2.0575		
	3	65.860	2.0366	66.522	1.3745	2.0757		
60	1	64.293	1.9986	65.214	1.0773	1.1694	1.1544	0.0169
	2	66.700	2.1045	67.676	1.1292	1.1578		
	3	64.102	2.0367	65.055	1.0832	1.1361		
90	1	65.860	2.1153	67.280	0.6958	0.4901	0.4843	0.0134
	2	64.102	2.0065	65.445	0.6633	0.4938		
	3	65.860	1.9366	67.178	0.6183	0.4690		
120	1	64.293	1.9677	65.863	0.3976	0.2533	0.2652	0.0120
	2	65.860	1.9605	67.410	0.4107	0.2650		
	3	64.102	2.0473	65.705	0.4444	0.2772		
150	1	66.700	1.9913	68.348	0.3429	0.2080	0.2073	0.0117
	2	65.860	1.9824	67.519	0.3239	0.1953		
	3	64.293	1.9903	65.926	0.3572	0.2187		

t = tiempo (s); P1 = peso de la cápsula vacía seca (g); P2 = peso de la muestra húmeda (g); P3 = peso final constante cápsula + muestra seca (g); P4 = peso del contenido de agua (g); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

ANEXO 4. DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE

A. Variedad Ratona Morada

Tabla 4.1. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 140 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	Y	\bar{Y}	σ
30	1	107.15	2.0654	107.74	0.5944	0.2878	0.2887	0.0073
	2	107.22	1.9894	107.81	0.5896	0.2964		
	3	107.22	1.9964	107.78	0.5628	0.2819		
60	1	106.66	2.0843	107.44	0.7735	0.3711	0.3675	0.0048
	2	106.68	1.9964	107.42	0.7374	0.3694		
	3	106.67	2.0126	107.40	0.7286	0.3620		
90	1	112.21	2.1032	113.04	0.8293	0.3943	0.3832	0.0126
	2	112.27	1.9694	113.03	0.7599	0.3859		
	3	112.23	1.9494	112.95	0.7202	0.3694		
120	1	109.57	1.9993	110.38	0.8070	0.4036	0.4033	0.0075
	2	109.58	2.0032	110.38	0.7925	0.3956		
	3	109.57	2.0472	110.41	0.8404	0.4105		
150	1	109.15	2.0063	109.99	0.8484	0.4229	0.4166	0.0055
	2	109.15	1.9975	109.97	0.8243	0.4127		
	3	109.23	1.9503	110.04	0.8077	0.4141		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso de la muestra seca (g); P3 = peso balón + aceite (g); P4 = peso del contenido de aceite (g); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 4.2. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 160 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	Y	\bar{Y}	σ
30	1	109.22	2.0662	109.82	0.6030	0.2918	0.2826	0.0085
	2	109.19	1.9796	109.74	0.5560	0.2809		
	3	109.20	1.9988	109.75	0.5500	0.2752		
60	1	106.66	2.0073	107.32	0.6650	0.3313	0.3324	0.0073
	2	106.68	1.9855	107.36	0.6754	0.3402		
	3	106.68	1.9907	107.33	0.6482	0.3256		
90	1	112.30	1.9760	113.03	0.7322	0.3705	0.3626	0.0083
	2	112.32	2.1033	113.08	0.7639	0.3632		
	3	112.30	2.0932	113.04	0.7410	0.3540		
120	1	107.12	1.9894	107.86	0.7385	0.3712	0.3712	0.0067
	2	107.21	2.0303	107.98	0.7673	0.3779		
	3	107.17	1.9548	107.88	0.7124	0.3644		
150	1	109.57	2.0040	110.37	0.7923	0.3954	0.3858	0.0085
	2	109.58	1.9877	110.35	0.7611	0.3829		
	3	109.57	1.9364	110.31	0.7339	0.3790		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso de la muestra seca (g); P3 = peso balón + aceite (g); P4 = peso del contenido de aceite (g); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 4.3. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 180 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	Y	\bar{Y}	σ
30	1	112.29	1.988	112.78	0.4939	0.2484	0.2549	0.0057
	2	112.29	2.027	112.81	0.5254	0.2592		
	3	112.29	1.998	112.81	0.5138	0.2572		
60	1	109.19	2.023	109.84	0.6448	0.3187	0.3113	0.0074
	2	109.19	2.018	109.82	0.6284	0.3113		
	3	109.22	2.054	109.84	0.6239	0.3038		
90	1	107.15	2.056	107.80	0.6497	0.3160	0.3174	0.0105
	2	107.21	2.000	107.87	0.6569	0.3285		
	3	107.20	2.041	107.82	0.6276	0.3076		
120	1	109.55	2.015	110.22	0.6607	0.3279	0.3318	0.0047
	2	109.61	2.014	110.27	0.6657	0.3305		
	3	109.56	2.014	110.24	0.6787	0.3370		
150	1	106.69	2.165	107.44	0.7528	0.3477	0.3425	0.0051
	2	106.69	1.988	107.36	0.6711	0.3375		
	3	106.68	1.997	107.37	0.6837	0.3424		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso de la muestra seca (g); P3 = peso balón + aceite (g); P4 = peso del contenido de aceite (g); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

B. Variedad Andina

Tabla 4.4. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 140 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	Y	\bar{Y}	σ
30	1	112.17	1.9466	112.76	0.5822	0.2991	0.3046	0.0055
	2	112.31	2.0372	112.93	0.6205	0.3046		
	3	112.36	2.1652	113.03	0.6712	0.3100		
60	1	106.66	1.9762	107.38	0.7246	0.3667	0.3769	0.0108
	2	106.66	1.9465	107.42	0.7555	0.3881		
	3	106.63	1.9626	107.37	0.7375	0.3758		
90	1	107.16	1.9437	107.97	0.8121	0.4178	0.4254	0.0091
	2	107.16	1.9937	108.03	0.8683	0.4355		
	3	107.20	2.0954	108.08	0.8859	0.4228		
120	1	109.21	2.0047	110.09	0.8813	0.4396	0.4356	0.0048
	2	109.18	1.9437	110.03	0.8490	0.4368		
	3	109.17	1.9236	110.00	0.8278	0.4303		
150	1	109.59	2.1025	110.55	0.9534	0.4535	0.4477	0.0070
	2	109.57	1.9386	110.42	0.8527	0.4399		
	3	109.56	1.9995	110.46	0.8991	0.4497		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso de la muestra seca (g); P3 = peso balón + aceite (g); P4 = peso del contenido de aceite (g); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 4.5. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 160 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	Y	\bar{Y}	σ
30	1	109.17	2.1021	109.85	0.6763	0.3217	0.3046	0.0179
	2	109.17	1.9832	109.74	0.5672	0.2860		
	3	109.18	1.9223	109.77	0.5881	0.3059		
60	1	112.29	1.9932	113.02	0.7294	0.3659	0.3732	0.0091
	2	112.34	2.0034	113.10	0.7681	0.3834		
	3	112.32	2.0156	113.07	0.7461	0.3702		
90	1	106.66	2.0473	107.49	0.8332	0.4070	0.3968	0.0098
	2	106.68	1.9264	107.44	0.7628	0.3960		
	3	106.66	2.1003	107.47	0.8138	0.3875		
120	1	109.59	2.1002	110.49	0.8976	0.4274	0.4223	0.0059
	2	109.57	2.0025	110.42	0.8483	0.4236		
	3	109.57	1.9562	110.38	0.8136	0.4159		
150	1	107.23	1.9867	108.04	0.8115	0.4085	0.4226	0.0137
	2	107.16	2.1165	108.06	0.8966	0.4236		
	3	107.14	1.9698	107.99	0.8584	0.4358		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso de la muestra seca (g); P3 = peso balón + aceite (g); P4 = peso del contenido de aceite (g); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 4.6. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 180 °C

t	Corridas	P1	P2	P3	P4	Y	\bar{Y}	σ
30	1	112.26	1.9978	112.78	0.5159	0.2582	0.2818	0.0253
	2	112.26	1.9847	112.82	0.5528	0.2785		
	3	112.26	2.0351	112.88	0.6280	0.3086		
60	1	109.18	1.9576	109.83	0.6514	0.3328	0.3347	0.0101
	2	109.17	1.9863	109.82	0.6471	0.3258		
	3	109.17	2.0223	109.86	0.6991	0.3457		
90	1	107.20	1.9854	107.91	0.7088	0.3570	0.3613	0.0048
	2	107.20	1.9854	107.92	0.7157	0.3605		
	3	107.17	1.9912	107.90	0.7298	0.3665		
120	1	109.59	1.9724	110.31	0.7247	0.3674	0.3675	0.0079
	2	109.57	2.0983	110.32	0.7547	0.3597		
	3	109.56	2.0350	110.33	0.7639	0.3754		
150	1	106.66	2.0056	107.41	0.7571	0.3775	0.3793	0.0042
	2	106.66	1.9912	107.41	0.7494	0.3764		
	3	106.67	1.9975	107.44	0.7674	0.3842		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso de la muestra seca (g); P3 = peso balón + aceite (g); P4 = peso del contenido de aceite (g); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

ANEXO 5. RESULTADOS DEL MODELADO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA

A. Variedad Ratona Morada

I. Modelo de Newton

i. 140 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0157133	0,00040315	0,0146769	0,0167496

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,64966	1	1,64966
Residuo	0,00153869	5	0,000307738
Total	1,6512	6	
Total (Corr.)	0,605862	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000307738	
MAE	0,0138149	
MAPE	6,35024	
ME	0,00019449	
MPE	-1,28795	

R-Cuadrada = 99,746 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,746 por ciento; Error estándar del est. = 0,0175425; Error medio absoluto = 0,0138149; Estadístico Durbin-Watson=1,90482; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0241405

ii. 160 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0190209	0,000336394	0,0181562	0,0198857

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,47922	1	1,47922
Residuo	0,000641927	5	0,000128385
Total	1,47986	6	
Total (Corr.)	0,660905	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000128385	
MAE	0,00831871	
MAPE	7,32908	
ME	-0,00135046	
MPE	-5,26433	

R-Cuadrada = 99,9029 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9029 por ciento; Error estándar del est. = 0,0113307; Error medio absoluto=0,00831871; Estadístico Durbin-Watson=2,10634; Autocorrelación residual de retardo 1=-0,0965517

iii. 180 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k*t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: k = 0,01; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
k	0,0270701	0,000583839	0,0255693	0,0285709	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,25341	1	1,25341
Residuo	0,000690746	5	0,000138149
Total	1,2541	6	
Total (Corr.)	0,73819	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000138149	
MAE	0,00872798	
MAPE	71,0175	
ME	-0,00419157	
MPE	-69,868	

R-Cuadrada = 99,9064 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9064 por ciento; Error estándar del est. = 0,0117537; Error medio absoluto = 0,00872798; Estadístico Durbin-Watson = 0,651355; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,547432

II. Modelo de Henderson-Pabis

i. 140 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $a*\exp(-k*t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: a = 1,0; k = 0,01; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
a	1,00745	0,0178946	0,957765	1,05713	
k	0,0158293	0,000525379	0,0143706	0,017288	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,64972	2	0,824862
Residuo	0,00147437	4	0,000368594
Total	1,6512	6	
Total (Corr.)	0,605862	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000368594	
MAE	0,0144865	
MAPE	6,37845	
ME	-0,00104396	
MPE	-1,15537	

R-Cuadrada = 99,7566 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,6958 por ciento; Error estándar del est. = 0,0191988; Error medio absoluto = 0,0144865; Estadístico Durbin-Watson = 2,06725; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,0826315

ii. 160 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $a \cdot \exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: a = 1,0; k = 0,01; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
a	1,00516	0,0117813	0,972448	1,03787	
k	0,0191111	0,000423719	0,0179347	0,0202876	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,47925	2	0,739626
Residuo	0,000612178	4	0,000153045
Total	1,47986	6	
Total (Corr.)	0,660905	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000153045	
MAE	0,00884696	
MAPE	7,14354	
ME	-0,00216018	
MPE	-5,06311	

R-Cuadrada = 99,9074 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8842 por ciento; Error estándar del est. = 0,0123711; Error medio absoluto = 0,00884696; Estadístico Durbin-Watson = 2,3326; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,227837

iii. 180 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $a \cdot \exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: a = 1,0; k = 0,01; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
a	1,00384	0,0127461	0,968454	1,03923	
k	0,027153	0,000706692	0,0251909	0,0291151	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,25343	2	0,626715
Residuo	0,000675204	4	0,000168801
Total	1,2541	6	
Total (Corr.)	0,73819	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000168801	
MAE	0,0091891	
MAPE	70,2134	
ME	-0,00477813	
MPE	-69,0703	

R-Cuadrada = 99,9085 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8857 por ciento; Error estándar del est. = 0,0129923; Error medio absoluto = 0,0091891; Estadístico Durbin-Watson = 0,77123; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,476512

III. Modelo de Page

i. 140 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(k \cdot t^n)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; $n = 1,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0118266	0,00266606	0,00442445	0,0192288
n	1,06641	0,0526016	0,920361	1,21245

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,65015	2	0,825075
Residuo	0,00104842	4	0,000262106
Total	1,6512	6	
Total (Corr.)	0,605862	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000262106	
MAE	0,0104791	
MAPE	6,01474	
ME	0,000801912	
MPE	1,32766	

R-Cuadrada = 99,827 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,7837 por ciento; Error estándar del est. = 0,0161897; Error medio absoluto = 0,0104791; Estadístico Durbin-Watson = 2,3016; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,322622

ii. 160 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(k \cdot t^n)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; $n = 1,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0151019	0,00188223	0,00987597	0,0203278
n	1,05543	0,0300584	0,97197	1,13888

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,47957	2	0,739784
Residuo	0,000296944	4	0,000074236
Total	1,47986	6	
Total (Corr.)	0,660905	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000074236	
MAE	0,00471014	
MAPE	3,49711	
ME	-0,000326016	
MPE	-1,19051	

R-Cuadrada = 99,9551 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9438 por ciento; Error estándar del est. = 0,00861603; Error medio absoluto = 0,00471014; Estadístico Durbin-Watson = 3,31084; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,655427

iii. 180 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(k \cdot t^n)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; $n = 1,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0197547	0,00251107	0,0127828	0,0267266
n	1,08059	0,0329597	0,989081	1,1721

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,25391	2	0,626954
Residuo	0,00019706	4	0,000049265
Total	1,2541	6	
Total (Corr.)	0,73819	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000049265	
MAE	0,00464184	
MAPE	40,7681	
ME	-0,00194005	
MPE	-38,9758	

R-Cuadrada = 99,9733 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9666 por ciento; Error estándar del est. = 0,0070189; Error medio absoluto = 0,00464184; Estadístico Durbin-Watson=1,18374; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,252745

B. Variedad Andina

I. Modelo de Newton

i. 140 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0162566	0,000284834	0,0155244	0,0169888

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,61329	1	1,61329
Residuo	0,00065504	5	0,000131008
Total	1,61394	6	
Total (Corr.)	0,614752	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000131008	
MAE	0,00777323	
MAPE	4,30984	
ME	-0,000591768	
MPE	-2,49513	

R-Cuadrada = 99,8934 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8934 por ciento; Error estándar del est. = 0,0114459; Error medio absoluto = 0,00777323; Estadístico Durbin-Watson=2,41586; Autocorrelación residual de retardo 1=-0,215226

ii. 160 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
k	0,0231253	0,000623849	0,0215217		0,024729

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,31611	1	1,31611
Residuo	0,00126282	5	0,000252563
Total	1,31737	6	
Total (Corr.)	0,667599	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000252563	
MAE	0,010538	
MAPE	5,88751	
ME	0,00113999	
MPE	3,89431	

R-Cuadrada = 99,8108 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8108 por ciento; Error estándar del est. = 0,0158922; Error medio absoluto = 0,010538; Estadístico Durbin-Watson = 2,31578; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,164696

iii. 180 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,02$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
k	0,03159	0,00124361	0,0283932		0,0347868

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,16843	1	1,16843
Residuo	0,00193938	5	0,000387876
Total	1,17037	6	
Total (Corr.)	0,732155	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000387876	
MAE	0,0128079	
MAPE	62,9161	
ME	-0,000994046	
MPE	-56,5543	

R-Cuadrada = 99,7351 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,7351 por ciento; Error estándar del est. = 0,0196946; Error medio absoluto = 0,0128079; Estadístico Durbin-Watson = 2,84196; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,431714

II. Modelo de Henderson-Pabis

i. 140 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $a \cdot \exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $a = 1,0$; $k = 0,01$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	1,00569	0,01163	0,973395	1,03798
k	0,0163546	0,000353536	0,0153731	0,0173362

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,61333	2	0,806663
Residuo	0,000617895	4	0,000154474
Total	1,61394	6	
Total (Corr.)	0,614752	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000154474	
MAE	0,00827454	
MAPE	4,13437	
ME	-0,00140967	
MPE	-2,3073	

R-Cuadrada = 99,8995 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8744 por ciento; Error estándar del est. = 0,0124288; Error medio absoluto = 0,00827454; Estadístico Durbin-Watson=2,68503; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,372976

ii. 160 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $a \cdot \exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $a = 1,0$; $k = 0,01$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,992283	0,016783	0,945685	1,03888
k	0,0229658	0,00075978	0,0208563	0,0250752

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,31617	2	0,658087
Residuo	0,0011996	4	0,0002999
Total	1,31737	6	
Total (Corr.)	0,667599	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0002999	
MAE	0,0111601	
MAPE	5,40761	
ME	0,00225448	
MPE	3,51883	

R-Cuadrada = 99,8203 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,7754 por ciento; Error estándar del est.=0,0173176; Error medio absoluto = 0,0111601; Estadístico Durbin-Watson=2,62452; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,342598

iii. 180 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $a \cdot \exp(-k \cdot t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $a = 1,0$; $k = 0,02$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Error Estándar	Intervalo Confianza a	
			95,0%	
			Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,995886	0,021673	0,935712	1,05606
k	0,0314861	0,00148398	0,0273658	0,0356063

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,16844	2	0,584222
Residuo	0,00192202	4	0,000480504
Total	1,17037	6	
Total (Corr.)	0,732155	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000480504	
MAE	0,0134751	
MAPE	63,9945	
ME	-0,000395714	
MPE	-57,5526	

R-Cuadrada = 99,7375 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,6719 por ciento; Error estándar del est. = 0,0219204; Error medio absoluto = 0,0134751; Estadístico Durbin-Watson = 2,92188; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,476515

III. Modelo de Page

i. 140 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t^n)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; $n = 1,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Error Estándar	Intervalo Confianza a	
			95,0%	
			Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0131126	0,00169681	0,00840148	0,0178237
n	1,0505	0,0303553	0,966225	1,13478

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,6136	2	0,806798
Residuo	0,000348132	4	0,000087033
Total	1,61394	6	
Total (Corr.)	0,614752	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000087033	
MAE	0,00589619	
MAPE	3,73098	
ME	0,000014846	
MPE	-0,113596	

R-Cuadrada = 99,9434 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9292 por ciento; Error estándar del est. = 0,00932915; Error medio absoluto = 0,00589619; Estadístico Durbin-Watson = 3,51669; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,791458

ii. 160 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t^n)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; $n = 1,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,0335285	0,00507608	0,0194351	0,047622
n	0,90812	0,0375236	0,803937	1,0123

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,31693	2	0,658464
Residuo	0,000446837	4	0,000111709
Total	1,31737	6	
Total (Corr.)	0,667599	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000111709	
MAE	0,00714686	
MAPE	7,65662	
ME	-0,00142897	
MPE	-5,17305	

R-Cuadrada = 99,9331 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9163 por ciento; Error estándar del est. = 0,0105693; Error medio absoluto = 0,00714686; Estadístico Durbin-Watson=2,01331; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,054638

iii. 180 °C

Variable dependiente: MR Experimental (adimensional); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $\exp(-k \cdot t^n)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $k = 0,01$; $n = 1,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
k	0,044623	0,00157605	0,000864614	0,0883814
n	0,909916	0,0928174	0,652213	1,16762

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,16885	2	0,584427
Residuo	0,00151243	4	0,000378107
Total	1,17037	6	
Total (Corr.)	0,732155	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000378107	
MAE	0,013308	
MAPE	113,689	
ME	-0,00374107	
MPE	-108,537	

R-Cuadrada = 99,7934 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,7418 por ciento; Error estándar del est. = 0,019445; Error medio absoluto = 0,013308; Estadístico Durbin-Watson = 2,17891; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,135437

ANEXO 6. RESULTADOS DEL MODELADO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE

A. Variedad Ratona Morada

I. Modelo de Monod

i. 140 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * t) / (b + t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $b = 15,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,464749	0,00714516	0,444911	0,484588
b	17,7454	1,38782	13,8922	21,5986

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,701258	2	0,350629
Residuo	0,000117614	4	0,0000294036
Total	0,701376	6	
Total (Corr.)	0,12527	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000294036	
MAE	0,00329231	
MAPE		
ME	-0,0000253695	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9061 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8826 por ciento; Error estándar del est. = 0,00542251; Error medio absoluto = 0,00329231; Estadístico Durbin-Watson=3,13167; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,569864

ii. 160 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * t) / (b + t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $b = 15,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,420805	0,00412939	0,40934	0,43227
b	15,0028	0,837827	12,6766	17,3289

Análisis de Varianza

Análisis de Residuos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,608348	2	0,304174
Residuo	0,000044738	4	0,0000111845
Total	0,608393	6	
Total (Corr.)	0,106973	5	

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000111845	
MAE	0,00238981	
MAPE		
ME	0,0000155853	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9582 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9477 por ciento; Error estándar del est. = 0,00334432; Error medio absoluto = 0,00238981; Estadístico Durbin-Watson=3,18545; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,708035

iii. 180 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * t) / (b + t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $b = 10,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,370353	0,00603225	0,353604	0,387101
b	13,1882	1,3355	9,48028	16,8962

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,489918	2	0,244959
Residuo	0,000104374	4	0,0000260935
Total	0,490023	6	
Total (Corr.)	0,0855124	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000260935	
MAE	0,00327878	
MAPE		
ME	-0,0000157504	
MPE		

R-Cuadrada = 99,8779 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8474 por ciento; Error estándar del est. = 0,00510818; Error medio absoluto = 0,00327878; Estadístico Durbin-Watson=3,00348; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,523346

II. Modelo de Moyano-Pedreschi

i. 140 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * k * t) / (1 + (k * t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $k = 0,03$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,464757	0,00712475	0,444975	0,484538
k	0,0563475	0,00440116	0,0441278	0,0685671

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,701258	2	0,350629
Residuo	0,000117614	4	0,0000294036
Total	0,701376	6	
Total (Corr.)	0,12527	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000294036	
MAE	0,00329162	
MAPE		
ME	-0,000024872	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9061 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8826 por ciento; Error estándar del est. = 0,00542251; Error medio absoluto = 0,00329162; Estadístico Durbin-Watson = 3,13102; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,56952

ii. 160 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * k * t) / (1 + (k * t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $k = 0,03$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Error Estándar	Intervalo Confianza a	95,0%
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Y_e	0,4208	0,00411914	0,409363	0,432237
k	0,0666593	0,00371592	0,0563423	0,0769764

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,608348	2	0,304174
Residuo	0,000044738	4	0,0000111845
Total	0,608393	6	
Total (Corr.)	0,106973	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000111845	
MAE	0,00238954	
MAPE		
ME	0,000015359	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9582 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9477 por ciento; Error estándar del est. = 0,00334432; Error medio absoluto = 0,00238954; Estadístico Durbin-Watson = 3,18474; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,707814

iii. 180 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * k * t) / (1 + (k * t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $k = 0,03$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Error Estándar	Intervalo Confianza a	95,0%
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Y_e	0,370352	0,00602122	0,353634	0,387069
k	0,0758171	0,00767376	0,0545113	0,0971229

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,489918	2	0,244959
Residuo	0,000104374	4	0,0000260934
Total	0,490023	6	
Total (Corr.)	0,0855124	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000260934	
MAE	0,00327738	
MAPE		
ME	-0,0000107471	
MPE		

R-Cuadrada = 99,8779 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8474 porciento; Error estándar del est. = 0,00510817; Error medio absoluto = 0,00327738; Estadístico Durbin-Watson=3,00286; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,523119

III. Modelo Exponencial de primer orden

i. 140 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $Y_e \cdot (1 - \exp(-k \cdot t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $k = 0,03$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,406485	0,0056142	0,390897	0,422072
k	0,0401062	0,00264099	0,0327736	0,0474388

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,701079	2	0,35054
Residuo	0,000296831	4	0,0000742079
Total	0,701376	6	
Total (Corr.)	0,12527	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000742079	
MAE	0,00500242	
MAPE		
ME	0,000126344	
MPE		

R-Cuadrada = 99,763 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,7038 porciento; Error estándar del est. = 0,0086144; Error medio absoluto=0,00500242; Estadístico Durbin-Watson=1,46108; Autocorrelación residual de retardo 1= 0,0632095

ii. 160 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $Y_e \cdot (1 - \exp(-k \cdot t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $k = 0,03$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,373847	0,00671316	0,355208	0,392486
k	0,0440373	0,0040685	0,0327413	0,0553333

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,607927	2	0,303964
Residuo	0,000465986	4	0,000116497
Total	0,608393	6	
Total (Corr.)	0,106973	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,000116497	
MAE	0,00679017	
MAPE		
ME	0,000191894	
MPE		

R-Cuadrada = 99,5644 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,4555 por ciento; Error estándar del est. = 0,0107934; Error medio absoluto = 0,00679017; Estadístico Durbin-Watson=1,97498; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,152849

iii. 180 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $Y_e \cdot (1 - \exp(-k \cdot t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,2$; $k = 0,03$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Y_e	0,332683	0,00453924	0,32008	0,345286
k	0,0473506	0,00353588	0,0375334	0,0571678

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,489796	2	0,244898
Residuo	0,000226831	4	0,0000567077
Total	0,490023	6	
Total (Corr.)	0,0855124	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000567077	
MAE	0,00427084	
MAPE		
ME	0,0000626185	
MPE		

R-Cuadrada = 99,7347 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,6684 por ciento; Error estándar del est. = 0,00753045; Error medio absoluto=0,00427084; Estadístico Durbin-Watson=1,40775; Autocorrelación residual de retardo 1= 0,0696227

B. Variedad Andina

I. Modelo de Monod

i. 140 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e \cdot t) / (b + t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,5$; $b = 20,0$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

		Intervalo Confianza a		95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Y_e	0,511621	0,00712627	0,491835	0,531407
b	20,4506	1,32326	16,7766	24,1246

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,805745	2	0,402873
Residuo	0,000103228	4	0,0000258071
Total	0,805848	6	
Total (Corr.)	0,145814	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000258071	
MAE	0,00293892	
MAPE		
ME	-0,00000393621	
MPE		

ii. 160 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Ye*t)/(b+t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: Ye = 0,5; b = 14,0; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
			Error Estándar	Asintótico
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,473519	0,00525156	0,458939	0,4881
b	16,5197	0,976936	13,8073	19,2321

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,746348	2	0,373174
Residuo	0,0000673191	4	0,0000168298
Total	0,746415	6	
Total (Corr.)	0,132362	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000168298	
MAE	0,00266194	
MAPE		
ME	-0,00000820682	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9491 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9364 por ciento; Error estándar del est. = 0,00410241; Error medio absoluto = 0,00266194; Estadístico Durbin-Watson=3,30101; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,764641

iii. 180 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Ye*t)/(b+t)$; Estimaciones iniciales de parámetros: Ye = 0,4; b = 13,0; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
			Error Estándar	Asintótico
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,414051	0,00278798	0,406311	0,421792
b	14,0584	0,563152	12,4949	15,622

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,600947	2	0,300473
Residuo	0,0000213526	4	0,00000533816
Total	0,600968	6	
Total (Corr.)	0,105206	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,00000533816	
MAE	0,00133194	
MAPE		
ME	-6,87368E-7	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9797 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9746 por ciento; Error estándar del est. = 0,00231045; Error medio absoluto = 0,00133194; Estadístico Durbin-Watson=3,35018; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,689068

II. Modelo de Moyano-Pedreschi

i. 140 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * k * t) / (1 + (k * t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,5$; $k = 0,02$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,511622	0,00710344	0,4919	0,531344
k	0,0488991	0,00315446	0,0401409	0,0576573

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,805745	2	0,402873
Residuo	0,000103228	4	0,0000258071
Total	0,805848	6	
Total (Corr.)	0,145814	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000258071	
MAE	0,00293917	
MAPE		
ME	-0,00000577635	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9292 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9115 por ciento; Error estándar del est. = 0,00508007; Error medio absoluto = 0,00293917; Estadístico Durbin-Watson=2,91519; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,489836

ii. 160 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * k * t) / (1 + (k * t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,5$; $k = 0,04$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,473519	0,00523617	0,458981	0,488057
k	0,0605333	0,00357928	0,0505956	0,070471

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,746348	2	0,373174
Residuo	0,0000673191	4	0,0000168298
Total	0,746415	6	
Total (Corr.)	0,132362	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000168298	
MAE	0,00266182	
MAPE		
ME	-0,00000766573	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9491 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9364 por ciento; Error estándar del est. = 0,00410241; Error medio absoluto = 0,00266182; Estadístico Durbin-Watson=3,30099; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,764601

iii. 180 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $(Y_e * k * t) / (1 + (k * t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $k = 0,05$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,414055	0,0027803	0,406336	0,421775
k	0,0711294	0,00285069	0,0632146	0,0790442

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,600947	2	0,300473
Residuo	0,0000213526	4	0,00000533815
Total	0,600968	6	
Total (Corr.)	0,105206	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,00000533815	
MAE	0,00133177	
MAPE		
ME	-0,00000207395	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9797 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9746 por ciento; Error estándar del est. = 0,00231044; Error medio absoluto = 0,00133177; Estadístico Durbin-Watson=3,35014; Autocorrelación residual de retardo 1= -0,688953

III. Modelo Exponencial de primer orden

i. 140 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $Ye \cdot (1 - \exp(-k \cdot t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: Ye = 0,4; k = 0,02; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,44162	0,00697098	0,422266	0,460975
k	0,0366409	0,00256342	0,0295237	0,0437581

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,805437	2	0,402719
Residuo	0,0004112	4	0,0001028
Total	0,805848	6	
Total (Corr.)	0,145814	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0001028	
MAE	0,00572182	
MAPE		
ME	0,000271216	

R-Cuadrada = 99,718 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,6475 por ciento; Error estándar del est. = 0,010139; Error medio absoluto = 0,00572182; Estadístico Durbin-Watson = 2,64931; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,39959

ii. 160 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $Ye \cdot (1 - \exp(-k \cdot t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: Ye = 0,4; k = 0,03; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Ye	0,417238	0,00603784	0,400474	0,434002
k	0,0415824	0,0029525	0,0333849	0,0497799

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,746059	2	0,373029
Residuo	0,000356525	4	0,0000891312
Total	0,746415	6	
Total (Corr.)	0,132362	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000891312	
MAE	0,00691023	
MAPE		
ME	0,000179336	
MPE		

R-Cuadrada =99,7306 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.)=99,6633 por ciento; Error estándar del est.=0,00944093; Error medio absoluto=0,00691023; Estadístico Durbin-Watson=1,90163; Autocorrelación residual de retardo 1=-0,00474367

iii. 180 °C

Variable dependiente: Y (g / g bs Experimental); Variables independientes: t (segundos); Función a estimar: $Y_e \cdot (1 - \exp(-k \cdot t))$; Estimaciones iniciales de parámetros: $Y_e = 0,4$; $k = 0,03$; Método de estimación: Marquardt

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
			Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
Y_e	0,370115	0,00498879	0,356263	0,383966
k	0,0455265	0,00324797	0,0365087	0,0545443

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,600703	2	0,300351
Residuo	0,00026515	4	0,0000662875
Total	0,600968	6	
Total (Corr.)	0,105206	5	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	6	
CME	0,0000662875	
MAE	0,00511638	
MAPE		
ME	0,000131147	
MPE		

R-Cuadrada = 99,748 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,685 por ciento; Error estándar del est. = 0,00814171; Error medio absoluto = 0,00511638; Estadístico Durbin-Watson = 2,002; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,175839

ANEXO 7. DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO AGUA

Análisis de Varianza para Razón de contenido de agua - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Temperatura	0,109991	2	0,0549953	28,05	0,0000
B: tiempo	0,811458	4	0,202864	103,45	0,0000
RESIDUOS	0,0451018	23	0,00196095		
TOTAL (CORREGIDO)	0,96655	29			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido final de agua

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Andina 180 °C	3	0,0386667	X
Andina 160 °C	3	0,0704667	X
Ratona Morada 180 °C	3	0,0829	X
Andina 140 °C	3	0,1176	X
Ratona Morada 160 °C	3	0,125467	X
Ratona Morada 140 °C	3	0,174233	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

A. Variedad Ratona Morada

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de agua en función del tiempo a 140 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
tiempo 150 s	3	0,174233	X
tiempo 120 s	3	0,205067	X
tiempo 90 s	3	0,279433	X
tiempo 60 s	3	0,455767	X
tiempo 30 s	3	0,666967	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de agua en función del tiempo a 160 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
tiempo 150 s	3	0,125467	X
tiempo 120 s	3	0,156267	X
tiempo 90 s	3	0,252067	X
tiempo 60 s	3	0,370367	X
tiempo 30 s	3	0,612267	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de agua en función del tiempo a 180 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
tiempo 150 s	3	0,174233	X
tiempo 120 s	3	0,205067	X
tiempo 90 s	3	0,279433	X
tiempo 60 s	3	0,455767	X
tiempo 30 s	3	0,666967	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

B. Variedad Andina

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de agua en función del tiempo a 140 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
tiempo 150 s	3	0,1176	X
tiempo 120 s	3	0,154367	X
tiempo 90 s	3	0,266967	X
tiempo 60 s	3	0,397533	X
tiempo 30 s	3	0,641367	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de agua en función del tiempo a 160 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
tiempo 150 s	3	0,0704667	X
tiempo 120 s	3	0,0974	X
tiempo 90 s	3	0,170167	X
tiempo 60 s	3	0,2924	X
tiempo 30 s	3	0,490733	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de agua en función del tiempo a 180 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
tiempo 150 s	3	0,0386667	X
tiempo 120 s	3	0,0494667	X
tiempo 90 s	3	0,0903667	X
tiempo 60 s	3	0,215333	X
tiempo 30 s	3	0,387233	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

ANEXO 8. DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO DE ACEITE

Análisis de Varianza para contenido de aceite absorbido - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	0,0165919	2	0,00829595	19,12	0,0000
B:tiempo	0,0486862	4	0,0121716	28,06	0,0000
RESIDUOS	0,00997843	23	0,000433845		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0752565	29			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido final de aceite

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada 180 °C	3	0,342533	X
Andina 180 °C	3	0,379367	X
Ratona Morada 160 °C	3	0,385767	X
Ratona Morada 140 °C	3	0,416567	X
Andina 160 °C	3	0,422633	X
Andina 140 °C	3	0,4477	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

A. Variedad Ratona Morada

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de aceite en función del tiempo a 140 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
tiempo 30 s	3	0,2887	X
tiempo 60 s	3	0,3675	X
tiempo 90 s	3	0,3832	X
tiempo 120 s	3	0,403233	X
tiempo 150 s	3	0,416567	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de aceite en función del tiempo a 160 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
tiempo 30 s	3	0,282633	X
tiempo 60 s	3	0,332367	X
tiempo 90 s	3	0,362567	X
tiempo 120 s	3	0,371167	X
tiempo 150 s	3	0,385767	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de aceite en función del tiempo a 180 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
tiempo 30 s	3	0,254933	X
tiempo 60 s	3	0,311267	X
tiempo 90 s	3	0,317367	X
tiempo 120 s	3	0,3318	X
tiempo 150 s	3	0,342533	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

B. Variedad Andina

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de aceite en función del tiempo a 140 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
tiempo 30 s	3	0,304567	X
tiempo 60 s	3	0,376867	X
tiempo 90 s	3	0,425367	X
tiempo 120 s	3	0,435567	XX
tiempo 150 s	3	0,4477	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de aceite en función del tiempo a 160 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
tiempo 30 s	3	0,304533	X
tiempo 60 s	3	0,373167	X
tiempo 90 s	3	0,396833	X
tiempo 120 s	3	0,4223	X
tiempo 150 s	3	0,422633	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido de aceite en función del tiempo a 180 °C

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
tiempo 30 s	3	0,281767	X
tiempo 60 s	3	0,334767	X
tiempo 90 s	3	0,361333	X
tiempo 120 s	3	0,3675	X
tiempo 150 s	3	0,379367	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

ANEXO 9. DATOS ESTADÍSTICOS DEL MODELADO DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA

A. Modelo de Newton

Tabla ANOVA para el parámetro k por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5,4431	2	2,72155	66,25	0,0000
Intra grupos	0,616227	15	0,0410818		
Total (Corr.)	6,05932	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro k

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada 140 °C	3	1,5713	X
Andina 140 °C	3	1,6257	X
Ratona Morada 160 °C	3	1,9021	X
Andina 160 °C	3	2,3125	X
Ratona Morada 180 °C	3	2,707	X
Andina 180 °C	3	3,159	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

B. Modelo de Henderson-Pabis

Tabla ANOVA para el parámetro k por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5,36019	2	2,6801	68,62	0,0000
Intra grupos	0,585897	15	0,0390598		
Total (Corr.)	5,94609	17			

Tabla ANOVA para el parámetro a por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,00021679	2	0,000108395	0,48	0,6261
Intra grupos	0,00336535	15	0,000224357		
Total (Corr.)	0,00358214	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro k

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada 140 °C	3	1,5829	X
Andina 140 °C	3	1,6355	X
Ratona Morada 160 °C	3	1,9111	X
Andina 160 °C	3	2,2966	X
Ratona Morada 180 °C	3	2,7153	X
Andina 180 °C	3	3,1486	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

C. Modelo de Page

Tabla ANOVA para el parámetro k por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	11,8229	2	5,91147	5,77	0,0138
Intra grupos	15,3561	15	1,02374		
Total (Corr.)	27,179	17			

Tabla ANOVA para el parámetro n por Temperatura

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0,0201188	2	0,0100594	1,40	0,2778
Intra grupos	0,108041	15	0,00720273		
Total (Corr.)	0,12816	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro k

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Ratona Morada 140 °C	3	1,1827	X
Andina 140 °C	3	1,3113	X
Ratona Morada 160 °C	3	1,5102	XX
Ratona Morada 180 °C	3	1,9755	X
Andina 160 °C	3	3,3529	X
Andina 180 °C	3	4,4623	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

ANEXO 10. DATOS ESTADÍSTICOS DEL MODELADO DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE

A. Modelo de Monod

Tabla ANOVA para el parámetro Ye por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0277836	2	0,0138918	19,46	0,0001
Intra grupos	0,010709	15	0,000713934		
Total (Corr.)	0,0384926	17			

Tabla ANOVA para el parámetro b por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	91,3621	2	45,681	22,51	0,0000
Intra grupos	30,4392	15	2,02928		
Total (Corr.)	121,801	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro Ye

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Cas os	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada 180 °C	3	0,3704	X
Andina 180 °C	3	0,4141	X
Ratona Morada 160 °C	3	0,4208	X
Ratona Morada 140 °C	3	0,4647	X
Andina 160 °C	3	0,4735	X
Andina 140 °C	3	0,5116	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro b

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Cas os	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada 180 °C	3	13,188	X
Andina 180 °C	3	14,058	X
Ratona Morada 160 °C	3	15,003	XX
Andina 160 °C	3	16,52	XX
Ratona Morada 140 °C	3	17,745	X
Andina 140 °C	3	20,451	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

B. Modelo de Moyano-Pedreschi

Tabla ANOVA para el parámetro Ye por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,027811	2	0,0139055	19,51	0,0001
Intra grupos	0,0106929	15	0,000712857		
Total (Corr.)	0,0385039	17			

Tabla ANOVA para k por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	13,0531	2	6,52653	23,40	0,0000
Intra grupos	4,18395	15	0,27893		
Total (Corr.)	17,237	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro Ye

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Cas os	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada 180 °C	3	0,3704	X
Andina 180 °C	3	0,4141	X
Ratona Morada 160 °C	3	0,4208	X
Ratona Morada 140 °C	3	0,4648	X
Andina 160 °C	3	0,4735	X
Andina 140 °C	3	0,5116	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro k

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Cas os	Media	Grupos Homogéneos
Andina 140 °C	3	4,8899	X
Ratona Morada 140 °C	3	5,6348	XX
Andina 160 °C	3	6,0533	XX
Ratona Morada 160 °C	3	6,6659	XX
Andina 180 °C	3	7,1129	XX
Ratona Morada 180 °C	3	7,5817	X

C. Modelo Exponencial de primer orden

Tabla ANOVA para Ye por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0160759	2	0,00803793	16,78	0,0001
Intra grupos	0,0071845	15	0,000478966		
Total (Corr.)	0,0232604	17			

Tabla ANOVA para k por Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,95807	2	0,979037	9,43	0,0022
Intra grupos	1,55788	15	0,103858		
Total (Corr.)	3,51595	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro Ye

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Cas os	Media	Grupos Homogéneos
Ratona Morada 180 °C	3	0,3327	X
Andina 180 °C	3	0,3701	X
Ratona Morada 160 °C	3	0,3738	X
Ratona Morada 140 °C	3	0,4065	X
Andina 160 °C	3	0,4172	X
Andina 140 °C	3	0,4416	X

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro k

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Cas os	Media	Grupos Homogéneos
Andina 140 °C	3	3,6641	X
Ratona Morada 140 °C	3	4,0106	XX
Andina 160 °C	3	4,1582	XX
Ratona Morada 160 °C	3	4,4037	XX
Andina 180 °C	3	4,5527	XX
Ratona Morada 180 °C	3	4,7351	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

ANEXO 11. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN DE LA RAZÓN DE HUMEDAD

A. Variedad Ratona Morada

I. 140 °C

Variable dependiente: Ln MR; Variable independiente: t (segundos); Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-0,00183225	0,0656229	-0,0279209	0,9791
Pendiente	-0,0158213	0,000722484	-21,8985	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,94245	1	3,94245	479,54	0,0000
Residuo	0,032885	4	0,00822124		
Total (Corr.)	3,97533	5			

Coefficiente de Correlación = -0,995855; R-cuadrada = 99,1728 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,966 por ciento; Error estándar del est. = 0,0906711; Error absoluto medio = 0,0633589; Estadístico Durbin-Watson = 1,94053 (P=0,2142); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,134019

II. 160 °C

Variable dependiente: Ln MR; Variable independiente: t (segundos); Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	0,0461424	0,0545405	0,84602	0,4452
Pendiente	-0,0202667	0,000600471	-33,7514	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	6,46917	1	6,46917	1139,16	0,0000
Residuo	0,0227156	4	0,00567891		
Total (Corr.)	6,49189	5			

Coefficiente de Correlación = -0,998249; R-cuadrada = 99,6501 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,5626 por ciento; Error estándar del est. = 0,0753586; Error absoluto medio = 0,0470385; Estadístico Durbin-Watson = 2,67228 (P=0,6334); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,383164

II. 180 °C

Variable dependiente: Ln MR; Variable independiente: t (segundos); Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	0,309521	0,261345	1,18434	0,3018
Pendiente	-0,0359061	0,00287731	-12,479	0,0002

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	20,3056	1	20,3056	155,73	0,0002
Residuo	0,521571	4	0,130393		
Total (Corr.)	20,8272	5			

Coefficiente de Correlación = -0,987399; R-cuadrada = 97,4957 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96,8696 por ciento; Error estándar del est. = 0,361099; Error absoluto medio = 0,257461; Estadístico Durbin-Watson = 1,12369 (P=0,0173); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,156388

B. Variedad Andina

I. 140 °C

Variable dependiente: Ln MR; Variable independiente: t (segundos); Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	0,0240393	0,045888	0,523869	0,6281
Pendiente	-0,0168795	0,00050521	-33,4109	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4,48745	1	4,48745	1116,29	0,0000
Residuo	0,0160799	4	0,00401999		
Total (Corr.)	4,50353	5			

Coefficiente de Correlación = -0,998213; R-cuadrada = 99,6429 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,5537 por ciento; Error estándar del est. = 0,0634034; Error absoluto medio = 0,0409986; Estadístico Durbin-Watson = 3,08608 (P=0,8578); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,59672

II. 160 °C

Variable dependiente: Ln MR; Variable independiente: t (segundos); Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-0,0218648	0,0407098	-0,537089	0,6197
Pendiente	-0,022276	0,0004482	-49,701	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	7,81548	1	7,81548	2470,19	0,0000
Residuo	0,0126557	4	0,00316392		
Total (Corr.)	7,82814	5			

Coefficiente de Correlación = -0,999191; R-cuadrada = 99,8383 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,7979 por ciento; Error estándar del est. = 0,0562487; Error absoluto medio = 0,0421681; Estadístico Durbin-Watson = 2,93025 (P=0,7826); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,499602

III. 180 °C

Variable dependiente: Ln MR; Variable independiente: t (segundos); Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	0,298835	0,280549	1,06518	0,3468
Pendiente	-0,0394098	0,00308874	-12,7592	0,0002

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	24,4619	1	24,4619	162,80	0,0002
Residuo	0,601041	4	0,15026		
Total (Corr.)	25,0629	5			

Coefficiente de Correlación = -0,987937; R-cuadrada = 97,6019 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97,0023 por ciento; Error estándar del est. = 0,387634; Error absoluto medio = 0,29125; Estadístico Durbin-Watson = 1,12462 (P=0,0174); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,196491

ANEXO 12. DATOS ESTADÍSTICOS DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

Tabla ANOVA para Deff por Temperatura

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	244,912	2	122,456	172,83	0,0000
Intra grupos	10,6283	15	0,708553		
Total (Corr.)	255,54	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para Deff

Método: 95,0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Ratona Morada 140 °C	3	6,4035	X
Andina 140 °C	3	6,84933	X
Ratona Morada 160 °C	3	8,2273	X
Andina 160 °C	3	9,03783	X
Ratona Morada 180 °C	3	14,55	X
Andina 180 °C	3	15,968	X

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

ANEXO 13. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

A. Variedad Ratona Morada

Variable dependiente: Ln Deff; Variable independiente: 1/T; Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-9,68763	2,23289	-4,33862	0,1442
Pendiente	-3815,68	965,112	-3,95361	0,1577

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0,332536	1	0,332536	15,63	0,1577
Residuo	0,0212741	1	0,0212741		
Total (Corr.)	0,353811	2			

Coefficiente de Correlación = -0,96947; R-cuadrada = 93,9871 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 87,9743 por ciento; Error estándar del est. = 0,145857; Error absoluto medio = 0,079366; Estadístico Durbin-Watson = 2,99858 (P=); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,666193

B. Variedad Andina

Variable dependiente: Ln Deff; Variable independiente: 1/T; Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-9,3201	2,06788	-4,50708	0,1390
Pendiente	-3937,98	893,791	-4,40593	0,1421

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0,354196	1	0,354196	19,41	0,1421
Residuo	0,018246	1	0,018246		
Total (Corr.)	0,372442	2			

Coefficiente de Correlación = -0,975197; R-cuadrada = 95,101 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90,202 por ciento; Error estándar del est. = 0,135078; Error absoluto medio = 0,0735009; Estadístico Durbin-Watson = 2,99858 (P=); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,666193

ANEXO 14. DATOS ESTADÍSTICOS DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN PARA EL CONTENIDO DE AGUA

Tabla ANOVA para la comparación de la energía de activación de Ratona Morada y Andina

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	1,55042	1	1,55042	0,03	0,8799
Intra grupos	239,221	4	59,8053		
Total (Corr.)	240,772	5			

ANEXO 15. RESULTADOS DE LA REGRESIÓN DEL CONTENIDO DE ACEITE EN EQUILIBRIO

A. Variedad Ratona Morada

Variable dependiente: Ln Ye; Variable independiente: 1/T; Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coeficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-3,07487	0,318669	-9,64912	0,0657
Pendiente	911,925	137,737	6,62077	0,0954

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,018994	1	0,018994	43,83	0,0954
Residuo	0,000433312	1	0,000433312		
Total (Corr.)	0,0194273	2			

Coefficiente de Correlación = 0,988785; R-cuadrada = 97,7696 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95,5392 por ciento; Error estándar del est. = 0,0208161; Error absoluto medio = 0,0113268; Estadístico Durbin-Watson = 2,99858 (P=); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,666193

B. Variedad Andina

Variable dependiente: Ln Ye; Variable independiente: 1/T; Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coeficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-2,66029	0,363215	-7,32428	0,0864
Pendiente	770,855	156,991	4,91019	0,1279

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,013572	1	0,013572	24,11	0,1279
Residuo	0,000562922	1	0,000562922		
Total (Corr.)	0,0141349	2			

Coefficiente de Correlación = 0,979885; R-cuadrada = 96,0175 por ciento; R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92,035 por ciento; Error estándar del est. = 0,023726; Error absoluto medio = 0,0129102; Estadístico Durbin-Watson = 2,99858 (P=); Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,666193

ANEXO 16. DATOS ESTADÍSTICOS DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN PARA EL CONTENIDO DE ACEITE EN EQUILIBRIO

Tabla ANOVA para la comparación de la energía de activación de Ratona Morada y Andina

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	2,06354	1	2,06354	1,37	0,3073
Intra grupos	6,04021	4	1,51005		
Total (Corr.)	8,10375	5			