



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA  
SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE  
DESHIDRATACIÓN DE LA UCHUVA (*Physalis Peruviana L.*)**

**Juan Carlos Mahecha Godoy**  
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA  
PROGRAMA CURRICULAR DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA  
2011**





UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA  
SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE  
DESHIDRATACIÓN DE LA UCHUVA (*Physalis Peruviana L.*)**

**Juan Carlos Mahecha Godoy**

Ingeniero Mecánico

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de  
Magíster en Ingeniería – Ingeniería Agrícola**

**Director:**

**Alfonso Parra Coronado**

**Ingeniero Agrícola M.Sc.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA  
PROGRAMA CURRICULAR DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA  
2011**



*Al padre celestial, por permitirme aprender cada día cosas nuevas.*

*A la memoria de mi padre.*

*A mi madre, Cristina.*

*A mi maestro y formador, El Shaik.*

*A Carol, con todo mi amor.*

*A Maliabel, por estar siempre conmigo.*

*Juan Carlos*

## Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos, por su colaboración y apoyo durante todo el desarrollo de este proyecto a:

Al Ing. Alfonso Parra, por compartir conmigo un poco de sus conocimientos en el tema y por su acertada dirección de este proyecto.

Al Ing. Juan Edilberto Rincón Pardo, por su incansable apoyo e incondicional amistad.

Al Ing. Gustavo Basto por sus valiosos aportes que se convirtieron en hechos durante el desarrollo de este proyecto.

Al Grupo de Investigación en Diseño de Máquinas, porque de allí han surgido muy buenas ideas.

Al Ing. Ricardo Castillo por su apoyo en muchas etapas del desarrollo del proyecto.

Al Ing. Rubén Darío Godoy Silva por sus valiosos aportes para sacar adelante este proyecto.

A la Ing. Amanda Consuelo Díaz Moreno por su valiosísima colaboración y tiempo dedicado al desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Fernando Salazar por su valiosa colaboración y tiempo dedicado al desarrollo de este proyecto.

Al Ing. William Aguirre por valiosa colaboración en la consecución de la fruta para poder realizar los ensayos para del proyecto.

Al personal encargado del laboratorio de la Planta Piloto de Ingeniería Química, por toda su colaboración.

Y en general a todas y cada una de las personas que aportaron para el desarrollo de este proyecto.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Jurado 1

---

Jurado 2

---

Jurado 3

---

Director del Proyecto

Bogotá, D.C., Mayo de 2011





## Resumen

El objetivo de este trabajo fue determinar experimentalmente los parámetros necesarios para la simulación matemática del proceso de deshidratación de la Uchuva (*Physalis peruviana L.*). Para ello se evaluó el proceso de deshidratación con aire caliente para dos pre-tratamientos: escaldado, osmodeshidratado y testigo sin ningún tratamiento especial. Como parámetros para la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uchuva se determinaron las ecuaciones para el Contenido de Humedad en Equilibrio (CHEq), velocidad de secado, calor latente de vaporización y calor específico del producto. Se evaluaron las propiedades físico-químicas y sensoriales de la uchuva deshidratada antes y después del proceso. Con los resultados obtenidos se realizó la simulación matemática del proceso de deshidratación utilizando el modelo matemático de secado en capa delgada de Roa, modificado para las condiciones del sistema de deshidratación de la uchuva. Se encontró que las mejores condiciones de operación del sistema de deshidratación corresponden a una temperatura del aire de 60°C y una velocidad de aire de 3 m s<sup>-1</sup> para una carga de producto de 13,3 kg m<sup>-2</sup>. Para la obtención de los parámetros de secado se utilizó una cámara experimental de secado diseñada y construida por el Grupo de Investigación en Diseño de Máquinas GIDMAQ de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá y la metodología establecida por el Grupo de Investigación en Postcosecha de productos Agrícolas para la ecuación de velocidad de secado, para la ecuación de contenido de humedad en equilibrio una cámara de secado y para la ecuación de calor específico un calorímetro isoperibólico.

**Palabras clave:** Deshidratación, Uchuva, parámetros, simulación.

## Abstract

The aim of this study was to determine experimentally parameters necessary for the mathematical process dehydration of the Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L.). We evaluated the drying process with hot air for two pre-treatments, blanching, osmodehydrated and control without any special treatment. As parameters for the mathematical dehydration process of Cape Gooseberry were determined equations for the equilibrium moisture content (CHeq), drying rate, latent heat of vaporization and specific heat of the product. It evaluated the physico-chemical and sensory of Cape Gooseberry dehydrated before and after processing. With the results obtained performed mathematical simulation of the dehydration process using the mathematical model of thin layer drying Roa, modified to system conditions of dehydration of cape gooseberry. It was found that the best operating conditions of the dehydration system corresponds to an air temperature of 60°C and a speed of 3 ms<sup>-1</sup> for a product load of 13.3 kg m<sup>-2</sup>. To obtain the drying parameters used an experimental chamber drying designed and built by the Research Group Machine Design GIDMAQ of the National University of Colombia at Bogotá and methodology established by the Research Group on Post-harvest Agricultural products for the drying rate equation for the equation of equilibrium moisture content of a drying chamber and the specific heat equation isoperibol a calorimeter.

Keywords: dehydration, Cape Gooseberry, parameters, simulation.

## Tabla de contenido

|   |     |
|---|-----|
| Resumen .....   | IX  |
| Abstract.....   | X   |
| Lista de Figuras .....  | XII |
| Lista de Tablas.....  | XVI |
| Lista de Símbolos y Abreviaturas .....  | XIX |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1   |
| 1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....  | 3   |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:.....   | 3   |
| 1.2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....   | 3   |
| 1.2.1. Perspectivas del mercado actual de la uchuva en fresco y procesado ..... | 4   |
| 1.2.1.1. Mercado Actual de la Uchuva en fresco y procesado. ....                | 4   |
| 1.2.1.2. Perspectivas de mercado.....   | 9   |
| 1.3. Objetivos y Alcances del Proyecto .....                                    | 11  |
| 2. MARCO TEÓRICO .....  | 13  |
| 2.1. LA UCHUVA .....  | 13  |
| 2.2. AGROINDUSTRIA DE LA UCHUVA.....  | 17  |
| 2.3. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS .....  | 18  |
| 2.3.1. Línea de proceso para la deshidratación de frutas.....                   | 30  |
| 2.3.2. Clasificación de los sistemas de secado .....                            | 32  |
| 2.3.3. Variables físicas que influyen en el potencial de secado.....            | 34  |
| 2.3.3.1. Variables externas.....  | 35  |
| 2.3.3.2. Variables Internas.....  | 36  |
| 2.4. SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN .....                  | 37  |
| 2.4.1. Modelos Matemáticos .....  | 38  |
| 2.4.1.1. Modelo de Thompson .....   | 39  |
| 2.4.1.2. Modelo MSU.....  | 39  |
| 2.4.1.3. Modelo de Roa.....   | 40  |
| 2.4.1.4. Otros Modelos.....   | 40  |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.4.2.   | Selección del Modelo .....                                   | 41 |
| 2.4.3.   | Parámetros para el Modelamiento matemático del secado.....   | 42 |
| 2.4.3.1. | Ecuación de Contenido de Humedad en Equilibrio (CHEq).....   | 42 |
| 2.4.3.2. | Ecuación de Calor Específico.....                            | 47 |
| 2.4.3.3. | Ecuación de velocidad de secado .....                        | 50 |
| 2.4.3.4. | Ecuación de Calor Latente de Vaporización ( $h_{fg}$ ) ..... | 52 |
| 2.5.     | PRE-TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....                               | 54 |
| 2.5.1.   | Escaldado .....  | 55 |
| 2.5.1.1. | Métodos de Escaldado .....                                   | 55 |
| 2.5.1.2. | Temperatura del medio calefactor. ....                       | 56 |
| 2.5.2.   | Osmodeshidratado .....                                       | 57 |
| 2.6.     | ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....                                   | 60 |
| 3.       | MATERIALES Y MÉTODOS.....                                    | 63 |
| 3.1.     | MATERIALES .....   | 63 |
| 3.1.1.   | Materia prima. ....  | 63 |
| 3.2.     | EQUIPOS.....   | 64 |
| 3.2.1.   | Cámara Experimental de Secado .....                          | 64 |
| 3.2.2.   | Cámara de Secado .....                                       | 66 |
| 3.2.3.   | Calorímetro isoperibólico:.....                              | 68 |
| 3.2.4.   | Determinación del contenido de humedad.....                  | 70 |
| 3.3.     | METODOLOGÍA .....  | 71 |
| 3.3.1.   | Pre-tratamientos .....                                       | 71 |
| 3.3.1.1. | Sin ningún pre-tratamiento (blanco) .....                    | 71 |
| 3.3.1.2. | Escaldado .....  | 72 |
| 3.3.1.3. | Osmodeshidratado .....                                       | 72 |
| 3.3.2.   | Determinación de los parámetros .....                        | 73 |
| 3.3.2.1. | Ecuación de Contenido de Humedad en Equilibrio (CHEq).....   | 73 |
| 3.3.2.2. | Ecuación de Calor específico .....                           | 75 |
| 3.3.2.3. | Ecuación de Velocidad de Secado .....                        | 76 |
| 3.3.2.4. | Ecuación de Calor Latente de Vaporización .....              | 78 |
| 3.3.3.   | Análisis Físico-químicos .....                               | 79 |
| 4.       | RESULTADOS Y ANÁLISIS .....                                  | 82 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 4.1.   | ECUACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO.....  | 82  |
| 4.1.1. | Determinación de los parámetros de la ecuación de contenido de humedad en equilibrio. .... | 85  |
| 4.1.2. | Análisis de la Regresión para el contenido de humedad en equilibrio. ....                  | 91  |
| 4.2.   | ECUACIÓN DE CALOR ESPECÍFICO .....   | 96  |
| 4.2.1. | Ecuaciones de calor específico para la uchuva sometida a diferentes pre-tratamientos.....  | 97  |
| 4.2.2. | Análisis de la regresión para el calor específico. ....                                    | 100 |
| 4.3.   | ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE SECADO .....  | 101 |
| 4.3.1. | Determinación de los parámetros de la ecuación de velocidad de secado. ....                | 105 |
| 4.3.2. | Análisis de la regresión para la ecuación de velocidad de secado. ....                     | 106 |
| 4.4.   | ECUACIÓN DE CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN .....  | 107 |
| 4.4.1. | Determinación de los parámetros de la ecuación de calor latente de vaporización. ....      | 110 |
| 4.4.2. | Análisis de la regresión para la ecuación de calor latente de vaporización. ....           | 114 |
| 4.5.   | SIMULACIÓN MATEMÁTICA REALIZADA CON LOS PARÁMETROS ENCONTRADOS.....                        | 115 |
| 4.5.1. | Influencia de la temperatura y de la velocidad del aire en la velocidad de secado          | 115 |
| 4.5.2. | Condiciones de operación.....  | 119 |
| 4.6.   | RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS .....   | 120 |
| 4.7.   | RESULTADOS ANÁLISIS DE TEXTURA, ACTIVIDAD DE AGUA Y COLORIMETRIA .....                     | 121 |
| 4.7.1. | Análisis de textura y actividad de agua.....   | 122 |
| 4.7.2. | Colorimetría .....   | 124 |
| 4.7.3. | Panel de Análisis Sensorial de Aceptación .....  | 130 |
|        | PARÁMETROS GENERADOS .....   | 137 |
|        | CONCLUSIONES .....   | 141 |
|        | RECOMENDACIONES .....  | 143 |
|        | BIBLIOGRAFÍA.....  | 144 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1. Países exportadores de berries en 2006. FUENTE: (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural 2009).....  | 5  |
| Figura 2.1. Tabla de color del fruto de Uchuva, basado en la NTC 4580 de (ICONTEC, 1999) .....  | 17 |
| Figura 2.2. Isotherma de equilibrio de almidón de yuca. (Moreno, 2008) .....  | 21 |
| Figura 2.3. Esquema de deshidratación en capa delgada. (Domínguez, 1983).....   | 25 |
| Figura 2.4. Curva de secado a 50°C de pulpa de cupuaçu ( <i>Theobroma grandiflorum</i> ) en rodajas (Giraldo-Zuniga et al, 2010).....                             | 26 |
| Figura 2.5. Etapa de velocidad de secado constante. Pulpa de cupuaçu ( <i>Theobroma grandiflorum</i> ) en rodajas a 50°C (Giraldo-Zuniga et al, 2010) .....       | 27 |
| Figura 2.6. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado. Curvas de secado de pimiento rojo a diferentes temperaturas (Vega et al, 2005).....           | 28 |
| Figura 2.7: Influencia de la velocidad del aire en la velocidad de secado. Cinética del secado de Lúcumá (Barrera et al, 2009).....                               | 28 |
| Figura 2.8. Periodos de velocidad decreciente para pulpa de Lúcumá a 60°C y tres velocidades de aire (Barrera et al, 2009). .....                                 | 30 |
| Figura 2.9. Descripción del proceso de deshidratado. (Meyer, 2004).....   | 31 |
| Figura 2.10. Clasificación de los sistemas de secado. (Baker, 1997).....  | 33 |
| Figura 2.11. Clasificación de los sistemas de secado por el modo de transferencia de calor. (Araya-Farias et al, 2009).....                                       | 34 |
| Figura 2.12. Tipos de Flujo de aire. (a) Flujo de aire paralelo al producto, (b) Flujo de aire perpendicular al producto (c) lecho fluidizado. (Perry, 1994)..... | 35 |
| Figura 2.13. Isothermas de adsorción y desorción. Representación del fenómeno de histéresis. (Ospina, 2001). .....  | 44 |
| Figura 2.14. Proceso de deshidratación osmótica de una fruta. (Camacho, 2004).....  | 59 |
| Figura 3.1. Uchuva utilizada en los ensayos de secado.....  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.2. Cámara experimental de secado. ....  | 64 |
| Figura 3.3. Cámara de secado ubicada en la Planta Piloto de Ingeniería Química. ....   | 65 |
| Figura 3.4. Aspersores y resistencias eléctricas de inmersión para generar la humedad en el sistema. ....  | 66 |
| Figura 3.5. Ventilador centrífugo y resistencias eléctricas del secador experimental. ....   | 67 |
| Figura 3.6. Re-cámara de secado.....   | 67 |
| Figura 3.7. Recirculación del aire al sistema de humidificación.....   | 68 |
| Figura 3.8: Esquema de un calorímetro isoperibólico. (Quintana G., 2005) .....   | 69 |
| Figura 3.9. Imágenes del Calorímetro ubicado en el Laboratorio CINDELIC del Departamento Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. .... | 69 |
| Figura 3.10. Balanza determinadora de humedad Marca Sartorius Modelo MA150. ....   | 70 |
| Figura 3.11. Izquierda: muestra para realizar la medida de contenido de humedad inicial; derecha: muestra al finalizar la medida.....                                    | 71 |
| Figura 3.12. Montaje para la realización del escaldado de la uchuva.....   | 72 |
| Figura 4-1. Hongos y ataque de micro-organismos en ensayo a 40°C y 20 %HR.....   | 83 |
| Figura 4.2. Datos experimentales del Contenido de Humedad en Equilibrio en base seca para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento). ....                               | 84 |
| Figura 4.3. Datos experimentales del Contenido de Humedad en Equilibrio en base seca para uchuva sometida a escaldado.....   | 84 |
| Figura 4.4. Datos experimentales del Contenido de Humedad en Equilibrio en base seca para uchuva sometida a osmodeshidratado.....  | 85 |
| Figura 4.5. Isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento) generadas a partir del modelo.....                           | 88 |
| Figura 4.6. Isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sometida a escaldado generadas a partir del modelo. ....   | 89 |
| Figura 4.7. Isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sometida a osmodeshidratado generadas a partir del modelo. ....                                  | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.8. Comparación de las isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento) generadas a partir del modelo con los valores experimentales. .... | 93  |
| Figura 4.9. Comparación de las isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva escaldada generadas a partir del modelo con los valores experimentales....                             | 94  |
| Figura 4.10. Comparación de las isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva osmodeshidratada generadas a partir del modelo con los valores experimentales. ....                   | 95  |
| Figura 4.11. Curvas de calor específico generadas a partir del modelo para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento). ....   | 98  |
| Figura 4.12. Curvas de Calor Específico generadas a partir del modelo para escaldado.   | 99  |
| Figura 4.13. Curvas de Calor Específico generadas a partir del modelo para osmodeshidratado. ....   | 99  |
| Figura 4.14. Curvas de secado experimentales y teóricas para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento). ....   | 102 |
| Figura 4.15. Curvas de secado experimentales y teóricas para uchuva escaldada. ....   | 103 |
| Figura 4.16. Curvas de secado experimentales y teóricas para uchuva osmodeshidratada. ....  | 104 |
| Figura 4.17. Comparación entre los datos experimentales y calculados para la relación de calor latente de vaporización de uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento). ....                        | 112 |
| Figura 4.18. Comparación entre los datos experimentales y calculados para la relación de Calor Latente de Vaporización de Uchuva escaldada. ....  | 113 |
| Figura 4.19. Comparación entre los datos experimentales y calculados para la relación de calor latente de vaporización de Uchuva osmodeshidratada. ....   | 113 |
| Figura 4.20. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado para uchuva Blanco (sin ningún pre-tratamiento). ....   | 116 |
| Figura 4.21. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado para uchuva escaldada. ....   | 117 |
| Figura 4.22. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado para uchuva osmodeshidratada. ....  | 118 |



---

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.23. Medida de la actividad de agua promedio para los ensayos evaluados. ....                      | 123 |
| Figura 4.24. Medida de punto de penetración por texturometro para los ensayos evaluados. ....              | 124 |
| Figura 4.25. Espacio de colores CIE-LAB. (Ramírez-Navas, 2010). ....                                       | 125 |
| Figura 4.26. Datos de colorimetría para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco). ...                    | 127 |
| Figura 4.27. Datos de colorimetría para uchuva sometida a escaldado. ....                                  | 128 |
| Figura 4.28. Datos de colorimetría para uchuva sometida a osmodeshidratato. ....                           | 128 |
| Figura 4.29. Índice de color – IC, para cada una de las muestras evaluadas.....                            | 129 |
| Figura 4.30. Datos del panel sensorial de aceptación para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento). .... | 134 |
| Figura 4.31. Datos del panel sensorial de aceptación para uchuva Escaldada. ....                           | 135 |
| Figura 4.32. Datos del panel sensorial de aceptación para uchuva Osmodeshidratada.                         | 136 |

## Lista de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1. Destino y precios de la uchuva en la Unión Europea, periodo 2007-2008. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009) .....   | 6  |
| Tabla 1.2. Consumo de la Uchuva en Colombia entre 1995-2000 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009). .....  | 7  |
| Tabla 1.3. Exportaciones de Colombia de Uchuva deshidratada en el período 2009-2010 (Datos DIAN-DANE y cálculos realizados por PROEXPORT COLOMBIA). .....  | 9  |
| Tabla 1.4. Oportunidades y limitaciones de la agroindustria de la Uchuva (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009). .....   | 10 |
| Tabla 2.1. Composición nutricional de la Uchuva. (Camacho, 2004) .....   | 14 |
| Tabla 2.2. Clasificación de los sistemas de secado. ....   | 31 |
| Tabla 2.3. Modelos matemáticos de varios autores para la obtención de las curvas de secado. (Wang, 2007).....  | 41 |
| Tabla 2.4. Parámetros de la Ecuación de Humedad de Equilibrio de Herderson – Thompson para diferentes productos Tropicales. Fuente: ASAE. Yearbook 1996. Otros Investigadores. (Citado por Ospina, 2001) ..... | 45 |
| Tabla 2.5. Parámetros de la Ecuación de ROA para el Contenido de Humedad de equilibrio de Diferentes Productos. Fuente (Roa y Rossi 1980; Citado por (Ospina, 2001)), (Moreno, 2008) .....                     | 46 |
| Tabla 2.6. Referencias para el cálculo del calor específico del almidón. (Moreno, 2008). 47  |    |
| Tabla 2.7. Calores Específicos para algunos productos agrícolas. Fuente: Varios autores. ....  | 48 |
| Tabla 2.8. Ecuaciones de calor latente de vaporización para algunos productos a partir de la expresión de Othmer. (Valderrama, 1991). ....   | 54 |
| Tabla 3.1. Rangos de operación de la cámara experimental de secado. ....   | 66 |
| Tabla 3.2. Matriz de resultados para isotermas de CHEq.....  | 74 |
| Tabla 3.3. Matriz de ensayos para las curvas de secado.....  | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4.1. Contenido de Humedad en Equilibrio para Uchuva Blancos (sin ningún pre-tratamiento). .....  | 81  |
| Tabla 4.2. Contenido de Humedad en Equilibrio para Uchuva sometida a escaldado.....  | 83  |
| Tabla 4.3. Contenido de Humedad en Equilibrio para Uchuva sometida a osmodeshidratado. ....  | 83  |
| Tabla 4.4. Parámetros para la ecuación de Roa de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sometida a diferentes pre-tratamientos. ....   | 85  |
| Tabla 4.5. Estadísticas de regresión para la ecuación de contenido de humedad en equilibrio para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada. ....                                  | 91  |
| Tabla 4.6. Resultados de calor específico generados para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blancos). ....   | 96  |
| Tabla 4.7. Resultados de calor específico generados para uchuva escaldada.....   | 96  |
| Tabla 4.8. Resultados de Calor específico generados para uchuva osmodeshidratada...  | 97  |
| Tabla 4.9. Constantes de la ecuación de calor específico para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada, para CH bh y CH bs. ....   | 97  |
| Tabla 4.10. Análisis de regresión lineal de los datos obtenidos para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada, para las ecuaciones de calor específico en función del CH bs..... | 100 |
| Tabla 4.11. Parámetros generados para la ecuación de velocidad de secado (Ec. 3.2) para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.  | 105 |
| Tabla 4.12. Análisis de regresión lineal para los datos obtenidos de velocidad de secado para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.  | 107 |
| Tabla 4.13. Calculo de la relación de calor latente de vaporización para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento).....   | 108 |
| Tabla 4.14. Calculo de la relación de Calor Latente de Vaporización para uchuva escaldada. ....  | 109 |
| Tabla 4.15. Calculo de la relación de Calor Latente de Vaporización para uchuva osmodeshidratada. ....   | 109 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4.16. Constantes estimadas para la ecuación de calor latente de vaporización para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada. ....                 | 111 |
| Tabla 4.17. Análisis de Regresión Lineal para los datos obtenidos de Calor Latente de Vaporización para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada. .... | 114 |
| Tabla 4.18. Influencia de la temperatura y de la velocidad del aire en la velocidad de secado de uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldado y osmodeshidratado. ....        | 119 |
| Tabla 4.19. Condiciones recomendadas de operación del deshidratado de uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldado y osmodeshidratado. ....                                   | 120 |
| Tabla 4.20. Análisis físico-químicos realizados a la fruta antes del proceso de deshidratado. ....   | 120 |
| Tabla 4.21. Lista de Ensayos a los cuales se les realizó las medidas de textura, actividad de agua y colorimetría. ....  | 121 |
| Tabla 4.22. Promedios de las medidas de textura, $A_w$ . ....  | 122 |
| Tabla 4.23. Promedios de las medidas de colorimetría. ....   | 126 |
| Tabla 4.24. Encuesta de Panel Sensorial de Aceptación para uchuva deshidratada. ....   | 130 |
| Tabla 4.25. Resultados Panel Sensorial de Aceptación, uchuva blanco. ....  | 131 |
| Tabla 4.26. Resultados Panel Sensorial de Aceptación, uchuva escaldada. ....   | 132 |
| Tabla 4.27. Resultados Panel Sensorial de Aceptación, uchuva osmodeshidratada. ....  | 132 |

## Lista de Símbolos y Abreviaturas

A continuación se tiene la lista de abreviaturas utilizadas en este documento.

### Símbolos con letras latinas

| Símbolo     | Término  | Unidad SI  |
|-------------|--|--|
| <i>CH</i>   | Contenido de Humedad   | Adimensional                                     |
| <i>CHbh</i> | Contenido de Humedad en base húmeda  | Adimensional                                     |
| <i>CHbs</i> | Contenido de Humedad en base seca  | Adimensional                                     |
| <i>hfg'</i> | Calor latente de vaporización del producto del agua contenida en el mismo. | $\text{KJ kg}^{-1}$                              |
| <i>hfg</i>  | Calor latente de vaporización del agua                                     | $\text{KJ kg}^{-1}$                              |
| <i>HR</i>   | Humedad Relativa del aire  | Adimensional                                     |
| <i>PV</i>   | Presión de vapor   | Pa   |
| <i>PVS</i>  | Presión de vapor de saturación   | Pa   |
| <i>T</i>    | Temperatura  | $^{\circ}\text{C}$                               |
| <i>Cp</i>   | Calor específico   | $\text{KJ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{kg}^{-1}$ |

# INTRODUCCIÓN

La economía Colombiana se mueve en torno a la agricultura, siendo esta un punto muy importante para el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías. Las investigaciones en poscosecha de la gran variedad de productos que se producen en el país deben enfocarse en poder darle valor agregado a esa materia prima agrícola y que ésta se conserve; ese es el gran reto que tienen los centros de investigación y Universidades.

En Colombia por ser un país tropical, se producen gran variedad de frutas dentro de las cuales el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2006) ha priorizado unas cuantas, entre ellas la Uchuva (*Physalis peruviana* L.). En esta fruta, Colombia es el principal productor y exportador. Debido a esta razón se motivó el desarrollo de este proyecto, ya que se pretende ofrecer otra alternativa de preservación teniendo como base el conocimiento del proceso de deshidratado de la misma y así poder diseñar, construir y hacer más eficientes los equipos que realicen estos procesos.

El Grupo de Investigación en Postcosecha de Productos Agrícolas y el Grupo de Investigación en Diseño de Máquinas GIDMAQ han identificado esta problemática y se están adelantando algunos desarrollos al respecto, como el diseño y desarrollo de maquinaria para el proceso de deshidratado tanto para laboratorio como para producción industrial y, en asocio con otros grupos de investigación, la simulación matemática del proceso de deshidratado de otros productos agrícolas.

El presente proyecto tiene como objetivo principal la determinación de los parámetros experimentales de deshidratación de la Uchuva (*Physalis peruviana* L.) para realizar la simulación matemática del proceso. Obteniendo cuatro ecuaciones matemáticas que caracterizan este producto (Contenido de Humedad de Equilibrio, Velocidad de Secado, Calor Específico y Calor Latente de Vaporización del agua contenida en el producto) se implementa la modelación matemática del proceso, con el objetivo final de diseñar y construir maquinaria con las condiciones de proceso adecuadas en las

cuales se obtenga un producto de excelente calidad con el menor gasto energético. Este procedimiento se realizó a uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado. Esto con el fin de evaluar y comparar los diferentes resultados y poder determinar cuáles son las mejores condiciones en las cuales se puede deshidratar la fruta.

El documento presenta la justificación del desarrollo de la investigación, los objetivos formulados y el entorno que gira alrededor de este producto. Luego se hace una descripción del marco teórico en el cual se basa la investigación, se describen las diferentes operaciones de secado y los modelos matemáticos utilizados en la simulación del proceso. Así mismo se hace una revisión de las metodologías experimentales con las cuales se generan las ecuaciones a obtener.

Seguido se presentan los procedimientos experimentales que se realizaron, en los cuales se especifica metodologías, variables involucradas en los ensayos y una descripción de cada uno de los equipos utilizados. Luego se presentan las ecuaciones con los resultados obtenidos y los procedimientos estadísticos que dan validez a estos resultados. Por último se hace un análisis de las variables que más influyen en el proceso de deshidratado con miras a determinar las mejores condiciones de operación.

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se pudo conocer el comportamiento del deshidratado de la Uchuva aplicando diferentes pre-tratamientos térmicos y haciendo comparación con uchuva sin ningún tratamiento. La determinación de las ecuaciones que simulan el comportamiento del deshidratado abre luces para continuar con el desarrollo de este producto y ofrecerle a los industriales del sector este paquete tecnológico para su implementación.

# **1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN**

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:**

En Colombia, muchas empresas deshidratan uchuva de manera empírica, con base en pruebas de ensayo y error. Aunque algunas Universidades, incluyendo la Universidad Nacional de Colombia, han realizado investigaciones en secado de uchuva, ninguna de ellas ha determinado las ecuaciones de los parámetros que tienen mayor incidencia en el proceso de deshidratación.

La ventaja que tiene el conocer estos parámetros radica en que por medio de ellos se puede hacer el modelamiento matemático del proceso de deshidratación de la fruta, optimizando el manejo y operación de los equipos en los cuales se realiza este proceso, disminuyendo el tiempo y por consiguiente los costos del proceso, lo cual permite mejorar la calidad del producto final con una aceptación mayor por parte del consumidor.

(Domínguez et al, 1983) describen la simulación matemática como el enfoque básico para el proceso de deshidratado de productos y consiste en dividir el proceso en muchos pasos pequeños y calcular el proceso en capas delgadas durante incrementos de tiempo pequeños.

## **1.2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN**

La deshidratación es probablemente el método más antiguo y de uso más frecuente en la conservación de alimentos. Actualmente es una técnica versátil y muy extendida en la industria alimentaria, así como un tema de interés continuo en la investigación de alimentos. El término deshidratación se refiere a la eliminación de la humedad de un material con el objetivo primordial de reducir la actividad microbiana y el deterioro del producto (Ratti, 2001). Además de la preservación, la reducción del peso y de volumen de los productos deshidratados se disminuye el empaque, la manipulación, y los costos de transporte. Por otra parte, la mayoría de los productos alimenticios se deshidratan



para mejorar procesos posteriores como molienda o mezcla. En la actualidad bebidas instantáneas en polvo, mezclas de sopas deshidratadas, especias, café, y diferentes ingredientes utilizados en la transformación de los alimentos son los principales productos alimenticios que están deshidratando (Araya-Farias, et al, 2009)

“El agua retirada durante este proceso puede ser eliminada de los alimentos por las simples condiciones ambientales o por una variedad de procesos controlados de deshidratación en los que se someten a técnicas que emplean diferentes medios como calor, aire, frío y ósmosis” (Camacho, 2004). Esta eliminación de agua puede ser casi completa y se busca prevenir al máximo los cambios en el alimento con el fin de lograr obtener productos lo más parecidos a los alimentos frescos. Los niveles de humedad final de los productos llegan a alcanzar valores de 1 a 5% según el producto. Por lo general la calidad lograda en la deshidratación es proporcional al costo del proceso aplicado, existiendo sus excepciones (Camacho, 2004).

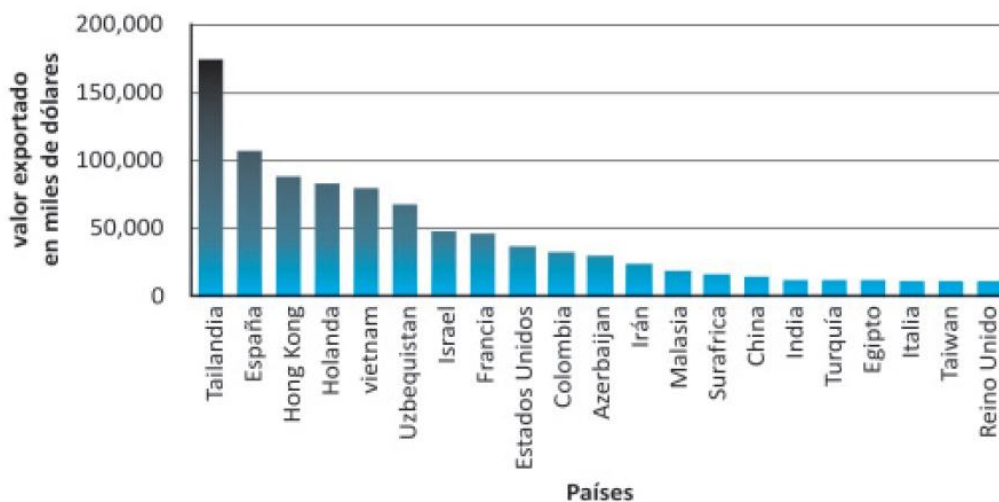
Por otra parte, el Departamento Nacional de Planeación en la Visión Colombia 2019, identificó los productos exportables del sector agropecuario, de acuerdo con las oportunidades de mercado de cada producto, sus indicadores de competitividad y los requisitos para lograr su admisibilidad en los mercados internacionales. Con esta información como base y con la concertación llevada a cabo con los Gremios se priorizaron una serie de productos, y entre las frutas la uchuva. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006). Además, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2009) al sacar la Agenda Prospectiva de Investigación y Desarrollo para la uchuva plantea la importancia de esta fruta para los productores colombianos a la cual se debe estudiar las diferentes formas de conservación, entre ellas la deshidratación.

### **1.2.1. Perspectivas del mercado actual de la uchuva en fresco y procesado**

#### **1.2.1.1. Mercado Actual de la Uchuva en fresco y procesado.**

La dinámica comercial de la uchuva en el mundo se puede deducir a través de las cifras de comercio internacional para las frutas, específicamente para el grupo de las berries. En la Figura 1.1, Colombia ocupa la décima posición, ya que su participación

en la comercialización se fundamenta específicamente en la uchuva; mientras que, países como Tailandia y España aparecen como líderes, posiblemente por los volúmenes comercializados en fresa y otras berries. Aparte de Colombia, según los reportes de los orígenes y precios de la uchuva en la Unión Europea, el otro país que exporta uchuva es Suráfrica, aunque en muy pequeñas cantidades (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006).



**Figura 1.1** Países exportadores de berries en 2006. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009)

Colombia es el principal exportador de Uchuva del mundo. Casi la totalidad de la uchuva consumida por la Unión Europea provenía de Colombia para el periodo 2007-2008, tal como se aprecia en la Tabla 1.1, mostrando un variado comportamiento de precios en los mercados analizados (TROPICAL AND OFF-SEASON FRESH FRUITS MARKET NEWS SERVICE (MNS), citado por Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

**Tabla 1.1.** Destino y precios de la uchuva en la Unión Europea, periodo 2007-2008. (TROPICAL AND OFF-SEASON FRESH FRUITS MARKET NEWS SERVICE (MNS), Citado por Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

| Año  | Mercado     | Origen    | Precio (USD) | Empaque              |
|------|-------------|-----------|--------------|----------------------|
| 2007 | Bélgica     | Colombia  | 6,00         | Preempacado 12x100gr |
|      | Dinamarca   | Colombia  | 6,71         | Preempacado 12x100gr |
|      | Francia     | Colombia  | 7,75         | Preempacado 12x100gr |
|      | Alemania    | Colombia  | 4,90         | Preempacado 12x100gr |
|      | Holanda     | Colombia  | 5,94         | Preempacado 12x100gr |
|      | Italia      | Colombia  | 7,44         | Preempacado 12x100gr |
|      | Suecia      | Colombia  | 7,73         | Preempacado 12x100gr |
|      | Suiza       | Colombia  | 8,48         | Preempacado 12x100gr |
|      | Reino Unido | Colombia  | 6,58         | Preempacado 12x100gr |
| 2008 | Bélgica     | Colombia  | 5,83         | Preempacado 12x100gr |
|      | Dinamarca   | Colombia  | 6,49         | Preempacado 12x100gr |
|      | Francia     | Colombia  | 7,75         | Preempacado 12x100gr |
|      | Alemania    | Colombia  | 5,21         | Preempacado 12x100gr |
|      | Holanda     | Colombia  | 6,25         | Preempacado 12x100gr |
|      | Suiza       | Colombia  | 8,29         | Preempacado 12x100gr |
|      | Reino Unido | Colombia  | 6,09         | Preempacado 12x100gr |
|      | Reino Unido | Suráfrica | 3,84         | 2kg                  |

De acuerdo con los datos de precios para Europa en países como Bélgica, Dinamarca, Francia, Alemania, Holanda, Italia, Suecia y Suiza se puede inducir que solamente Colombia exportó en 2007 y 2008 o es la referencia de precio, ya que Sudáfrica es el

único otro país que se reseña como mercado origen y sólo participó en las exportaciones al Reino Unido en 2008 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

En cuanto a la dinámica en el país, en Colombia el consumo per cápita anual de frutas frescas es de aproximadamente 4,1 kg/hab cada año, presentando niveles muy bajos frente a otros países latinoamericanos, como Costa Rica con 49 kg/hab., Cuba con 23,1 kg/hab. y Ecuador con 21,8 kg/hab. Entre 1993 y 2002, el consumo de frutas frescas en Colombia creció el 1,1% (Cálculos de FAO, citado por Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

En el quinquenio 1995-2000, el consumo de uchuva en Colombia mostró uno de los crecimientos más dinámicos del conjunto de las frutas colombianas (74,5% promedio anual). Del mismo modo, el consumo *per cápita* creció a una tasa promedio anual de 72,7% en el mismo periodo, al pasar de 0,001 kilos en 1995 a 0,11 kilos por persona al año al final del periodo, como puede verse en la Tabla 1-2 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

**Tabla 1.2.** Consumo de la Uchuva en Colombia entre 1995-2000 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

|   | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | Crecimiento % |
|---|------|------|------|------|------|------|---------------|
| <b>Consumo aparente toneladas</b>       | 68   | 590  | 397  | 412  | 3230 | 4485 | 74,5          |
| <b>Consumo percapita Kilogramos/año</b> | 0    | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,08 | 0,11 | 72,7          |

Las presentaciones de uchuva procesada más frecuentes son: fruta congelada IQF, puré, pulpa, mermeladas, conservas, deshidratada (para consumir como pasabocas, especialmente en el mercado de Bogotá). El mayor valor del mercado está en la fruta fresca o en los elaborados que mantienen su forma intacta. Existen clientes internacionales que están interesados en las mermeladas, aderezos y pulpas de uchuva a granel, esto presenta algunos inconvenientes a nivel logístico y de empaques

(Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009). La uchuva transformada se comercializa en cantidades mínimas en el mercado nacional, en diferentes presentaciones, (Pomona): mermelada, chutney, salsas, deshidratada, en almíbar (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

Recientemente, se han introducido al mercado los productos deshidratados, comercializados principalmente a través de los supermercados e hipermercados. El precio de venta del producto a los intermediarios nacionales oscila entre \$3.500- 3.800 por 120 g. El precio de venta al público en grandes superficies es de \$4.000 a \$6.000 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

El mercado internacional está a cargo de intermediarios que exportan el producto deshidratado, lo compran a granel para reempacar posteriormente con diferentes marcas. Los principales mercados de destino son Canadá, USA, República Checa, Alemania y Japón. El precio promedio son de USD \$9,5 por kilo de producto deshidratado. La tendencia de este mercado es continuar en crecimiento, sin embargo, se da para producto certificado como orgánico. La uchuva deshidratada cuenta con partida arancelaria 0813400000 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

Según datos de la DIAN-DANE y cálculos realizados por PROEXPORT, la uchuva deshidratada en el período 2009 y 2010 se ha comportado como se muestra en la Tabla 1.3, se observa un crecimiento en el período analizado, y países como Líbano y Turquía entran como mercado objetivo. Los datos reportados son para la partida arancelaria 0813400000, la cual corresponde a uchuva deshidratada (Datos DIAN-DANE, Cálculos PROEXPORT COLOMBIA). La disminución de las exportaciones a países como Estados Unidos, Alemania, Suecia, España y Canadá se puede deber al aumento del precio promedio de venta del producto comparado con los datos reportados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2009).

## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

**Tabla 1.3.** Exportaciones de Colombia de Uchuva deshidratada en el período 2009-2010 (Datos DIAN-DANE y cálculos realizados por PROEXPORT COLOMBIA).

| País                          | USD 2009<br>FOB | USD 2010<br>FOB | Crecimiento | USD Enero<br>2010 | USD Enero<br>2011 |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------------|
| <b>LIBANO</b>                 |                 | 277.344,00      |             |                   |                   |
| <b>TURQUIA</b>                | 8,00            | 140.902,17      |             |                   | 169.738,50        |
| <b>ESTADOS UNIDOS</b>         | 292.449,46      | 113.818,77      | -61,09%     | 10.095,84         | 4.168,00          |
| <b>SUIZA</b>                  | 93.161,20       | 84.636,33       | -9,15%      |                   |                   |
| <b>ALEMANIA</b>               | 68.079,75       | 36.993,06       | -45,66%     |                   |                   |
| <b>SUECIA</b>                 | 24.864,82       | 12.414,09       | -50,07%     |                   |                   |
| <b>ESPAÑA</b>                 | 33.920,16       | 10.752,00       | -68,30%     |                   |                   |
| <b>RUMANIA</b>                |                 | 6.144,00        |             |                   |                   |
| <b>CANADA</b>                 | 8.368,50        | 5.261,20        | -37,13%     |                   | 1.036,20          |
| <b>REINO UNIDO</b>            |                 | 0,50            |             |                   |                   |
| <b>BELGICA</b>                |                 | 0,10            |             |                   |                   |
| <b>COSTA RICA</b>             |                 |                 |             |                   | 2,46              |
| <b>FRANCIA</b>                | 2,53            |                 |             |                   |                   |
| <b>AUSTRALIA</b>              |                 |                 |             |                   | 4.752,00          |
| <b>ZONA FRANCA<br/>BOGOTÁ</b> | 41,16           |                 |             |                   |                   |
| <b>Totales</b>                | \$ 520.895,58   | \$ 688.266,22   |             | \$ 10.095,84      | \$ 179.697,16     |

### 1.2.1.2. Perspectivas de mercado

Según El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2009), el análisis del agronegocio mundial para uchuva en fresco permite concluir que la hegemonía de Colombia en el mercado de la uchuva es incuestionable, lo cual, si bien es cierto hasta el 2008, no necesariamente debe continuar con la misma tendencia, ya que la entrada de Brasil y Chile como posibles competidores, podría invertir el escenario.

La cadena productiva de la uchuva toma importancia para el país y como agronegocio en el ámbito internacional, con el crecimiento significativo del consumo de fruta principalmente en los países europeos, y en menor medida en USA y los mercados

orientales. La uchuva, por los volúmenes que se comercializan en el mercado europeo, sola o unida con otras bayas, dejó de ser un producto exótico para convertirse en un “commodities” (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

La cadena de la uchuva en Colombia aún enfrenta el reto importante de constituirse y estructurarse formalmente como cadena, pues no hay una gestión de integración que dé cabida a todos los agentes que están involucrados, se logra definir un modelo de cadena constituido por siete eslabones con sus correspondientes segmentos. Los siete eslabones corresponden a proveedores, productores, comercializadores mayoristas, comercializadores minoristas, agroindustria, distribuidor mayorista y consumidor final (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

El (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009) realizó un análisis sobre las oportunidades y las limitaciones de la agroindustria de la uchuva, la cual lo enfoca a dos productos: uchuva en salsas y uchuva deshidratada (Tabla 1.3).

**Tabla 1.4.** Oportunidades y limitaciones de la agroindustria de la Uchuva (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

| Oportunidad  | Limitación  |
|--|---|
| La uchuva presenta buenas características de rendimiento y eficiencia para su procesamiento.   | La eficiencia del proceso de transformación es baja por la tecnología usada.  |
| Especies vegetales cercanas a la uchuva permiten adaptación de tecnologías para procesamiento (tomate, tomatillo).                                 | Falta investigación sobre las propiedades de la fruta para que sea posible posicionar el producto como nutraceutico o alimento funcional.   |
| Mercado incipiente de los productos procesados en el ámbito nacional e internacional (deshidratados, mermeladas, salsas, dulces, conservas, etc.). | Falta de estudios que indiquen qué características del fruto varían en el proceso de transformación.  |
| Alternativas para incrementar el consumo nacional se basan en la promoción del producto.   | Altas exigencias a nivel de certificaciones y registros para alimentos procesados (FDA, USDA, CE2097, BPM, HCCP, orgánico nacional).<br><br>Falta de infraestructura logística para la comercialización de productos procesados (empaques). |

### 1.3. Objetivos y Alcances del Proyecto

#### OBJETIVO GENERAL:

Determinar experimentalmente y por medio de simulación matemática el comportamiento del secado de la Uchuva (*Physalis peruviana L.*)

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Determinar cuáles son los mejores pre-tratamiento para el deshidratado de Uchuva (*Physalis peruviana L.*).
2. Determinar experimentalmente los parámetros del proceso de deshidratación de la Uchuva (*Physalis peruviana L.*) para los pre-tratamientos establecidos, a saber:
  - Obtener la ecuación de velocidad de deshidratación según el modelo seleccionado.
  - Obtener la ecuación de contenido de humedad en equilibrio.
  - Obtener la ecuación de calor latente de vaporización del agua contenida en la uchuva.
  - Obtener la ecuación de calor específico para la uchuva.
3. Determinar las propiedades físico-químicas, antes de la deshidratación, y sensoriales, después de la deshidratación, de la Uchuva (*Physalis peruviana L.*).
4. Implementar y validar un programa de simulación matemática del proceso de deshidratación para la uchuva (*Physalis peruviana L.*), tomando como punto de partida los parámetros de deshidratación obtenidos en el objetivo 2.

#### Alcances del proyecto

Las ecuaciones de los parámetros de deshidratación obtenidos, se utilizan en la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uchuva, con el fin de optimizar el diseño y la operación de la maquinaria industrial utilizada en este proceso, dando continuidad a proyectos desarrollados por los Grupos de Investigación en



Postcosecha adscrito al Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, el Grupo de Investigación en Diseño de Máquinas GIDMAQ y el Grupo de Investigación Agrospectiva adscritos al Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Los parámetros obtenidos experimentalmente deben permitir la simulación matemática del deshidratado de la uchuva para un secador tipo por bache o tandas, el cual será diseñado, desarrollado y construido en un próximo proyecto de investigación, con el fin de poder ofrecerle a los productores y empresas dedicadas a la deshidratación un paquete tecnológico acorde a sus necesidades y potencializar la exportación de esta fruta procesada.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. LA UCHUVA

La uchuva (*Physalis peruviana L.*), que pertenece a la familia de las *Solanáceas* y al género *Physalis*, cuenta con más de ochenta variedades que se encuentran en estado silvestre y que se caracterizan porque sus frutos están encerrados dentro de un cáliz o capacho (Corporación Colombia Internacional, 2002).

Según Fischer (2000), la uchuva se adapta fácilmente a una amplia gama de condiciones agroecológicas. En Colombia, crece entre los 1.500 y los 3.000 msnm, pero los mejores cultivos se ubican a una altura entre los 1.800 y los 2.800 msnm, con una temperatura promedio que oscila entre los 13 y 18°C y una pluviosidad entre 1.000 y 2.000 mm anuales bien distribuidos, además, requiere de una humedad relativa promedio de 70 a 80%. Requiere de suelos bien drenados con un pH entre 5.5 y 7.0 y ricos en materia orgánica.

La Uchuva (*Physalis peruviana L.*) es la especie más conocida del género y se caracteriza por tener un fruto azucarado con altos contenidos de vitaminas A y C, hierro y fósforo (Corporación Colombia Internacional, 2002). Las semillas son numerosas, reniformes, de 1,5 a 2 mm de diámetro, amarillas o de color café dorado. Se puede consumir sola, en almíbar, postres y con otras frutas dulces. El arbusto de la uchuva se caracteriza por ser ramificado de ramaje caído y normalmente crece hasta un metro de altura, aunque si se estaca, poda y se le da un buen cuidado esta planta puede llegar a los dos metros de altura. Posee flores amarillas y con forma de campana que son fácilmente polinizadas por insectos y el viento (Zapata et al, 2002)

En la Tabla 2.1 se muestra la composición nutricional de la Uchuva (porción de 100 g).

**Tabla 2.1.** Composición nutricional de la Uchuva. (Camacho, 2004)

| <b>Factor Nutricional</b> | <b>Contenido</b> |
|---------------------------|------------------|
| <b>Ácido ascórbico</b>    | <b>20 mg</b>     |
| <b>Calcio</b>             | 9 mg             |
| <b>Carbohidratos</b>      | 11 g             |
| <b>Fibra</b>              | 0,4 g            |
| <b>Grasa</b>              | 0,5 g            |
| <b>Niacina</b>            | 0,8 mg           |
| <b>Riboflavina</b>        | 0,17 mg          |
| <b>Vitamina A</b>         | 1790 UI          |
| <b>Agua</b>               | 85,9 gr          |
| <b>Calorías</b>           | 49               |
| <b>Cenizas</b>            | 0,7 g            |
| <b>Fósforo</b>            | 21 mg            |
| <b>Hierro</b>             | 1,7 mg           |
| <b>Proteínas</b>          | 1,5 g            |
| <b>Tiamina</b>            | 0,01 mg          |

### **El Fruto**

Fischer (1995) describe el fruto de uchuva como una baya carnosa de forma ovoide o globular, de 1,25 a 2,50 cm de diámetro y con peso entre 4 y 10 g; está cubierto por un cáliz formado por cinco pétalos que lo protege contra insectos, pájaros, patógenos y condiciones climáticas extremas. Según Valencia (1985), cuando los frutos tienen un diámetro de 10 a 11 mm, el tejido glandular, ubicado en la base interior del cáliz, produce una resina terpénica que cubre el fruto hasta su madurez; posiblemente, tiene funciones de repelente.

Valencia (1985) y Fischer (2000) describen la piel del fruto como lisa y de color amarillo intenso hasta amarillo-anaranjado en el grado de madurez de consumo. La estructura interior del fruto parece la de un tomate en miniatura; sin embargo, la pulpa está

constituida por tejido proveniente tanto del pericarpio como de la placenta y contiene de 100 a 300 semillas pequeñas, de forma lenticular, desprovista de hilos placentarios.

Los frutos de los diferentes ecotipos de la uchuva se diferencian por el tamaño, el color y la forma del cáliz. Frutos maduros del ecotipo Colombia poseen mejor coloración y mayor contenido de azúcares (17,3 °Brix al día 56), mientras frutos de los ecotipos Kenia y Sudáfrica solamente alcanzaron 15,4 °Brix y 15,0 °Brix, respectivamente, lo cual lo hace más apetecido en el mercado (Flórez et al, 2000).

La composición química de la uchuva constituye una fuente importante de vitaminas A, B y C; por su alto contenido de provitamina A (especialmente  $\beta$ -caroteno; 1.000 a 5.000 U.I. de vitamina A) se clasifica como un fruto carotenógeno. Es una fuente excelente de vitamina C (30 mg·100 g<sup>-1</sup> del fruto fresco) y del complejo vitamina B<sub>12</sub> (Rehm y Espig, 1991). Los contenidos de fósforo, hierro y fibra también son altos, por el contrario, los de calcio son bajos. Al fruto se le atribuyen propiedades medicinales como purificar la sangre, disminuir la albúmina de los riñones, fortificar el nervio óptico, limpiar las cataratas y aliviar las afecciones de garganta (Corporación Colombia Internacional, 2002).

Los frutos de uchuva son ricos en azúcares (11 a 20 g de carbohidratos digeribles en 100 g de peso fresco); los frutos maduros contienen entre 13 y 15 °Brix y los frutos pintones entre 9 y 13 °Brix. Igualmente almacenan un buen contenido de ácidos (1,6 a 2,0% de acidez en frutos maduros). El mayor porcentaje de azúcares lo constituye la sacarosa, con un contenido de unas 2,5 veces mayor que el de glucosa y fructosa (Fischer et al, 1997).

### **Maduración del fruto**

La maduración corresponde a la fase final del crecimiento y desarrollo del fruto, en la cual se presenta una serie de cambios, generalmente coordinados, que llevan a la senescencia. En este proceso se producen cambios tanto de síntesis como de degradación (Kays, 1997).

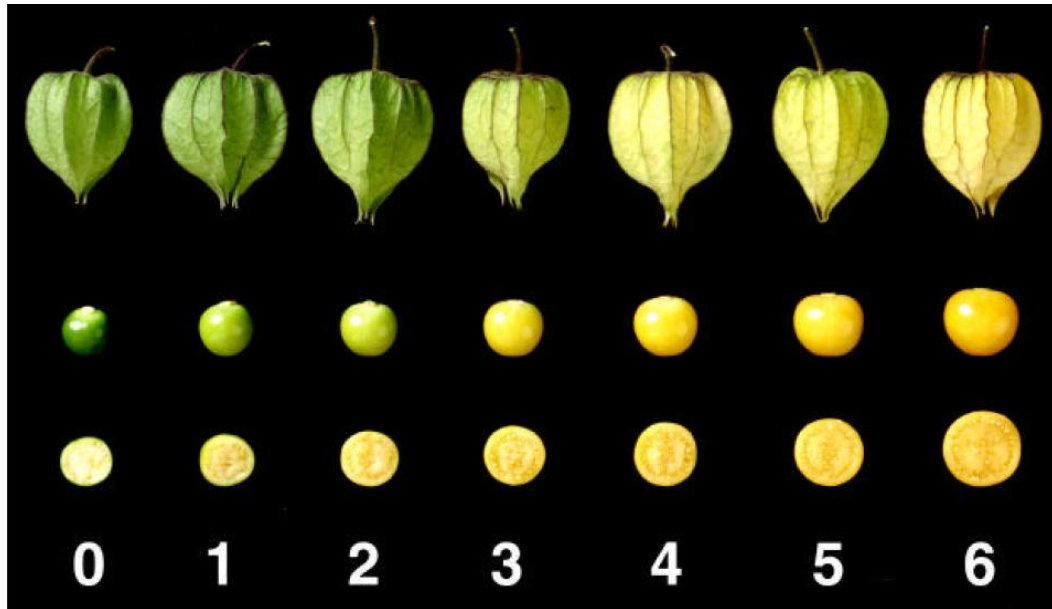
En algunos frutos, el inicio de la maduración se acompaña por un aumento en la intensidad respiratoria y en la producción de etileno, el cual llega a su valor máximo cuando el fruto está completamente maduro, es decir, cuando ha alcanzado su madurez de consumo; a partir de ese momento su intensidad respiratoria disminuye y corresponde al periodo de senescencia. Los frutos que presentan este comportamiento se denominan climatéricos; los frutos no climatéricos no presentan aumento de la respiración (Kays, 1997; Wills et al, 1998).

Algunos autores reportan que el fruto presenta un comportamiento climatérico (Castañeda, 2002; Trincheró, 1999; Alvarado et al, 2004; Citados por Galvis, 2005). Mientras que otros autores reportan que el fruto presenta un comportamiento no climatérico (Villamizar et al, 1993; citado por Galvis, 2005).

Rodríguez (2003) (Citado por Galvis, 2005) cuestiona que la uchuva se comporte como fruto climatérico, ya que el máximo de intensidad respiratoria, las mejores características sensoriales y la mejor relación de madurez (sólidos solubles totales / acidez total titulable) no coinciden entre sí, por lo tanto se clasifica como un fruto intermedio entre un comportamiento climatérico y no climatérico. Además, anota que el climaterio puede ser causado por el estrés de la separación del fruto de la planta o son los tratamientos usados en la pos-recolección.

En cuanto a los cambios de color en el fruto, la cáscara y la pulpa se colorean simultáneamente. Castañeda y Paredes (2003) (Citado por Galvis, 2005) observaron en Granada (Cundinamarca) que el fruto presenta coloración verde-intensa durante los primeros 35 días después de la antesis; a partir de este día comienza a cambiar hacia color amarillo; alrededor del día 63 la corteza y la pulpa presentan coloración amarilla característica de la madurez de consumo, como consecuencia de la degradación de la clorofila por acción de las enzimas clorofilasas, que en medio ácido aumenta su actividad. En el día 84 la coloración se torna naranja, lo cual indica que el fruto está sobremaduro.

En la Figura 2.1 se muestra la Tabla de color del fruto y el cáliz de uchuva, basado en la Norma Técnica Colombiana NTC 4580 de ICONTEC (1999).



**Figura 2.1.** Tabla de color del fruto de Uchuva, basado en la NTC 4580 de (ICONTEC, 1999)

Para fruta de exportación se debería cosechar pasando el estado 3 de la Figura 2.1. La tendencia de los consumidores europeos parece inclinarse a frutos con cáliz más verdes que amarillos ya que para ellos es un indicador de frescura (Galvis, 2005).

## 2.2. AGROINDUSTRIA DE LA UCHUVA

Según Camacho y Sanabria (2005), en general se ha estudiado la uchuva ecotipo Colombia para el desarrollo de los productos derivados conservados.

La uchuva posee características tanto físico-químicas como organolépticas que permite obtener diversos productos transformados con elevados rendimientos. Con un peso promedio de 4 a 5 g, un contenido promedio de pulpa cercano al 85%, al incluir la piel puede alcanzar el 94%, sólidos solubles de la fruta esta alrededor de los 14 °Brix

(sólidos solubles expresados en porcentaje de sacarosa), la acidez titulable tiene un promedio entre 1,3 y 1,8% expresado en ácido cítrico, el contenido de pectina es intermedio respecto a otras frutas comunes, favorecen el aprovechamiento industrial. (Camacho y Sanabria, 2005).

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2009) las presentaciones de uchuva procesada más frecuentes en el mercado nacional son mermelada, chutney, salsas, deshidratada, en almíbar y en el mercado internacional hay clientes que están interesados en mermeladas, aderezos y pulpas de uchuva a granel.

En uchuvas deshidratadas se encuentran en el mercado los tipos “pasabocas” simples y los recubiertos con chocolate (Camacho y Sanabria, 2005)

En el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos ICTA de la Universidad Nacional de Colombia, se han estandarizado algunos procesos para la transformación de uchuva, entre ellos la osmodeshidratación. Camacho y Sanabria (2005) la define como la salida de agua de la fruta mediante el fenómeno de la ósmosis. Esto ocurre espontáneamente cuando las frutas enteras se sumergen en una solución de azúcar de elevada concentración. Esta salida parcial de agua y gases disminuye el contenido de materia de la fruta y alivia la presión sobre la piel. Durante la inmersión también salen solutos de la fruta, en menor cantidad que el agua y de forma simultánea entran solutos de la solución concentrada o agente osmótico.

### **2.3. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS**

La deshidratación de alimentos es el método más antiguo de conservación de los productos perecederos. La utilización del sol para reducir el contenido de agua de un producto, es el procedimiento más ancestral y menos costoso de conservación. Diversos autores indican que en el paleolítico, hace 400.000 años, se secaban al sol alimentos, carnes y pescados especialmente. Hoy todavía se utiliza en la deshidratación de frutas: higos, uvas, melocotones, etc. (Vanaclocha, 2003).

En la actualidad existen numerosos métodos o procesos para deshidratar alimentos y estos pueden ser evaluados desde el punto de vista de eficiencia energética, tiempo de secado, calidad del producto terminado, entre otros, dependiendo de los requerimientos del mercado. El equilibrio entre estos factores es requerido para alcanzar el objetivo en los procedimientos de fabricación al tiempo que garantiza alimentos con los estándares de calidad que pide el consumidor final (Dong Chen et al, 2008).

Con la deshidratación de un producto se consigue un incremento en las posibilidades de conservación y una gran reducción de peso, hasta una quinta parte, cuando se trata de raíces y tubérculos y hasta quince veces menor en vegetales de hoja. Estos son los factores más importantes que aconsejan el uso de este proceso, puesto que además de conseguir la conservación del alimento asegura una reducción sustancial de los costos de almacenamiento y/o transporte (Vanaclocha, 2003).

La eliminación del agua de un alimento presenta dos problemas importantes: por una parte, el riesgo de alteración de la calidad nutricional y sobre todo organoléptica del producto tratado y por otra, un consumo notable de energía. La falta de selectividad de la eliminación de agua puede producir pérdidas de aromas, más volátiles que el agua, sobre todo si se realiza al vacío. (Vanaclocha, 2003)

### **Actividad de agua**

La actividad de agua ( $a_w$ ) es la cuantificación de la cantidad de agua de un alimento, que está o no disponible para las interacciones de hidratación, el crecimiento microbiano y las reacciones químicas y enzimáticas (Dong Chen et al, 2008).

Esta “disponibilidad” varía de un producto a otro según su composición; algunas estructuras retienen más agua que otras, variando incluso para un mismo producto. Una fruta madura no se comporta de igual manera que una fruta verde (Vanaclocha, 2003)



Vanaclocha (2003) y Dong Chen et al (2008) definen la actividad de agua como una relación de presión de vapor del sistema más la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura. La forma de expresar esta “disponibilidad”, es decir el “grado de libertad” del agua de un producto, es la relación entre la presión parcial de agua en el alimento ( $p$ ) y la presión de vapor de agua pura ( $p_0$ ) a la misma temperatura.

Vanaclocha (2003) expresa esta relación mediante la ecuación 2.1, en la cual se define la actividad de agua en el producto y su relación con la humedad relativa de equilibrio (%HRE) del medio.

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{\%HRE}{100} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

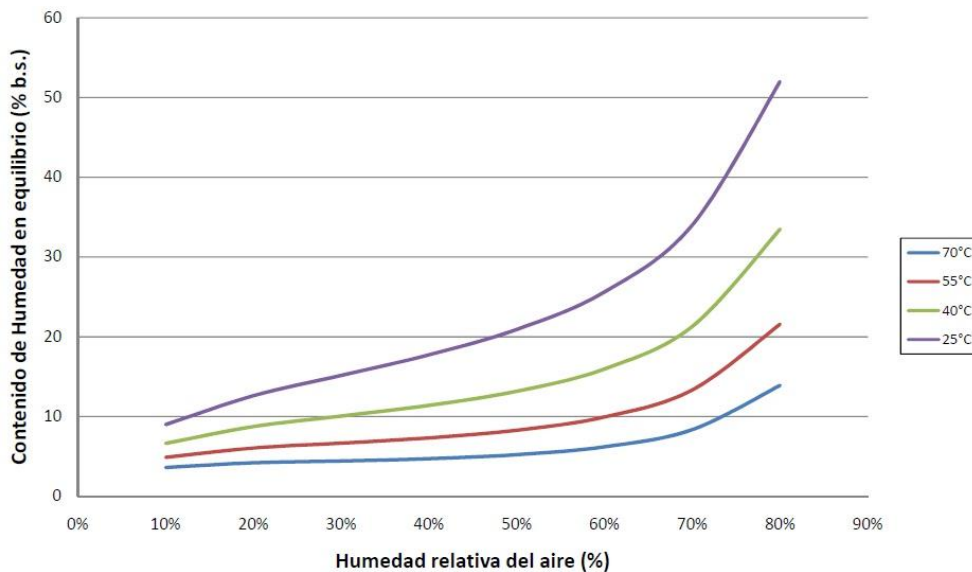
El máximo valor de  $a_w$  es 1,0. Cuando se disuelven otras sustancias en agua pura, el valor de la  $a_w$  disminuye, o cuando a un alimento se le retira parte del agua su  $a_w$  también disminuye. Si esta disminución es en un porcentaje elevado, el alimento adquiere un valor de  $a_w$  relativamente bajo y se le podrá denominar alimento de humedad intermedia, o IMF (Vanaclocha, 2003).

La actividad del agua  $a_w$  de los alimentos influye en la multiplicación y actividad metabólica de los microorganismos (MO), como también en su resistencia y supervivencia. En el intervalo (0.90 - 0.60) de los alimentos de humedad intermedia, algunas bacterias, levaduras y hongos pueden multiplicarse. La mayoría de estos MO causan daños y algunos producen toxinas. Una inhibición de los MO en los IMF no depende solamente del  $a_w$ , sino también son importantes el pH (acidez), el Eh (potencial oxireducción), la temperatura, los conservantes y la flora competitiva. (Camacho, 2004)

Todo producto alimenticio contiene simultáneamente varias formas de agua: agua libre, agua débilmente ligada y agua fuertemente ligada, estas últimas están retenidas a las moléculas de materia seca por fuerzas relativamente importantes (Camacho, 2004).

Durante el proceso de deshidratación, inicialmente se eliminan las moléculas de agua menos ligadas, la fracción que se extrae en último lugar corresponde a las moléculas de agua de estructura, fuertemente ligadas por uniones electrostáticas a macromoléculas orgánicas del extracto seco. El agua libre se comporta como el agua pura, requiere por lo tanto para evaporarse relativamente poca energía (del orden de  $2.400 \text{ kJ. kg}^{-1}$  de agua libre); por el contrario la evaporación del agua ligada es más difícil y requiere más energía. Por lo tanto, la cantidad de energía necesaria para evaporar la misma cantidad de agua aumenta durante el proceso de deshidratación el último gramo de agua evaporada necesita más energía que el primero. (Vanaclocha, 2003).

La grafica que relaciona el contenido de humedad y la actividad de agua se conoce como *isoterma de equilibrio*. En la Figura 2.2 se muestran las isotermas tipo para almidón de yuca obtenidas por Moreno (2008).



**Figura 2.2.** Isoterma de equilibrio de almidón de yuca. (Moreno, 2008)

A temperatura constante y bajo condiciones de equilibrio, existe una única relación entre el contenido de humedad y la actividad de agua (o la humedad relativa de equilibrio) de un alimento, dependiendo de que el equilibrio se alcance por adsorción o

por desorción. La actividad de agua  $a_w$ , disminuye al mismo tiempo que lo hace el contenido de agua ( $W$ ), la curva  $W=f(a_w)$  es generalmente sigmoideal, como resultado de varios mecanismos básicos de interacción del agua ligada. (Vanaclocha, 2003)

En muchos procesos o durante el almacenamiento de los alimentos, el equilibrio no se alcanza, y el concepto de actividad de agua debe usarse con cautela, debido a que solo es válido en condiciones de equilibrio. (Vanaclocha, 2003)

Aunque la actividad de agua describe el equilibrio en lugar de una propiedad cinética de un sistema o de un producto alimenticio, sin embargo, se utiliza para evaluar el alcance y el potencial de difusión de la humedad y el deshidratado. Este es uno de los parámetros de frontera clave en los modelos matemáticos que representan el comportamiento del deshidratado (Dong Chen et al, 2008).

### **MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE AGUA**

La eliminación del agua de los tejidos vegetales se puede conseguir por vía mecánica o por vía térmica.

#### **Eliminación del agua por vía mecánica:**

La eliminación de agua por vía mecánica solo permite la separación de una parte del agua libre de los productos tratados. Ningún procedimiento mecánico permite reducir la humedad de un producto más del 60%. Precisamente el hecho de que solo se elimine una fracción del agua no ligada, implica un menor consumo de energía en este tipo de procesos. Así mismo, con los procedimientos mecánicos no se elimina agua pura, sino que se trata de una dispersión o de una solución más o menos rica en extracto seco. (Vanaclocha, 2003)

### **Eliminación del agua por vía térmica:**

En este caso se trata esencialmente de una operación de transferencia de masa, que requiere una “activación” previa del agua por una cierta cantidad de energía aportada por una transferencia de calor. (Vanaclocha, 2003)

Dentro de las técnicas de eliminación de agua por vía seca se tienen los métodos por ebullición y por arrastre. En el caso del método de eliminación de agua por ebullición se debe llevar el producto hasta una temperatura suficiente para que la presión de vapor del agua del producto sea igual a la presión ambiente. En este caso el calor se aporta al producto por conducción a través de una superficie caliente, por convección a partir de vapor de agua recalentado o por el uso de radiaciones. El agua evaporada del producto rodea la superficie del mismo en forma de una atmósfera de vapor de agua pura. (Vanaclocha, 2003)

En el método de eliminación del agua por arrastre, la energía es aportada generalmente por aire caliente, cuya presión parcial de agua es inferior a la presión de vapor de agua en el producto.

Entre los procedimientos descritos el de eliminación del agua por ebullición es energéticamente menos costoso, pero los métodos de ebullición y arrastre, son los únicos que permiten una eliminación completa de agua sin alterar excesivamente la calidad del producto tratado, con una excepción, la liofilización, cuyo principio se asimila a un proceso por ebullición, el cual es el más costoso en energía y el que mejor preserva la integridad del producto. (Vanaclocha, 2003)

### **Descripción del proceso de secado o deshidratación**

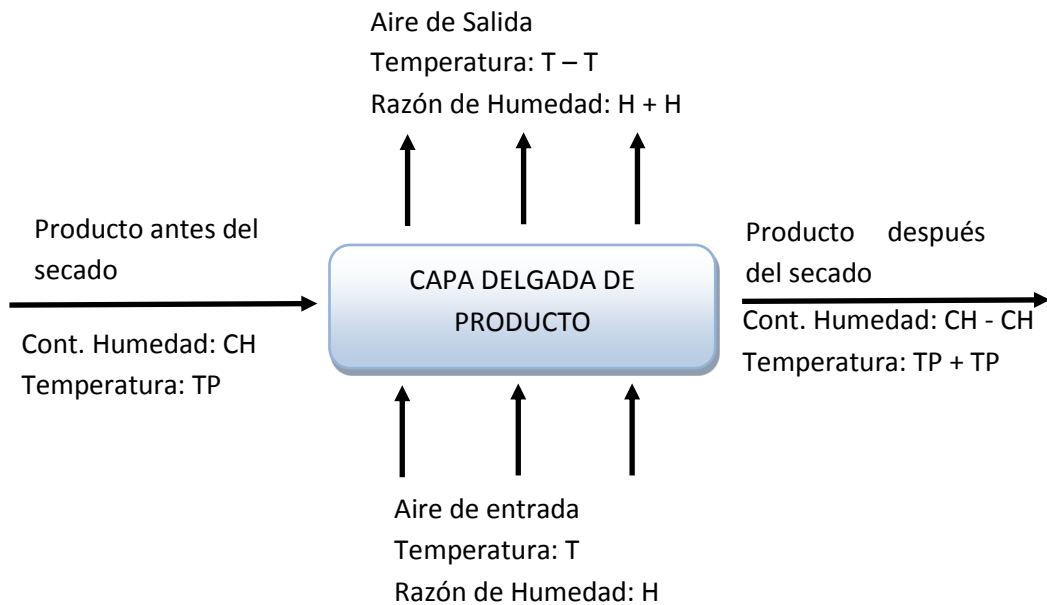
En el proceso de secado el agua del alimento es eliminada, en mayor o menor grado, y con ello se consigue una mayor conservación microbiológica, además de retardar muchas reacciones indeseables (Ibarz, 2005).

A pesar que los términos de secado y deshidratación se usan indistintamente, no debería ser así, ya que se considera que un alimento está deshidratado si no contiene más de 2,5% de agua, mientras que uno seco puede contener más de 2,5% de agua (Barbosa-Cánovas, 1996).

A excepción de la liofilización, secado osmótico y secado a vacío, la eliminación del agua del alimento se consigue de forma mayoritaria mediante una corriente de aire seco, que elimina el agua de la superficie del producto hacia el seno de la corriente de aire. El proceso de secado de alimentos no sólo rebaja su contenido en agua, sino que puede afectar otras características físicas y químicas de los mismos, como son destrucción de nutrientes, reacciones enzimáticas y no enzimáticas, entre otras (Ibarz, 2005)

En el proceso de secado es importante conocer los mecanismos involucrados en el movimiento del agua en el interior y exterior del alimento. Este movimiento puede ser debido a fuerzas capilares, difusión del agua por gradientes de concentración, difusión en la superficie, difusión del vapor de agua en los poros llenos de aire, flujo debido a gradientes de presión y a la vaporización y condensación del agua (Ibarz, 2005).

El esquema básico de deshidratación en capa delgada se muestra en la Figura 2.3. Durante cada intervalo de tiempo, el aire pasa a través de la capa delgada, el producto disminuye su contenido de humedad en  $\Delta CH$  y el aire aumenta su razón de humedad en  $\Delta H$  debido a la remoción de la humedad. Simultáneamente, la temperatura del producto aumenta en  $\Delta TP$  y la temperatura del aire disminuye en  $\Delta T$  como consecuencia del enfriamiento evaporativo y el calentamiento del producto. (Domínguez, 1983).



**Figura 2.3.** Esquema de deshidratación en capa delgada. (Domínguez, 1983).

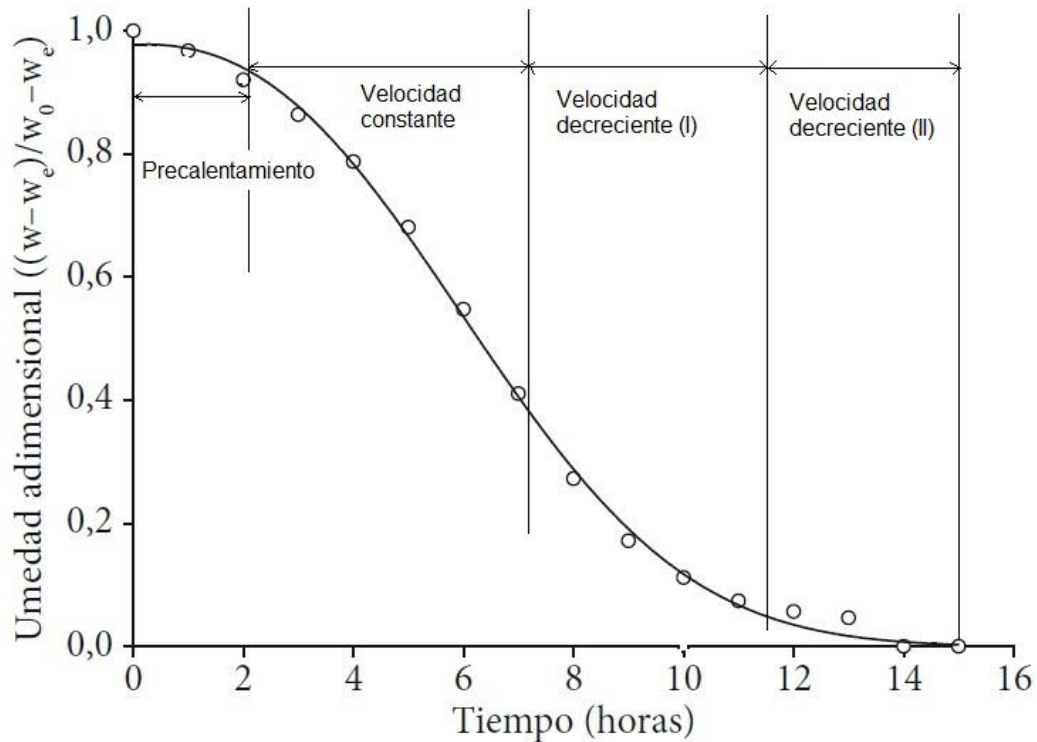
Los sistemas más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y el aire como vehículo de esta energía, por lo tanto la transferencia de calor dependerá, en este caso, de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión (Vanaclocha, 2003).

El proceso de secado está normalmente dividido en tres fases: una fase inicial de precalentamiento, seguido de otra de velocidad de secado constante y una o más fases de velocidad de secado decreciente. En la Figura 2.4 se muestra la curva de secado obtenida cuando se representa el contenido de humedad contra el tiempo de secado (Vanaclocha, 2003).

En la Figura 2.4 se pueden distinguir las siguientes etapas:

- I. **Etapla de pre-calentamiento:** esta etapa transcurre mientras el producto y el agua en él contenida se calientan ligeramente, hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo. El producto a secar al principio está frío, su presión de vapor es igualmente baja, por lo que la velocidad de transferencia de masa es muy lenta. El gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie fría del producto

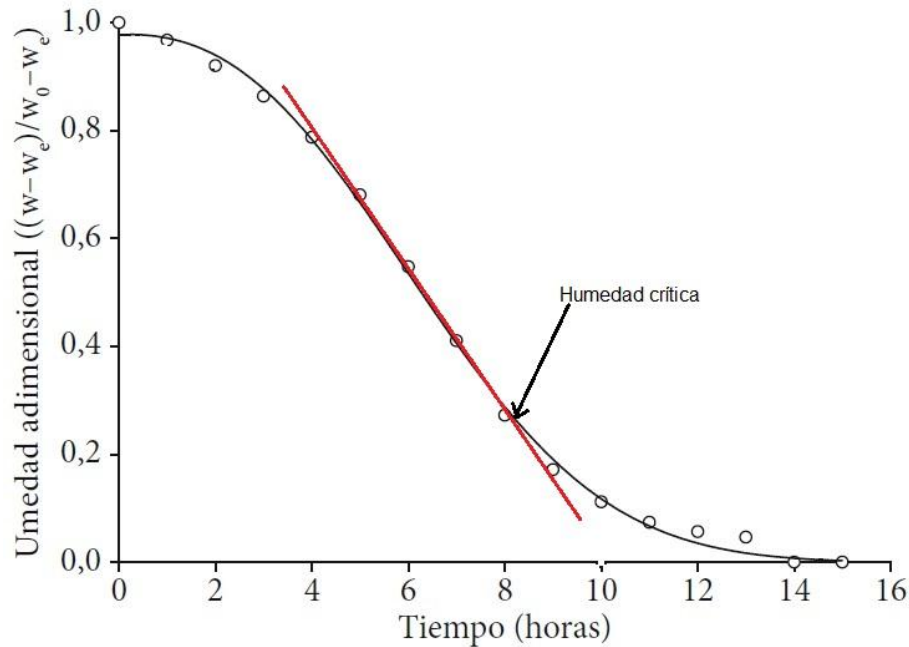
es elevada, por lo cual la transferencia de calor es alta. La cantidad de calor transferida a la superficie del producto es netamente superior a la cantidad de calor arrastrada por la poca agua evaporada; existe un desequilibrio. El excedente de calor se utiliza entonces en calentar la superficie del producto, lo cual produce una disminución del gradiente de temperatura, que cesará cuando se alcance el equilibrio estacionario. Este periodo es muy corto en comparación con el tiempo total de secado. (Vanaclocha, 2003)



**Figura 2.4.** Curva de secado a 50°C de pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas (Giraldo-Zuniga et al, 2010)

- II. **Etapa de velocidad constante:** en esta etapa de velocidad constante durante el cual se produce una reducción importante del contenido de agua, el agua de imbibición se elimina con un flujo másico constante. La evaporación se efectúa en la superficie del producto, a temperatura constante, siendo ésta la de bulbo húmedo del aire. Durante este periodo, el flujo de calor intercambiado entre el aire y el producto se utiliza enteramente para la evaporación del agua. Este periodo continúa mientras que la superficie del producto esté alimentada por

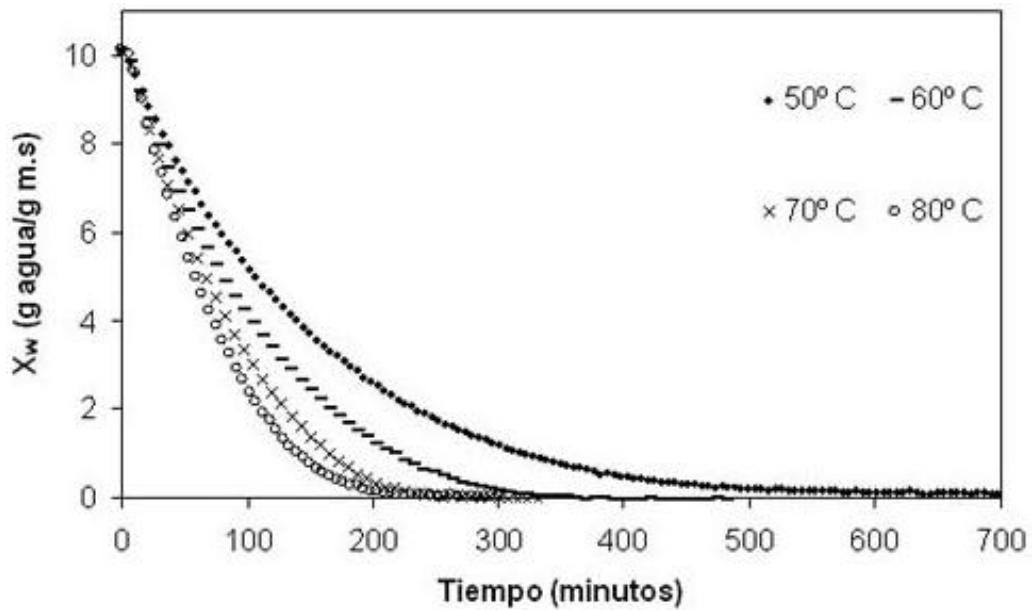
agua libre líquida desde el interior, fundamentalmente por capilaridad. En la mayoría de los casos esta etapa de velocidad de secado constante finalizará cuando el contenido medio de humedad del producto alcance el valor de la humedad crítica. Por lo tanto, en la curva de secado este periodo se deberá ajustar a una recta (la humedad crítica coincide con el punto en que la recta ajustada se separa de la curva de secado) (Figura 2.5).



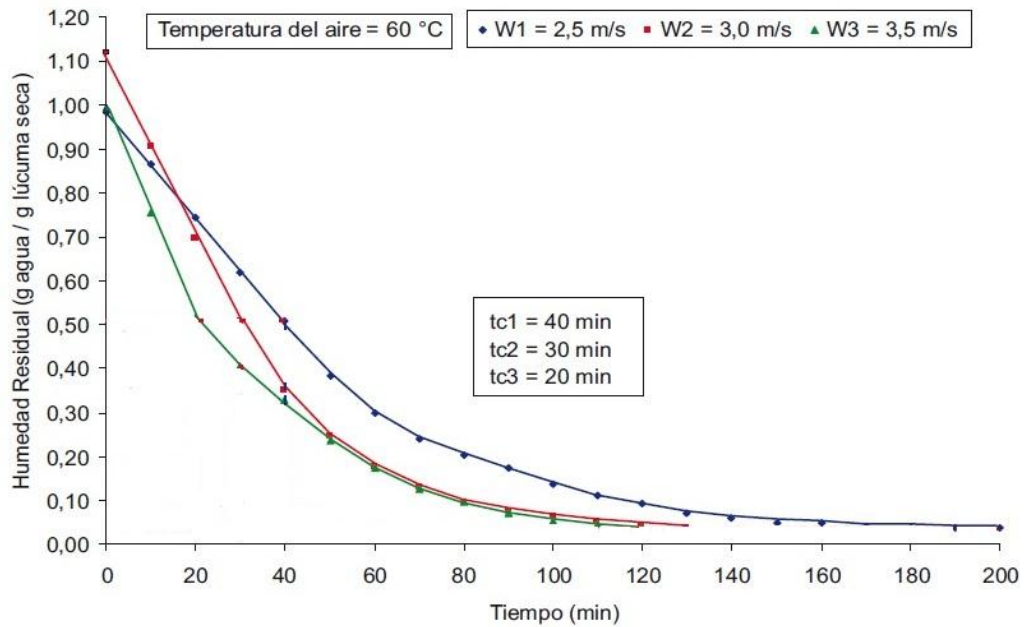
**Figura 2.5.** Etapa de velocidad de secado constante. Pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas a 50°C (Giraldo-Zuniga et al, 2010)

La humedad crítica no es una propiedad del alimento, sino que depende del tamaño de partícula y de las condiciones del aire de secado. En el periodo de velocidad constante, el principal mecanismo de transporte de masa es el flujo capilar de agua líquida, aunque puede existir alguna difusión de líquido. El mecanismo interno de flujo de la humedad no afecta a la velocidad de secado en este periodo, es el entorno secante, el aire, el que impone la velocidad de secado, que se incrementa al hacerlo la temperatura (Figura 2.6). Lo mismo ocurre con la velocidad del aire de secado, cuanto mayor es ésta mayor es la velocidad del secado (Figura 2.7). (Vanaclocha, 2003)





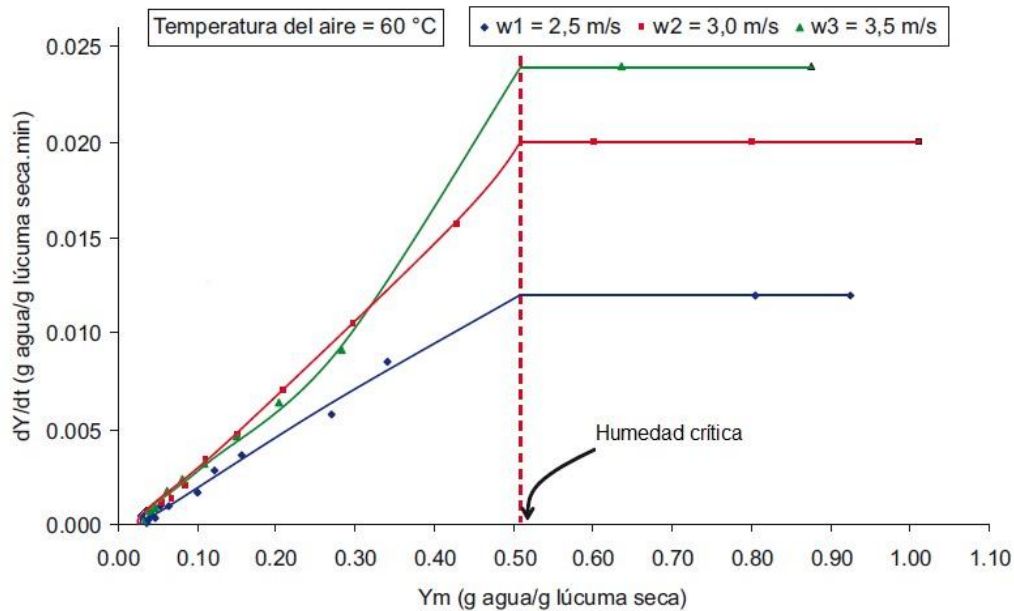
**Figura 2.6.** Influencia de la temperatura en la velocidad de secado. Curvas de secado de pimienta roja a diferentes temperaturas (Vega et al, 2005)



**Figura 2.7:** Influencia de la velocidad del aire en la velocidad de secado. Cinética del secado de Lúcumas (Barrera et al, 2009).

- III. **Etapa I de velocidad decreciente:** comienza cuando la superficie del producto en contacto con el aire de secado alcanza el umbral de higroscopicidad (para los materiales higroscópicos). Desde el punto de vista macroscópico, esto corresponde a alcanzar la humedad crítica. La zona de evaporación o “frente de secado” que se encontraba en la superficie, se desplaza hacia el interior del producto. La brusca reducción de la superficie efectiva de transferencia, debida a una alimentación insuficiente de agua libre, es la causa de la disminución de la velocidad de secado. La migración del agua del interior del producto hacia su superficie es cada vez más difícil y como consecuencia la transferencia de masa se convierte en el factor limitante. Los depósitos de solutos obstruyen los poros, el agua ligada migra bajo forma de vapor y la distancia a recorrer por el frente de vapor es cada vez mayor; todos estos factores frenan rápidamente la transferencia interna de agua. En el primer periodo de velocidad decreciente, el mecanismo de transporte de masa que predomina es la difusión de vapor, desde la zona de evaporación hasta la superficie del producto. (Vanaclocha, 2003).
- IV. **Etapa II de velocidad decreciente,** o periodo de velocidad final. Este periodo sólo existe para los materiales higroscópicos. El flujo másico se reduce más rápidamente que en el periodo anterior. En este periodo, el conjunto del producto está en el dominio de la higroscopía. En el alimento no queda más que agua ligada que se evacua muy lentamente (difusión-sorción). Esta fase se termina cuando el producto alcanza su humedad de equilibrio, que depende como es lógico, de las condiciones del aire de secado. (Vanaclocha, 2003).

Los periodos de velocidad decreciente se aprecian claramente si se representa la velocidad de secado ( $dx/dt$ : variación de la humedad con respecto del tiempo) contra la humedad por encima del equilibrio (Figura 2.8). En dicha gráfica puede verse el tramo horizontal correspondiente a la velocidad constante y los tramos de velocidad decreciente. La humedad crítica coincide con el punto de intersección de la recta de velocidad constante con la del primer tramo de velocidad decreciente.



**Figura 2.8.** Periodos de velocidad decreciente para pulpa de Lúcuma a 60°C y tres velocidades de aire (Barrera et al, 2009).

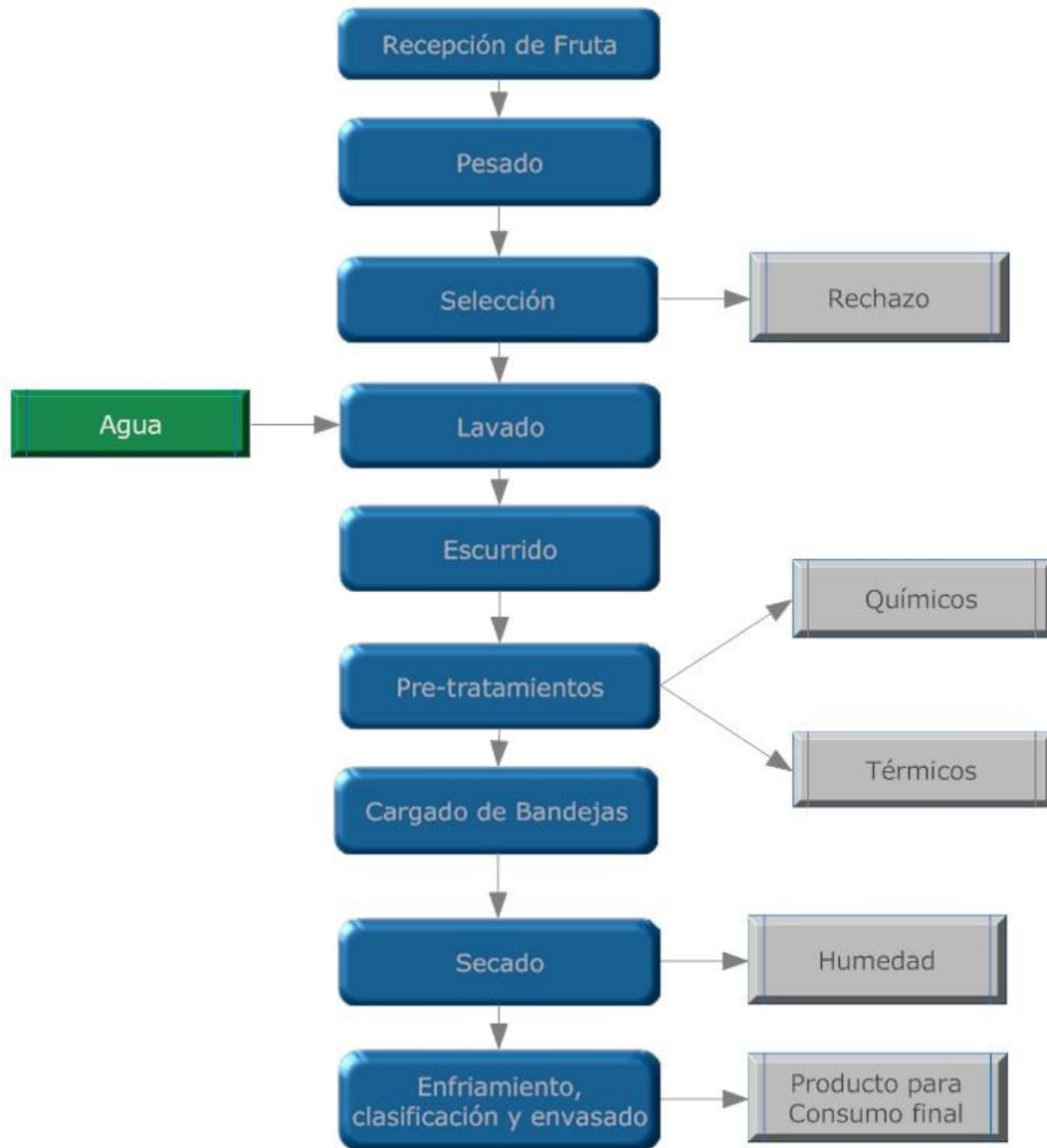
### 2.3.1. Línea de proceso para la deshidratación de frutas.

Para la obtención de frutas deshidratadas el proceso que se emplea se describe en la Figura 2.9.

La fruta se recibe en la planta de transformación y se realiza el pesado correspondiente, para luego seleccionar la que va a entrar al proceso. En esta parte del proceso se realizan los rechazos correspondientes. El siguiente paso en la línea de proceso es el lavado y la desinfección de la fruta con abundante agua y desinfectante, generalmente se utiliza hipoclorito a 80 ppm.

Si la piel es muy gruesa y poco permeable no permite una deshidratación rápida. En este caso se puede retirar la cáscara o aplicarle un tratamiento de permeabilización, que puede ser térmico o químico. Dentro del proceso térmico se tiene el escaldado con agua o con vapor. El tratamiento de permeabilización puede consistir en disolver la película de cera con una sustancia apropiada o someter la fruta a un tratamiento de

escaldado, es decir mediante la acción de calor durante un tiempo de 1 a 3 minutos. El escaldado disminuye la selectividad de las paredes de las células, con lo que se acelera la deshidratación. (Camacho, 2004).



**Figura 2.9.** Descripción del proceso de deshidratado. (Meyer, 2004)

Después de este proceso se cargan las bandejas para pasar al proceso de secado. Las condiciones en este proceso dependen del tipo de fruta, de la forma, entre otros factores.

La última parte de la línea de proceso es el enfriamiento, clasificado y envasado del producto para consumo final.

2.3.2. Clasificación de los sistemas de secado

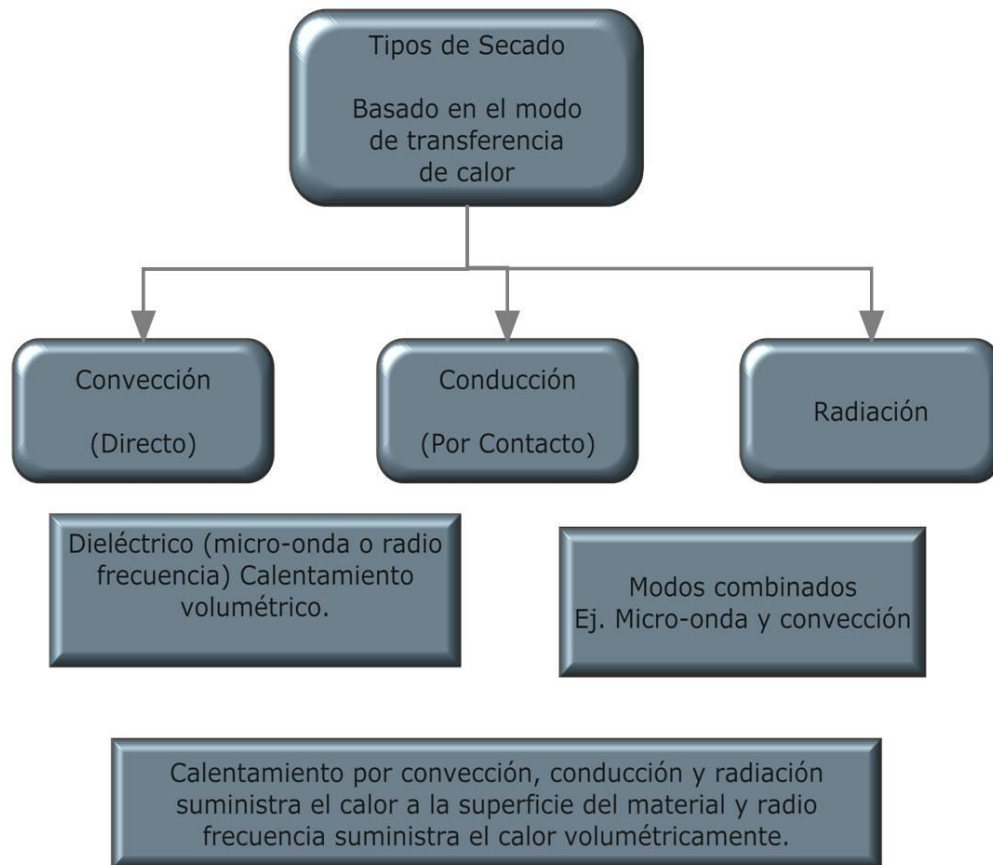
La clasificación de los sistemas de secado se encuentra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Clasificación de los sistemas de secado.

| CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN           | SISTEMAS DE SECADO  |
|--------------------------------------|---|
| Condiciones Externas                 | <b>Secado Natural:</b> El producto es expuesto a rayos solares y el aire que circula naturalmente es el agente de secado.   |
|                                      | <b>Secado Artificial:</b> Secado mecánico en el cual las condiciones de temperatura, velocidad y humedad del aire son controladas por el equipo.  |
| Modo de Aporte de Calor              | <b>Secado Directo:</b> Se produce por contacto directo entre el aire de secado y el producto. La transferencia de calor y masa se produce entre el aire y el sólido. Puede ser que los gases de combustión entren o no en contacto directo con el producto a secar; se debe utilizar un intercambiador de calor si la calidad del producto no permite que éste entre en contacto con los gases de combustión. |
|                                      | <b>Secado Indirecto:</b> No se utiliza agente de secado. La trasmisión de calor es por conducción y generalmente el equipo opera a vacío para la extracción de la humedad.  |
|                                      | <b>Secado Infrarrojo:</b> La humedad se evapora por transmisión de energía radiante. No es común en operaciones poscosecha.   |
|                                      | <b>Secado Dieléctrico:</b> La humedad se evapora por el calor desarrollado por corrientes internas producidas en un campo alterno de alta frecuencia. No es común en operaciones poscosecha.  |
| Movimiento de las Partículas Sólidas | <b>Estático:</b> No existe movimiento relativo entre las partículas sólidas que se están secando.   |
|                                      | <b>Dinámico:</b> Se presenta movimiento de los sólidos causado por agitación mecánica, o por la fuerza de gravedad.   |
|                                      | <b>Lecho Fluidizado:</b> Las fases sólida y gaseosa se mueven juntas mediante fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa.   |
| Modo de contacto gas-sólido          | <b>Flujo paralelo:</b> La dirección del flujo es paralela a la superficie del sólido.   |
|                                      | <b>Flujo transversal:</b> El aire penetra y atraviesa un lecho fijo de sólidos que generalmente son particulados.   |
|                                      | <b>Flujo en contracorriente:</b> El flujo de aire atraviesa el producto en dirección opuesta al flujo principal.  |
|                                      | <b>Lecho fluido:</b> Existe mayor contacto sólido-gas debido a la fluidización de las partículas sólidas suspendidas en el aire.  |

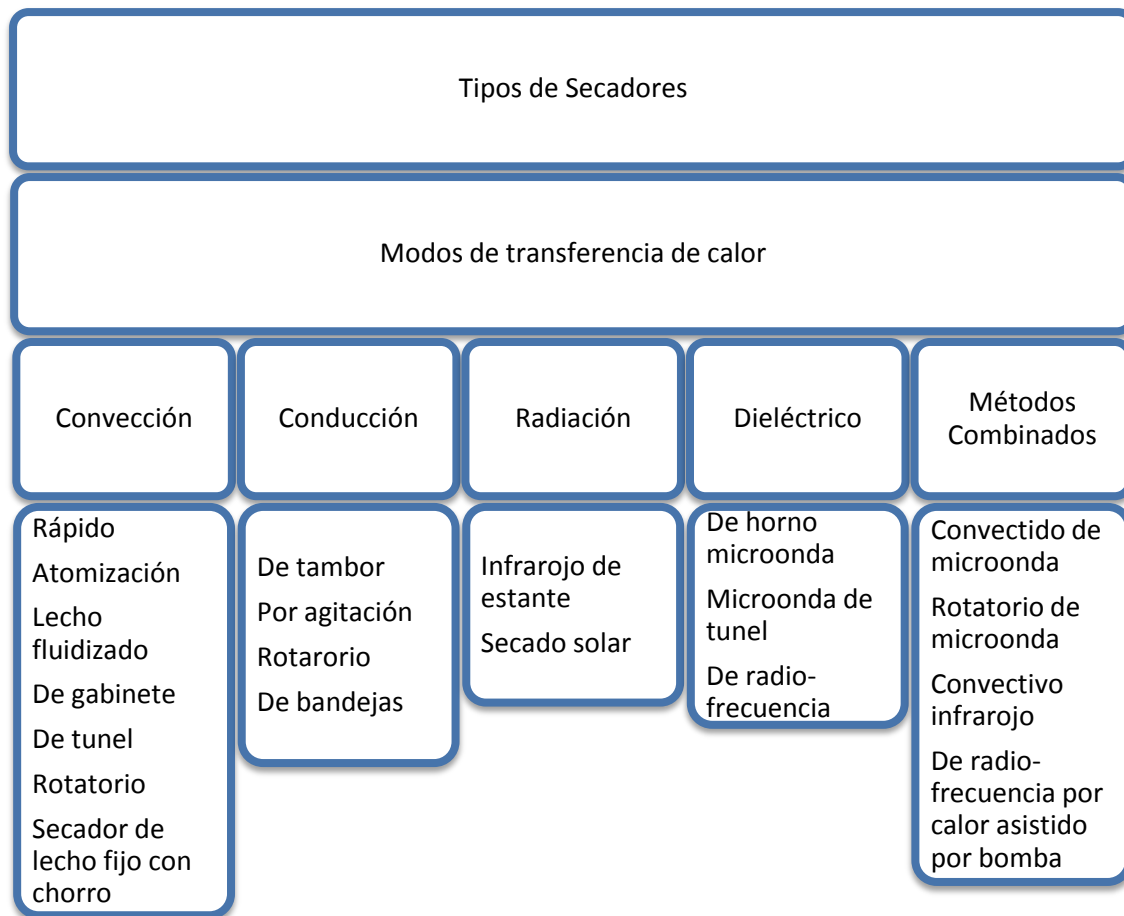
Fuentes: Varios autores citados por Moreno (2008)

Otra clasificación de los diferentes sistemas de secado se presenta en la figura 2.10 (Baker, 1997):



**Figura 2.10.** Clasificación de los sistemas de secado. (Baker, 1997)

En la Figura 2.11 se muestra la clasificación de los sistemas de secado dado por Araya-Farias et al (2009). Esta clasificación está dada por el modo de transferencia de calor.



**Figura 2.11.** Clasificación de los sistemas de secado por el modo de transferencia de calor. (Araya-Farias et al, 2009)

### 2.3.3. Variables físicas que influyen en el potencial de secado

El Potencial de secado es la capacidad que tiene el aire de evaporar el agua de la masa del sólido a secar. (Ospina, 2001). Este potencial es referido a la cantidad de humedad que se puede retirar del producto y también a la velocidad con la cual se retira esta humedad. La transferencia de masa entre el sólido y el aire que circula, estará determinada por la velocidad, temperatura y humedad del aire, el área de contacto, el espesor del sólido o su tamaño, entre otros factores. Las variables que influyen en la cinética de secado se pueden diferenciar entre variables externas, referentes al aire, e internas, referentes al sólido. (Moreno, 2008)

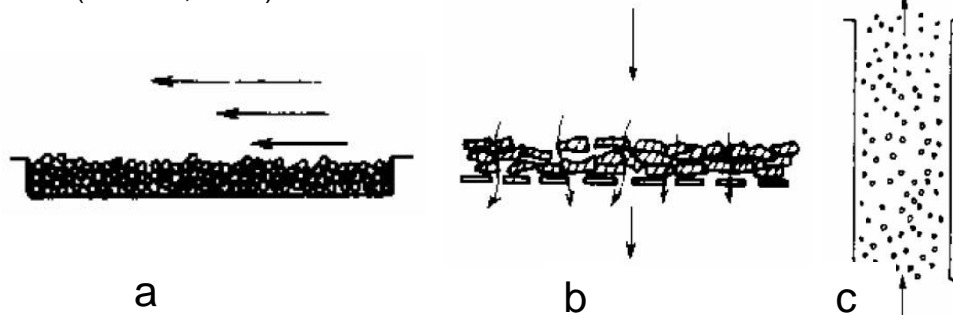
### 2.3.3.1. Variables externas

Estas variables no son propias del producto.

#### Flujo de aire:

Para el caso del secado directo de un material granular el aire puede circular en flujo paralelo, transversal o en lecho fluidizado, tal como se muestra en la figura 2.11. (Perry, 1994)

Tanto la transferencia de calor como la transferencia de masa, son incrementadas si el área de contacto entre el sólido y el gas es mayor. El secado en flujo paralelo presenta menor área de contacto y por consiguiente menor velocidad de secado, pero los consumos de potencia de ventilación son menores que en los otros dos sistemas. Por el contrario el flujo transversal o el fluidizado incrementan el área superficial y disminuyen el tiempo de secado, pero a costo de un mayor consumo de potencia de ventilación. (Moreno, 2008)



**Figura 2.12.** Tipos de Flujo de aire. (a) Flujo de aire paralelo al producto, (b) Flujo de aire perpendicular al producto (c) lecho fluidizado. (Perry, 1994)

#### Velocidad del aire ( $v$ ):

Es la velocidad lineal de aire en circulación sobre el sólido a secar. A mayor velocidad el tiempo de secado es menor, pero el consumo de potencia de ventilación aumenta. (Moreno, 2008)



### **Temperatura de bulbo seco (Tbs):**

Temperatura del aire que normalmente se determina por medio de la inmersión de un termómetro al aire. (Mujumdar, 2007)

### **Temperatura de bulbo húmedo (Tbh):**

Es la temperatura indicada por un termómetro cuyo bulbo es cubierto por una mecha húmeda. Esta temperatura es muy cercana a la temperatura de bulbo húmedo termodinámica, que es la temperatura alcanzada por el aire húmedo y el agua si el aire es saturado adiabáticamente por la evaporación del agua. (Brooker, 1992).

#### **2.3.3.2. Variables Internas**

Estas variables están asociadas al producto.

### **Contenido de humedad**

Es el contenido de humedad de un sólido o solución y se expresa como contenido de humedad en base húmeda (CHbh) o como contenido de humedad en base seca (CHbs). El contenido de humedad en base húmeda se describe en función del porcentaje en peso de humedad y se expresa como kg de humedad por kg de sólido húmedo, expresados en porcentaje. (Treybal, 1988)

El contenido de humedad en base seca (CHbs) se expresa como kg de humedad por kg de sólido seco expresado en porcentaje de humedad. (Treybal, 1988). La ecuación 2.2 expresa la relación que hay entre Contenido de humedad en base seca y contenido de humedad en base húmeda.

$$CHbs = \frac{CHbh}{100 - CHbh} * 100 \text{ (Ec. 2.2)}$$

### **Porosidad del sólido o del lecho:**

La porosidad extra granular, se refiere a la porosidad del lecho de partículas, es decir los espacios vacíos entre gránulos y depende del tamaño de partícula y su esfericidad. Las formas esféricas se acomodan mejor dentro del lecho disminuyendo la porosidad. Por esta razón puede suponerse una mayor porosidad del lecho teniendo cilindros y no esferas. La porosidad intra granular se refiere a cada partícula individual. (Carr, 1969).

### **Geometría del producto a deshidratar:**

La geometría del producto a deshidratar tiene gran importancia, ya que para un tamaño grande de partícula se tiene mayor dificultad de la difusión de la humedad dentro de la misma y por ende menor velocidad de secado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la geometría, el tamaño y la forma de la partícula define la esfericidad y por consiguiente la porosidad del material a secar. (Moreno, 2008)

## **2.4. SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN**

El secado o deshidratación es un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa. (Villamizar & Hernández, 1986). El calor es necesario para evaporar la humedad, la cual es removida de la superficie del producto por medio de un agente secador externo generalmente aire.

Los modelos de simulación datan de 1967 y los primeros trabajos fueron hechos en Estados Unidos e Inglaterra, teniendo en cuenta las ecuaciones básicas de transferencia de masa. (Villamizar & Hernández, 1986).

Este proceso es determinístico, razón por la cual se puede simular matemáticamente mediante el uso de modelos adecuados que permitan predecir el comportamiento de las variables físicas relacionadas en esta operación. La simulación matemática resulta ser una herramienta muy útil en el diseño de secadores, pues mediante ella es posible

definir las condiciones óptimas de operación de una forma sencilla y económica. El primer paso en la simulación del secado, es disponer o generar un modelo matemático que permita establecer los principales parámetros que intervienen en el secado. (Moreno, 2008)

Realizar una simulación matemática para un proceso de secado trae como ventajas disminuir costos y ganar tiempo cuando se trata de diseñar sistemas de secado, comparado con la realización experimental del proceso físico. (Valderrama, 1991)

### **2.4.1. Modelos Matemáticos**

Para el Modelamiento matemático del proceso de deshidratación existen diferentes modelos matemáticos, algunos de ellos son modelos empíricos y otros basados en ecuaciones teóricas de transferencia de calor y de masa. Estos modelos requieren métodos numéricos avanzados para su solución. Los modelos semi-empíricos se basan en ecuaciones teóricas del secado y mediante métodos experimentales se correlacionan los parámetros de las ecuaciones para diferentes productos a secar. (Moreno, 2008)

Son muchos los estudios que se han realizado sobre el modelamiento del secado de productos agrícolas (Moreno, 2008). Roa (1974) desarrolló un modelo para el secado natural de trozos de yuca, el cual se ajusta muy bien a los resultados experimentales estudiados por (Moreno, 2008), para el caso de pellets de almidón de yuca. El modelo de Thompson (1968) es un modelo semiempírico, que fue desarrollado originalmente para simular el secado de maíz desgranado (Parra-Coronado et al., 2008). Bakker-Arkema et al. (1974), generaron un modelo teórico de no equilibrio basado en ecuaciones de transferencia de calor y masa también para secado en capa delgada, conocido como modelo MSU (Michigan State University) (Parra-Coronado et al., 2008).

Para el proceso de deshidratación de uchuva no se encuentran trabajos en los cuales se determinen los parámetros requeridos para el proceso de simulación.

### 2.4.1.1. Modelo de Thompson

El modelo de Thompson (1968) es un modelo semiempírico, que fue desarrollado originalmente para simular el secado de maíz desgranado. En este modelo se considera la capa gruesa de granos, como constituida de capas delgadas de 2,5 cm. de espesor por capa, colocadas unas sobre otras. El enfoque básico para la simulación consiste en calcular el secado en una capa delgada de grano por medio de balances de calor y masa (modelo de equilibrio), y por medio de un proceso iterativo, aumentar varias capas delgadas para formar la capa gruesa de dimensiones iguales a las reales del secador. El secado de una capa delgada puede representarse por medio de ecuaciones (ecuación de secado en capa delgada), considerando los cambios de energía y humedad del grano y del aire. (Parra-Coronado et al., 2008)

El modelo predice el secado final de la capa de grano mediante el uso de la ecuación de secado en capa delgada, para lo cual se deben considerar las condiciones iniciales del aire y del grano. El balance de calor se completa al predecir las condiciones finales del aire y del grano. El modelo es flexible y permite integrar en él todas las variables y parámetros necesarios para expresar en ecuaciones el proceso de secado. El modelo completo es especialmente útil para el estudio de los diferentes sistemas de secado y para el diseño de equipos. (Parra, 2008)

### 2.4.1.2. Modelo MSU

El modelo MSU, desarrollado por Bakker-Arkema et al. (1974), es un modelo teórico de no-equilibrio que se basa estrictamente en las leyes de transferencia de calor y de masa. El modelo MSU tiene el mismo enfoque básico que el modelo de Thompson; calcula las condiciones del aire y del grano en cada incremento de tiempo y espesor de capa realizando cuatro balances:

- Balance para la entalpía del aire
- Balance para la humedad del aire

- Balance para la entalpía del grano
- Balance para la humedad del grano

Estos balances originan ecuaciones diferenciales parciales que se resuelven simultáneamente por integración numérica, usando diferencias finitas, a partir de condiciones iniciales y de frontera (Bakker-Arkema et al., 1974). Con éste modelo se puede simular el funcionamiento de secadores estacionarios, de flujo cruzado, de flujos concurrentes y en contracorriente. (Parra, 2008)

### **2.4.1.3. Modelo de Roa**

Roa (1974) desarrolló un modelo matemático semi-empírico para predecir el secado natural de trozos de yuca. El modelo permite evaluar el efecto de las variables que afectan el secado natural, mediante una ecuación que determina la variación del contenido de humedad del producto por unidad de tiempo. Esta ecuación llamada ecuación de secado, explicita la variación del contenido de humedad por unidad de tiempo, en función de variables como la temperatura, velocidad y humedad del aire, el contenido de humedad en equilibrio del producto, la densidad de carga y variables geométricas propias del producto a secar. Adicionalmente el modelo propone la obtención de las ecuaciones para la predicción del contenido de humedad en equilibrio. (Moreno, 2008).

### **2.4.1.4. Otros Modelos**

(Wang, 2007) reporta varios modelos matemáticos usados para generar las curvas de secado de productos agrícolas. Estos modelos están basados en la Ley de Fick los cuales se describen en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Modelos matemáticos de varios autores para la obtención de las curvas de secado.  
(Wang, 2007)

| No. | Nombre del Modelo        | Modelo  | Referencias               |
|-----|--------------------------|---|---------------------------|
| 1   | Lewis                    | $MR = \exp(-kt)$                              | (Bruce, 1985)             |
| 2   | Page                     | $MR = \exp(-kt^n)$                            | (Page, 1949)              |
| 3   | Page modificado          | $MR = \exp(-kt)^n$                            | (White, 1981)             |
| 4   | Henderson y Pabis        | $MR = a \exp(-kt)$                            | (Henderson, 1961)         |
| 5   | Logarítmico              | $MR = a \exp(-kt) + c$                        | (Togrul & Labuza, 2002)   |
| 6   | Modelo de dos términos   | $MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$        | (Henderson & Pabis, 1974) |
| 7   | Aproximación de difusión | $MR = a \exp(-kt) + (1-a)^* \exp(-k^* a^* t)$ | (Yaldiz, 2001)            |
| 8   | Wang y Shing             | $MR = 1 + at + bt^2$                          | (Wang & Singh, 1978)      |
| 9   | Difusión de Fick         | $MR = a \exp(-c(t / L^2))$                    | (Diamante & Munro, 1991)  |
| 10  | Page modificado II       | $MR = \exp(-c(t / L^2)^n)$                    | (Diamante & Munro, 1991)  |

En estos modelos, MR representa la relación de humedad adimensional, es decir,  $MR = (M - M_e) / (M_0 - M_{eq})$ , donde M es el contenido de humedad del producto en cada momento, M<sub>0</sub> es el contenido inicial de humedad el producto y M<sub>eq</sub> es el contenido de humedad de equilibrio. (Wang, 2007)

#### 2.4.2. Selección del Modelo

Para la simulación matemática del deshidratado de la uchuva el mejor modelo que se ajusta a los requerimientos es el modelo de Roa, por las siguientes razones:

- Primero. El modelo de Roa permite obtener el cambio de humedad por unidad de tiempo, lo cual es útil para simular el secado continuo de una sola capa de material (Moreno, 2008).
- Segundo. El modelo de Roa explicita la pérdida de humedad en función de las variables externas e internas que afectan el secado, como la velocidad, la temperatura y la humedad del aire, así como de la carga de material a secar, es decir, el espesor de capa a utilizar. Con estos parámetros se puede determinar las condiciones de operación adecuadas en el diseño de secadores (Moreno, 2008).
- Y tercero. El modelo de Roa demostró una adecuada predicción de las condiciones experimentales para el secado de pellets de almidón de yuca (Moreno, 2008) por lo cual se puede esperar comportamientos similares para esta fruta, variando únicamente las constantes de las ecuaciones.

El modelo de Roa utiliza cuatro ecuaciones para la simulación matemática del secado, las cuales se describen a continuación.

### **2.4.3. Parámetros para el Modelamiento matemático del secado**

Debido a que el modelo matemático seleccionado es el modelo semi-empírico de Roa, se requieren determinar los siguientes parámetros relacionados con el producto:

1. Ecuación de contenido de humedad en equilibrio.
2. Ecuación de calor específico.
3. Ecuación de velocidad de secado.
4. Ecuación del calor latente de vaporización del agua contenida en el producto.

#### **2.4.3.1. Ecuación de Contenido de Humedad en Equilibrio (CHEq)**

El Contenido de Humedad en Equilibrio (CHEq) se define como el Contenido de Humedad (CH) (en base húmeda o base seca) que alcanza el producto cuando se expone por un tiempo prolongado a unas condiciones específicas de temperatura y humedad relativa del aire. El CHEq es también llamado como equilibrio higroscópico.

(Ospina, 2001). También se define como el CH al cual la presión de vapor del agua ( $P_v$ ) contenida en el producto está en equilibrio con la  $P_v$  del ambiente circundante. (Brooker, 1992).

La importancia de conocer el CHEq son aplicaciones que tiene en el secado, almacenamiento, procesamiento y manejo de productos agrícolas. Durante el proceso de secado se puede calcular la variación del Contenido de Humedad a medida que avanza el proceso, así como conocer cuál puede ser el contenido de humedad final del producto si se deja secar hasta cuando entre en equilibrio con las condiciones del aire de secado.

Con base a las variaciones de las condiciones de temperatura y humedad del aire, en contacto con los productos almacenados, se puede simular cual puede ser la variación del contenido de humedad del producto. (Ospina, 2001).

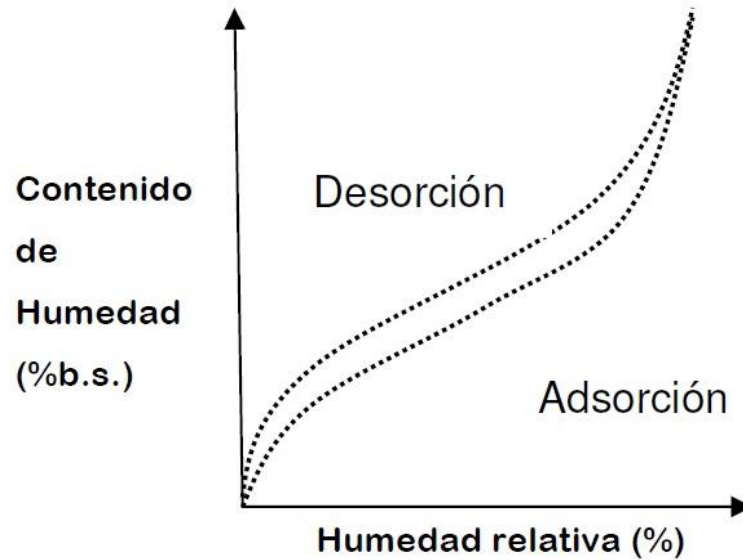
Los valores de humedad de equilibrio también son importantes para el cálculo del calor latente de vaporización (o entalpia) del agua de los productos biológicos, en los procesos de secado.

Los factores que influyen en el CHEq son (Ospina, 2001):

- Humedad relativa del aire.
- Temperatura del aire.
- Tipo de producto.
- Madurez fisiológica y la historia del producto.
- La manera en que se obtiene el equilibrio.

Al graficar el CHEq de un producto en función de la HR del aire para una misma temperatura, se obtienen unas curvas denominadas isotermas, las cuales, dependiendo como se alcance el equilibrio, pueden ser de absorción o desorción, las cuales son diferentes a causa de un fenómeno conocido como histéresis. (Ospina, 2001). En la Figura 2.12 se puede observar una curva isoterma típica.





**Figura 2.13.** Isotermas de adsorción y desorción. Representación del fenómeno de histéresis. (Ospina, 2001).

Dada la importancia que tienen los datos de contenido de humedad de equilibrio, se han obtenido ecuaciones o modelos empíricos en función de la temperatura y la humedad relativa del aire que está en contacto con el producto.

La ecuación de Henderson – Thompson (ecuación 2.3) se desarrolló a partir de la ecuación de Henderson, la cual está basada en la Ley de Gibbs. (Ospina, 2001)

$$Meq = \left[ \frac{\ln(1 - HR)}{-a_1(T + a_2)T} \right]^{1/a_3} \quad \text{(Ec. 2.3).}$$

Donde:

- HR: Humedad Relativa del aire (decimal).
- Temperatura (°C).
- Meq: Contenido de Humedad de Equilibrio (b.s.)
- $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ : Constantes del producto.

En la Tabla 2-4 se muestran las constantes de la ecuación de Henderson – Thompson para diversos productos agrícolas.

**Tabla 2.4.** Parámetros de la Ecuación de Humedad de Equilibrio de Herderson – Thompson para diferentes productos Tropicales. Fuente: ASAE. Yearbook 1996. Otros Investigadores. (Citado por Ospina, 2001) y (Rahman, 2009).

| Producto                      | a1         | a2         | a3     | Autor        |
|-------------------------------|------------|------------|--------|--------------|
| Arroz                         | 0,0000192  | 51,161     | 2,4451 | Ospina, 2001 |
| Café                          | -0,0000023 | -29695,700 | 2,0543 | Ospina, 2001 |
| Cebada                        | 0,0000229  | 195,267    | 2,0123 | Ospina, 2001 |
| Fríjol                        | 0,0000208  | 254,230    | 1,8812 | Ospina, 2001 |
| Maíz                          | 0,0000865  | 49,810     | 1,8634 | Ospina, 2001 |
| Maní                          | 0,0006504  | 50,561     | 1,4984 | Ospina, 2001 |
| Nueces                        | 1,7678400  | 30,808     | 2,0699 | Ospina, 2001 |
| Sorgo                         | 0,0000085  | 113,725    | 2,4757 | Ospina, 2001 |
| Soya                          | 0,0003052  | 134,136    | 1,2110 | Ospina, 2001 |
| Trigo                         | 0,0002773  | 70,318     | 2,2110 | Ospina, 2001 |
| Yuca (trozos)                 | 0,2891800  | 64,355     | 1,7267 | Ospina, 2001 |
| Caupí o frijol castilla       | 0,0000569  | 72,1       | 2,06   | Rahman, 2009 |
| Maíz tierno                   | 0,0000644  | 22,150     | 2,0855 | Rahman, 2009 |
| Avena                         | 0,0000855  | 37,811     | 2,0087 | Rahman, 2009 |
| Harina de semilla de calabaza | 0,0000128  | 2,0713     | 2,433  | Rahman, 2009 |
| Arroz integral                | 0,0000323  | 34,267     | 2,2482 | Rahman, 2009 |
| Fríjol alado                  | 0,000164   | 0          | 1,277  | Rahman, 2009 |

Roa (1974) desarrolló una ecuación empírica con nueve parámetros, los cuales pueden visualizarse en la Tabla 2.5. Estos parámetros fueron obtenidos mediante regresión no lineal. Esta ecuación relaciona la temperatura, la humedad relativa del aire y la humedad de equilibrio del producto y se expresa mediante la ecuación 2.4. (Roa-Coronado et al., 1974).

$$Meq = (p_1HR + p_2HR^2 + p_3HR^3) \exp((q_0 + q_1HR + q_2HR^2 + q_3HR^3 + q_4HR^4) + (T + q_5))$$

(Ec. 2.4).

En donde:

- HR: Humedad Relativa del aire (decimal).
- T: Temperatura del aire (°C).

## MARCO TEÓRICO

---

- Meq: Contenido de Humedad de Equilibrio (decimal b.s.)
- $p_1, p_2, p_3, q_1, q_2, q_3, q_4$  y  $q_5$ : Constantes para cada producto.

**Tabla 2.5.** Parámetros de la Ecuación de ROA para el Contenido de Humedad de equilibrio de Diferentes Productos. Fuente (Roa y Rossi 1980; Citado por Ospina, 2001), (Moreno, 2008)

| Producto        | p1       | p2      | p3      | q0      | q1      | q2       | q3       | q4      | q5     |
|-----------------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|--------|
| Ajonjolí        | 1,08165  | -2,6337 | 1,9220  | -0,0312 | 0,06493 | -0,1524  | 0,30414  | -0,2140 | 34,508 |
| Arroz           | 1,31680  | -2,3363 | 1,72367 | -0,0038 | -0,0183 | 0,00339  | -0,03157 | 0,0096  | 97,4   |
| Café            | 61,0108  | -108,37 | 74,4611 | 0,000   | -0,0370 | 0,07011  | -0,35177 | 0,00    | 0,00   |
| Fríjol          | 0,89290  | 0,63649 | -1,0925 | 0,000   | -0,0221 | 0,03943  | -0,03566 | 0,0179  | 273,0  |
| Maíz            | 0,469448 | -0,7001 | 0,45231 | -0,0073 | -0,0443 | 0,1398   | -0,15927 | 0,0634  | -26,2  |
| Sorgo           | 1,0461   | -1,8456 | 1,0982  | -0,0024 | -0,0168 | 0,05307  | -0,05512 | 0,0193  | 143,73 |
| Soya            | 3,6261   | -6,2798 | 3,1612  | -0,0053 | -0,0156 | 0,031778 | -0,01118 | 0,00    | 273,0  |
| Trigo           | 2,4865   | -5,0274 | 2,9687  | -0,0068 | -0,0312 | 0,086015 | -0,05878 | 0,0060  | 125,08 |
| Yuca            | 0,44490  | -0,2453 | 0,07280 | -0,0042 | -0,0176 | 0,0355   | -0,06890 | 0,0625  | 9,9    |
| Almidón de yuca | 727,44   | 559,9   | 475,64  | -0,0143 | -0,0716 | 0,0132   | 0,0157   | 0,0931  | 81,64  |

### Determinación del Contenido de Humedad de Equilibrio:

Para determinar el Contenido de Humedad de Equilibrio existen dos métodos: El método estático y el método dinámico.

#### 1. Método Estático:

En este método el producto alcanza la humedad de equilibrio sin movimiento de aire. Se mantiene la presión de vapor del aire constante utilizando sales o soluciones diluidas de ácidos dentro de recipientes herméticos donde se coloca una muestra de producto y cámaras de control de temperatura, de tal forma que la presión de vapor del agua contenida en el producto iguala la presión de vapor del aire sin la ayuda de agitación mecánica. La dificultad de este método, es la duración para alcanzar el equilibrio, que puede ser de una semana o algunos meses, donde el producto puede infestarse de hongos o microorganismos, especialmente cuando el ambiente proporciona humedades relativas mayores a 80% (Chaparro, 2003)

2. Método Dinámico:

En este método se hace pasar una corriente de aire con humedad relativa y temperatura controladas a través de la muestra del producto, utilizando medios mecánicos que permitan pulverizar gotas de agua o vaporizarlas, así como calentarlas o enfriarlas. (Ospina, 2001).

2.4.3.2. Ecuación de Calor Específico

El calor específico se define como la capacidad calorífica del cuerpo por unidad de masa del mismo. (Villamizar & Hernández, 1986). También se define como la cantidad de calor, expresada en kilocalorías necesarias para aumentar la temperatura de un kilogramo de producto en un grado centígrado ( $Kcal\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ). (Valderrama, 1991). El calor específico depende de la composición del producto y de la temperatura a la cual se encuentre (Mohsenin, 1980).

Para predecir el calor específico de productos agrícolas existen varios modelos matemáticos. Moreno (2008) presenta algunas ecuaciones de utilidad para predecirlo, así como valores reportados para almidón (Tabla 2.6)

Tabla 2.6. Referencias para el cálculo del calor específico del almidón. (Moreno, 2008).

| Ecuación   | Variables  | Referencia       |
|--|--|------------------|
| $C_p = 0,2 + 0,0008 M (BTU\ lb^{-1}\ ^\circ F^{-1})$                                 | M= Humedad del producto %  | Siebel, 1892     |
| $C_p = 0,4 + 0,006 M (BTU\ lb^{-1}\ ^\circ F^{-1})$                                  | M= Humedad del producto %  | Dickerson, 1969  |
| $C_p = 0,34X_c + 0,37X_p + 0,4X_f + 0,2X_a + 1,0X_m M (BTU\ lb^{-1}\ ^\circ F^{-1})$ | Xf=Fracción de grasas<br>Xp=Fracción de proteínas<br>Xc=Fracción de carbohidratos<br>Xa=Fracción de cenizas<br>Xm=Fracción de agua | Cahrm, 1971      |
| $C_p = 0,453 - 2,89E - 3T + 0,4144M (J\ kg^{-1}\ K^{-1})$ Para almidón de maíz.      | T= Temperatura ( $^\circ C$ )<br>M= Humedad  | Irudayaraj, 1999 |
| $C_p = 0,32(cal\ g^{-1}\ ^\circ C^{-1})$ Para almidón de maíz                        |  | Husker, 2004     |

## MARCO TEÓRICO

Algunos autores reportan el Calor Específico para diferentes productos agrícolas en función del contenido de humedad del producto (Tabla 2.7).

**Tabla 2.7.** Calores Específicos para algunos productos agrícolas. Varios autores mostrados en la Tabla.

| Producto                   | Ecuación <sup>1</sup>                                   | Fuente   |
|----------------------------|---|--|
| Maíz                       | $C_p = 0,35 + 0,00851M \text{ b.s.}$                    | Acogranos  |
| Trigo                      | $C_p = 0,0283 + 0,007241M \text{ b.s.}$                 | Acogranos  |
| Yuca                       | $C_p = (0,4 + 0,006M \text{ b.s.})(1 + M \text{ b.h.})$ | Acogranos  |
| Pellets de Almidón de yuca | $C_p = 0,014M + 0,005T + 0,965$                         | (Moreno, 2008)                                       |
| Café pergamino             | $C_p = 1,3556 + 5,7859M \text{ b.s.}$                   | (Parra-Coronado et al., 2008))                       |
| Arroz sin pulir            | $C_p = 0,265 + 0,107M \text{ b.s.}$                     | (Villamizar & Hernández, 1986)                       |
| Avena                      | $C_p = 0,305 + 0,0078M \text{ b.s.}$                    | (Villamizar & Hernández, 1986)                       |
| Manzana Golden             | $C_p = 3360 + 7,5T$                                     | (Ramaswamy y Tung, 1981)<br>(Citado por Rahman 2009) |
| Habichuela                 | $C_p = 1430 + 27,57M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |
| Remolacha                  | $C_p = 1401 + 27,86M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |
| Col                        | $C_p = 1402 + 27,85M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |
| Zanahoria                  | $C_p = 1373 + 28,14M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |
| Apio                       | $C_p = 1401 + 27,86M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |
| Pepino                     | $C_p = 1385 + 28,02M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |
| Lechuga                    | $C_p = 1342 + 28,45M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |
| Cebolla de bulbo           | $C_p = 1396 + 27,91M (\%b.h.)$                          | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)          |

<sup>1</sup> M b.s.: Humedad en base seca (decimal), M b.h.: Humedad en base húmeda (b.h. %), Cp: Calor específico ( $\text{KJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

## MARCO TEÓRICO

---

|                 |                               |   |
|-----------------|-------------------------------|---|
| <b>Perejil</b>  | $C_p = 1373 + 28,14M$ (%b.h.) | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)         |
| <b>Arveja</b>   | $C_p = 1430 + 27,57M$ (%b.h.) | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)         |
| <b>Papa</b>     | $C_p = 1381 + 28,06M$ (%b.h.) | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)         |
| <b>Calabaza</b> | $C_p = 1385 + 28,02M$ (%b.h.) | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)         |
| <b>Espinaca</b> | $C_p = 1342 + 28,45M$ (%b.h.) | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)         |
| <b>Nabo</b>     | $C_p = 1388 + 27,99M$ (%b.h.) | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)         |
| <b>Sandía</b>   | $C_p = 1385 + 28,02M$ (%b.h.) | (Niesteruk, 1996) (Citado por Rahman, 2009)         |
| <b>Centeno</b>  | $C_p = 1242 + 52M$ (%b.h.)    | (Otten y Samaan, 1980)<br>(Citado por Rahman, 2009) |

---

Para uchuva no se reporta ningún dato de ecuación de calor específico.

### Métodos para el Cálculo del Calor Específico:

Para el cálculo del calor específico existen varios métodos. A continuación se describen los principales.

1. **Método de las mezclas:** Este método consiste en colocar la muestra, cuya temperatura y masa sean ya conocidas, dentro de un calorímetro, el cual contiene agua cuyo calor específico ya ha sido determinado, al igual que su temperatura y su peso. El calor específico desconocido es calculado de la ecuación de balance de calor, entre el calor ganado o perdido por el conjunto agua – calorímetro, y el calor ganado o perdido por la muestra. (Villamizar & Hernández, 1986).
2. **Método de la placa aislada:** Consiste en introducir en una cámara aislada la muestra en estudio y calentarla eléctricamente por un tiempo determinado. Se determina el incremento en la temperatura del sólido y el calor ganado por la muestra se mide con el voltaje y la corriente empleados. (Moreno, 2008).

3. **Método del calorímetro de comparación:** en una cámara se tienen dos calorímetros aislados por agua, uno de ellos contiene la muestra que se ensaya y el otro líquido de calor específico conocido. El calorímetro de comparación tiene una curva calibrada con el líquido de referencia y según la pérdida de calor, se puede calcular el calor específico de la muestra ensayada. (Villamizar, 1986).
4. **Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC):** La DSC (Differential Scanning Calorimetry) es una técnica para medir la energía necesaria para estabilizar una diferencia de temperatura cercana a cero entre una sustancia y un material inerte de referencia, cuando ambos materiales son sometidos a idénticos regímenes de temperatura en un ambiente de calentamiento o enfriamiento controlado. (Moreno, 2008)

### 2.4.3.3. Ecuación de velocidad de secado

La ecuación de velocidad de secado expresa el cambio en la humedad del producto por unidad de tiempo en función de las variables físicas que influyen en ésta de acuerdo con el sistema de secado que se utilice (Moreno, 2008). Si se tienen secadores tipo silo, se utiliza la ecuación de secado en capa delgada para simular la pérdida de humedad en una capa de espesor conocido. Por el contrario, si el sistema de secado no utiliza espesores grandes del lecho, se puede utilizar una ecuación de velocidad de secado como la propuesta por Roa (1974).

Roa (1974) propuso una ecuación empírica basado en las ecuaciones teóricas del secado, con la cual se pueden correlacionar de una manera simple las principales variables para el proceso de secado. Esta ecuación (ecuación 2.5) tiene especial aplicación en el caso del secado en donde no se usan capas gruesas de sólido.

$$\frac{dM}{dt} = (M - Meq)(a_0 + a_1v + a_2PVS(1 - HR) * M + a_3PVS(1 - HR))(a_4 + a_5C)(a_6 + a_7P + a_8S)$$

**Ec. (2.5)**

En donde:

- M: Contenido de humedad del sólido en un instante determinado (%b.s.)
- Meq: Contenido de humedad de equilibrio (b.s.)
- HR: Humedad relativa del aire.
- T: Temperatura del aire (°C).
- PVS: Presión de Vapor de Saturación (Pa).
- v: Velocidad de aire ( $\text{m s}^{-1}$ ).
- C: Carga del sólido ( $\text{kg m}^2$ ).
- P: Fracción de vacíos o porosidad (decimal).
- S: Variable geométrica del sólido.  $S = 1/L^2 + 1/W_1^2 + 1/W_2^2$
- L,  $W_1$ ,  $W_2$ : Dimensiones del sólido (m)
- $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ : Constantes del producto adimensionales.

El término  $PVS^*(1-RH)$  se conoce como Déficit de presión de vapor y representa la diferencia entre la presión de vapor de saturación del aire que circunda el sólido y la presión de vapor del agua contenida en el sólido. La ecuación de Antoine (ecuación 2.7) es una correlación bastante utilizada para obtener la presión de saturación PSV (Moreno, 2008)

$$\ln PVS = A - \frac{B}{T + C} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

En donde A, B y C son contantes para cada sustancia. Para el aire la ecuación de Antoine se puede expresar mediante la ecuación 2.7

$$PVS = \exp\left(16,5694 - \frac{3989,9}{T + 233,66}\right) \quad (\text{Ec.2.7})$$

Donde:

- PVS: Presión de Vapor de Saturación del agua (Pa).
- T: Temperatura del aire (°C).



### 2.4.3.4. Ecuación de Calor Latente de Vaporización ( $h_{fg}$ )

El Calor Latente de Vaporización se define como la energía requerida para evaporar la humedad contenida en el producto (Brooker, 1992). Para determinarlo se requieren las curvas de contenido de humedad en equilibrio.

La ecuación de Clausius–Clapeyron relaciona una ecuación para determinar el Calor Latente de Vaporización en función de la temperatura y el contenido de humedad (Ecuación 2.8) (Baker, 1997):

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_w}{T(V_w - V_L)} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Othmer (1940), propuso un método simple y aproximado, basado en la ecuación de Clausius–Clapeyron, obteniendo la ecuación 2.9 (Valderrama, 1991):

$$\frac{dP_v}{dT_a} = \frac{L}{T(V - v)} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

- V: Volumen específico del vapor de agua,  $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
- v: Volumen específico del agua,  $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
- T: Temperatura, K.
- Pv: Presión de vapor,  $\text{kg m}^{-2}$

Solucionando la ecuación 2.9 se tiene:

$$\ln P_v = \frac{h_{fg'}}{h_{fg}} \ln P_{vs} + C \quad (\text{Ec. 2.10})$$

En donde:

- Pv: Presión de vapor de agua del producto,  $\text{kg m}^{-2}$
- Pvs: Presión de vapor de saturación,  $\text{kg m}^{-2}$
- $h_{fg}'$ : Calor latente de vaporización del agua en el producto ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
- $h_{fg}$ : Calor latente de vaporización del agua libre ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
- C: Constante de integración.

Es posible obtener la misma ecuación para el calor latente de vaporización del agua pura ( $h_{fg}$ ) y al dividir las dos ecuaciones se obtiene la Ecuación 2.11:

$$\frac{h_{fg'}}{h_{fg}} = \frac{\text{Log}(P_{v_1}) - \text{Log}(P_{v_2})}{\text{Log}(P_{vs_1}) - \text{Log}(P_{vs_2})} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$P_v = HR * P_{vs} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$h_{fg} = 2500,3 - 2,09T \quad (\text{Ec. 2.13})$$

En donde:

- $P_v$ : Presión de vapor del agua ( $\text{kgf m}^{-2}$ ) (1 y 2 se refieren a las Temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ ).
- $P_{vs}$ : Presión de vapor de saturación ( $\text{kgf m}^{-2}$ )
- $h_{fg}'$ : Calor latente de vaporización del agua en el producto ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
- $h_{fg}$ : Calor latente de vaporización del agua libre ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
- $HR$ : Humedad relativa del aire (decimal)

A partir de las curvas de humedad de equilibrio es posible encontrar los valores de los calores latentes de vaporización del agua en el producto y del agua pura en función del contenido de humedad del producto a diferentes temperaturas. (Valderrama, 1991). En la ecuación 2.14 se expresa la relación de los calores latentes de vaporización:

$$\frac{h_{fg'}}{h_{fg}} = 1 + \alpha \exp(-\beta M) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

En donde:

- $M$ : Contenido de humedad del producto, b.s.
- $\alpha$  y  $\beta$ : Constantes propias del producto.

$\alpha$  y  $\beta$  son parámetros obtenidos por regresión para cada producto.

La ecuación 2.14 es la Ecuación de Thompson para el cálculo de calor latente de vaporización del agua pura.

En la tabla 2.8 se muestran ecuaciones de calor latente de vaporización del agua para diversos productos.

**Tabla 2.8.** Ecuaciones de calor latente de vaporización para algunos productos a partir de la expresión de Othmer. (Valderrama, 1991).

| Producto        | Ecuación  |
|-----------------|---|
| Arroz           | $h_{fg} = (606 - 0,57 T)(1 + 23 \exp(-40,0 M))$         |
| Café            | $h_{fg} = (597,6 - 0,57 T)(1 + 0,9036 \exp(-0,0632 M))$ |
| Cebada          | $h_{fg} = (597,6 - 0,57 T)(1 + 0,15 \exp(-0,095 M))$    |
| Fríjol          | $h_{fg} = (597,6 - 0,57 T)(1 + 0,3457 \exp(-0,0923 M))$ |
| Maíz            | $h_{fg} = (606 - 0,57 T)(1 + 43,3 \exp(-0,2825 M))$     |
| Sorgo           | $h_{fg} = (597,6 - 0,57 T)(1 + 12,1 \exp(-0,408 M))$    |
| Soya            | $h_{fg} = (587,34 - 0,567 T)(1 + 0,77 \exp(-0,165 M))$  |
| Yuca            | $h_{fg} = (597,6 - 0,57 T)(1 + 9,56 \exp(-0,359 M))$    |
| Almidón de Yuca | $h_{fg} = (2550,3 - 2,09 T)(1 + 1,678 \exp(-0,084 M))$  |

Fuente: Acogranos. Citado por (Valderrama, 1991), (Moreno, 2008)

Para uchuva no se encuentran reportes de la Ecuación del Calor Latente de Vaporización.

### 2.5. PRE-TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El objetivo que se persigue al realizar los pre-tratamientos es hacer la piel de la fruta permeable, para ello se realizaron dos pre-tratamientos térmicos y así evaluar y obtener los parámetros de deshidratación planteados.

### 2.5.1. Escaldado

Es un calentamiento de corta duración destinado a inactivar las enzimas propias de un alimento de forma que se detenga su actividad metabólica y cese la degradación del alimento. Entre las enzimas que producen estas degradaciones se encuentran la catalasa, lipooxigenasas y la peroxidasa. Los alimentos deshidratados sin escaldar experimentan cambios relativamente rápidos en las propiedades de calidad como color, sabor, textura y valor nutricional debido a la continua actividad de las enzimas (Sharma, 2003).

#### 2.5.1.1. Métodos de Escaldado

Los métodos comerciales de escaldado más comunes y de más amplio uso implican hacer pasar el alimento a través de una atmósfera de vapor saturado o un baño de agua caliente. El escaldado con vapor resulta en mayor retención de componentes nutricionales, siempre y cuando el enfriamiento se haga con aire frío o rocío de agua fría. El enfriamiento con agua corriente hacen que aumenten de manera considerable las pérdidas por lixiviados (arrastre de compuestos solubles), pero el alimento podría ganar peso y en consecuencia el rendimiento total podría aumentar, en tanto que el enfriamiento con aire podría causar pérdida de peso del producto debido a la evaporación. Esto podría anular cualquier ventaja ganada con la retención de nutrientes (Sharma, 2003).

Según (Sharma, 2003), durante el escaldado pueden tener lugar los siguientes fenómenos:

- Se compacta el producto, al colapsarse estructuras internas y eliminarse gases. Así el alimento no flota en el líquido de gobierno, lo que es muy conveniente en el caso de conservas.
- El número de microorganismos presentes se reduce a veces hasta en un 90%, especialmente los superficiales. Esto es de gran utilidad en el caso de frutos, en los que la carga microbiana se concentra en el exterior.

- Se inactivan enzimas y se desnaturalizan algunas proteínas

Por otra parte, el escaldado produce algunos cambios indeseables (Sharma, 2003):

- Pérdida de nutrientes por disolución, tales como sales minerales, vitaminas hidrosolubles y otros componentes solubles en agua.
- Cambios en la textura, fundamentalmente ablandamiento de los tejidos, así como cambios en la dureza, rigidez y cohesión
- Cambios en el sabor y color. En general son indeseables, aunque en ocasiones el escaldado resalta el color de los mismos por la acción del aire sobre su superficie.

### 2.5.1.2. Temperatura del medio calefactor.

El escaldado suele realizarse en el intervalo de 60°C a 100°C. Por ejemplo, son típicos procesos a temperaturas de 80°C durante unos minutos o a 100°C durante unos segundos. (Sharma, 2003).

La correcta temperatura a la que se va a realizar el escaldado depende del alimento que se esté escaldando (forma, tamaño y propiedades térmicas), de dónde esté situada la enzima a desactivar y de su cinética de desactivación así como de la susceptibilidad del alimento a sufrir transformaciones de color y textura a causa del calor. (Sharma, 2003).

Así tratamientos cortos a alta temperatura son adecuados para desactivar enzimas que se encuentran en la superficie, mientras que las que se encuentran por todo el alimento responden mejor a tratamientos más prolongados a baja temperatura, que alteran menos las propiedades del alimento. (Sharma, 2003).

En general, es difícil aconsejar una temperatura determinada. La determinación requiere la realización de pruebas empíricas y la evaluación del producto escaldado por un panel de catadores. (Sharma, 2003).

Para el caso de la uchuva la temperatura de escaldado recomendada por Camacho (2004) es de 80°C por 2 minutos.

### **2.5.2. Osmodeshidratado**

La OSMOSIS es el fenómeno de difusión de líquidos o gases, a través de una sustancia permeable para alguno de ellos.

La difusión es el acto por el cual dos cuerpos en contacto se van mezclando lentamente por sí mismos (Camacho, 2004).

Si un compartimento de agua pura se separa de una disolución acuosa por medio de una membrana rígida permeable al agua, pero impermeable a los solutos, habrá un paso espontáneo de agua desde el compartimento que contiene agua pura hacia el que contiene la disolución (Camacho, 2004).

La transferencia de agua se puede detener aplicando a la disolución una presión, además de la presión atmosférica. El valor de esta presión adicional necesaria para detener el paso de agua recibe el nombre de PRESIÓN OSMÓTICA de la disolución (Camacho, 2004).

De lo anterior se puede deducir que a mayor concentración de solutos en un compartimento, que puede ser una célula, mayor será la presión osmótica que posea, es decir mayor será su capacidad de absorber agua de la solución más diluida, de la cual está separada por la membrana permeable al agua (Camacho, 2004).

Las paredes o membranas biológicas que constituyen las paredes de las frutas o animales son semipermeables, es decir que permiten el paso de sustancias como el agua pero no el de moléculas más grandes y complejas, a no ser que se haga por fenómenos especiales (Camacho, 2004).

La aplicación del fenómeno de ósmosis en la deshidratación de frutas se puede lograr debido a que un buen número de frutas, como es el caso de la fresa, papaya, mango o melón entre otras, cuentan con los elementos necesarios para inducir la osmosis (Camacho, 2004).

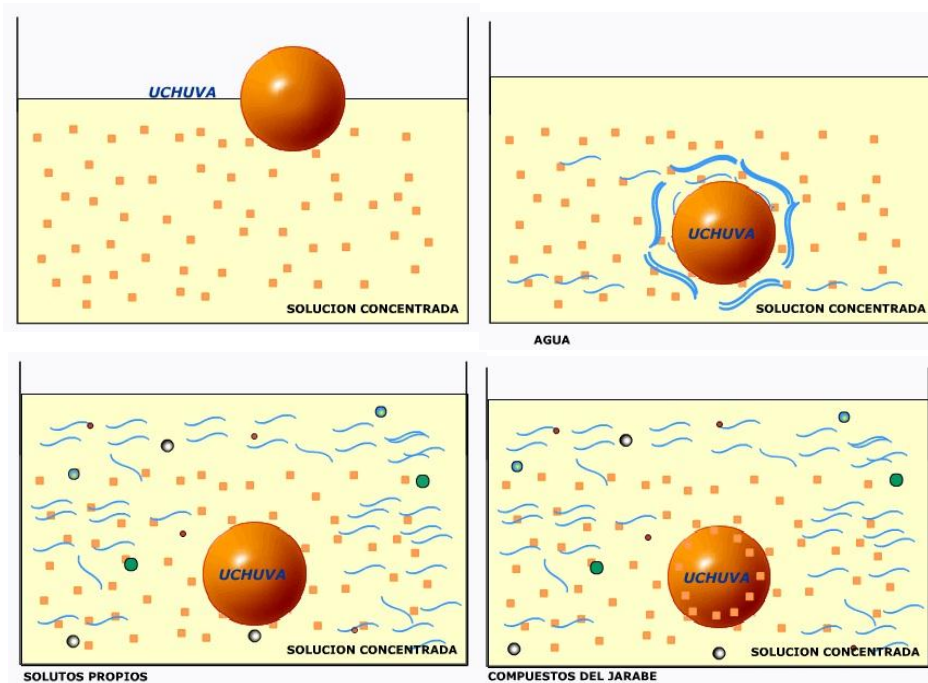
Estos elementos corresponden a la pulpa, que en estas frutas consiste en una estructura celular más o menos rígida que actúa como membrana semipermeable. Detrás de estas membranas celulares se encuentran los jugos, que son soluciones diluidas, donde se hallan disueltos sólidos que oscilan entre el 5 a 18% de concentración. Si esta fruta entera o en trozos se sumerge en una solución o jarabe de azúcar de 70%, se tendría un sistema donde se presentaría el fenómeno de ósmosis (Camacho, 2004).

Los jugos en el interior de las células de la fruta están compuestos por sustancias disueltas en agua, como ácidos, pigmentos, azúcares, minerales, vitaminas, etc. Algunas de estas sustancias o compuestos de pequeño volumen, como el agua o ciertos ácidos, pueden salir con cierta facilidad a través de orificios que presenta la membrana o pared celular, favorecidos por la presión osmótica que ejerce el jarabe de alta concentración donde se ha sumergido la fruta (Camacho, 2004).

La presión osmótica presente será mayor en la medida que sea mayor la diferencia de concentraciones entre el jarabe y el interior de los trozos de la fruta. El efecto de esta diferencia se ve reflejado en la rapidez con que es extraída el agua de la fruta hacia el jarabe (Camacho, 2004).

La deshidratación osmótica implica sumergir materiales alimenticios de humedad alta en una solución osmótica, por lo general una solución de azúcar o cloruro de sodio. (Figura 2.13 superior izquierda). Se puede considerar un sistema que contiene el material biológico y una solución de sacarosa. Una seudomembrana, por lo común la membrana celular del material alimenticio, separa la solución del material biológico. Simultáneamente están ocurriendo dos tipos de flujos, el flujo de agua y el flujo de sacarosa. Estos flujos están en función del potencial químico del agua y la sacarosa. (Camacho, 2004).

En la Figura 2.13 se muestra el proceso esquemático de deshidratación osmótica de una fruta en un soluto.



**Figura 2.14.** Proceso de deshidratación osmótica de una fruta. (Camacho, 2004).

El potencial químico del agua es más alto en el material biológico y el potencial químico del azúcar es más alto en la solución osmótica. Como resultado de ello, el agua sale del material biológico y el azúcar podría entrar en el material, lo que depende del tiempo de contacto y el tamaño de la membrana. Por consiguiente, se presentan dos flujos en contracorriente simultáneos. Por esto la deshidratación osmótica se ha descrito como un proceso de eliminación de agua e impregnación del soluto en remojo. La eliminación de agua de una fruta a través de la membrana celular también se considera como una función de la actividad de agua. Para eliminar agua a través de la membrana celular del material con mayor actividad de agua, se mantiene baja la actividad de agua en la solución osmótica. Una membrana celular semipermeable permite que el agua pase a través de ella con más facilidad que el soluto. Sin embargo, el proceso también incluye los casos en los que no hay membrana, como en los



quesos y los geles, o la membrana celular ha sido destruida por una alta temperatura. (Camacho, 2004).

La cinética de la deshidratación osmótica se determina estimando la velocidad de eliminación de agua y la ganancia de sólidos. Por lo general, las velocidades más altas de eliminación de agua se alcanzan durante los primeros 60 minutos de deshidratación osmótica debido a una gran fuerza impulsora entre la savia diluida de la fruta y la solución osmótica. Esto seguido de velocidades más bajas a causa de la formación de una capa superficial sólida, que reduce la fuerza impulsora. La velocidad de ganancia de sólidos se comporta de manera similar en todos los casos. Sin embargo, depende del tamaño del soluto y la permeabilidad de la membrana del alimento. (Camacho, 2004).

### 2.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para hacer una correlación adecuada entre los datos experimentales y los datos de las ecuaciones generadas, se utiliza un análisis de regresión lineal que se compone del cálculo de estadísticas de regresión, un análisis ANOVA y una prueba t estadística.

#### **Estadísticas de regresión:**

*Coefficiente de Correlación Múltiple:* Es la medida del grado de asociación entre dos características. En el contexto del análisis de la regresión lineal simple el coeficiente de correlación múltiple establece una medida del grado de asociación lineal entre la variable respuesta y la variable predictora, concretamente entre la variable respuesta y la recta de regresión estimada. (Gómez, 1997)

*Coefficiente de determinación ( $R^2$ ):* es la relación entre la suma de los cuadrados de la regresión y la suma de los cuadrados totales. Corresponde al coeficiente de regresión elevado al cuadrado (Moreno, 2008).

### Análisis ANOVA:

*Prueba F:* El análisis de varianza (ANOVA) es uno de los métodos estadísticos más utilizados y más elaborados en la investigación moderna. Se utiliza para probar hipótesis referentes las varianzas de una población. La prueba F permite determinar si las desviaciones estándar o las varianzas de dos muestras se pueden considerar estadísticamente iguales o diferentes. (Serrano, 2003).

### Prueba t estadística:

La prueba t brinda la información necesaria para saber si dos grupos de datos son diferentes o no, comparando el coeficiente de la regresión lineal. El modelo lineal tiene siempre una constante  $a$  y una pendiente  $\beta$ . Usualmente el valor a comparar es la pendiente  $\beta$ , pues si esta tiene un valor de 1, indicaría la correlación perfecta de los datos experimentales y calculados que se están comparando. El valor t se calcula con la ecuación 2.15 (Moreno, 2008).

$$t = \frac{1 - \beta}{\sqrt{\frac{s^2}{\sum (x_i - \bar{X})^2}}} \text{ (Ec. 2.15)}$$

Donde:

- $\beta$ : pendiente del modelo lineal
- $s^2$ : varianza de los residuos
- $x_i$ : datos de la variable independiente
- $\bar{X}$ : media de los datos de la variable independiente

Para el caso de la regresión lineal se cumple que  $t^2 = F$ . El valor t calculado se compara con el t tabulado de dos colas para n-k grados de libertad, con n= número de datos y k=número de variables, y un intervalo de confianza del 95%, es decir,  $\alpha = 0,05$  para una tabla t de dos colas ó  $\alpha=0,025$  para una tabla t de una cola.

Si sucede que  $t_{\text{Calculado}} \geq t_{\text{tabulado}}$  se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no existe una diferencia significativa entre los grupos de datos que se están analizando (Moreno, 2008).

El análisis también muestra el p-valor, el cual indica la probabilidad de obtener un t-valor igual o mayor que el t calculado. La hipótesis nula se rechaza si  $p < 0,05$  (Moreno, 2008).

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. MATERIALES

#### 3.1.1. Materia prima.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó fruta con calidad estándar, según la Norma Técnica Colombiana NTC 4580 (ICONTEC, 1999). La fruta utilizada fue Uchuva (*Physalis peruviana L.*) Ecotipo Colombia, la cual es la que más se cultiva en la actualidad en nuestro país (Figura 3.1). Los calibres utilizados en los ensayos variaron entre 18 y 23 mm de diámetro, que según la Norma Técnica Colombiana NTC 4580 están entre calibre C y E.



**Figura 3.1.** Uchuva utilizada en los ensayos de secado. Fuente: EL AUTOR.

Durante el desarrollo del proyecto se trabajó con fruta traída de diferentes sitios, Marengo (Municipio de Mosquera), Silvania y algunas regiones de Boyacá. Pero toda la fruta era de la variedad mencionada anteriormente.

El manejo que se le dio a la fruta, después de hacer la recepción en el laboratorio fue almacenamiento con capacho en nevera entre 3-7 °C, esto con el fin de preservar las condiciones de producto fresco. La metodología para los análisis físico-químicos se muestran en el apartado 3.3.3 y en la Tabla 4.20 se muestran los resultados.

### 3.2. EQUIPOS

A continuación se describen los equipos utilizados para la obtención de los datos en los ensayos realizados.

#### 3.2.1. Cámara Experimental de Secado

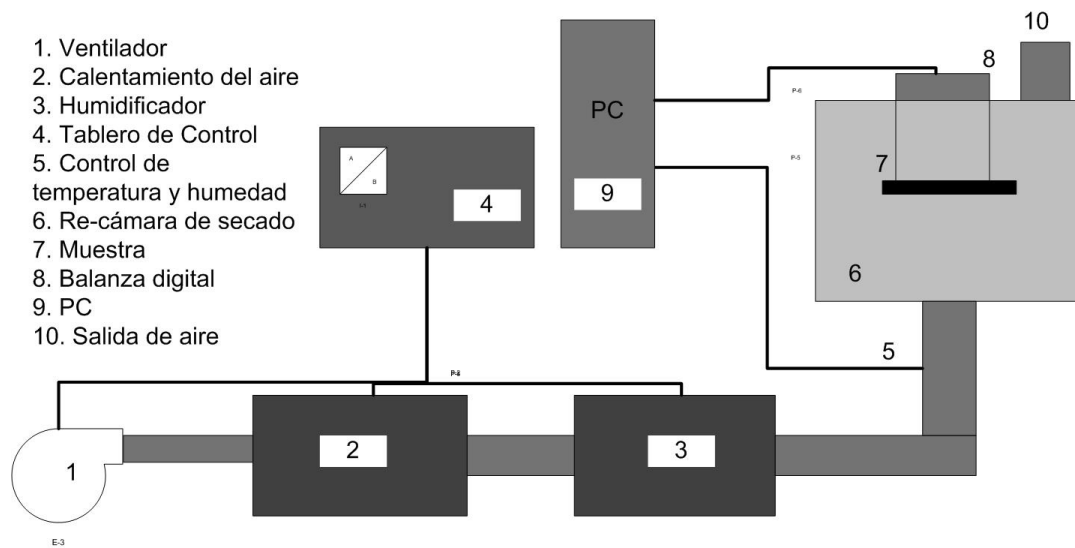
Para la realización de los ensayos de curvas de secado, se utilizó una “*Cámara experimental de secado*” en la cual se controlan las variables de proceso como temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, y se y se toma el peso del producto a medida que avanza el ensayo.

En la Figura 3.2 se tiene una imagen de este equipo.



**Figura 3.2.** Cámara experimental de secado.

En la Figura 3.3 se presenta un diagrama esquemático de la cámara experimental de secado, en la cual se muestran cada uno de los elementos que la componen.



**Figura 3.3.** Diagrama esquemático de la cámara experimental de secado.

Los elementos que componen la cámara experimental de secado son:

1. Ventilador centrífugo.
2. Calentamiento del aire por medio de resistencias eectricas.
3. Humidificador del aire por medio de un tanque de agua y una resistencia eléctrica.
4. Tablero de control de cada uno de los elementos.
5. Control de temperatura y humedad.
6. Re-cámara de secado.
7. Muestra de producto a deshidratar.
8. Balanza digital que va midiendo la variación del peso del producto en el tiempo de ensayo.
9. PC. Computador en donde se controlan las variables de temperatura, humedad del aire y se captura la variación de peso del producto a deshidratar en el tiempo que dura el ensayo.
10. Salida de aire que pasa por la re-cámara de secado.

Los rangos de operación del equipo son:

**Tabla 3.1.** Rangos de operación de la cámara experimental de secado.

| Parámetro         | Valor                       |
|-------------------|-----------------------------|
| Temperatura       | 20 – 80 °C                  |
| Velocidad de aire | Hasta 4,2 m s <sup>-1</sup> |
| Flujo de aire     | Paralelo o transversal      |

Este equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Planta Piloto de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia.

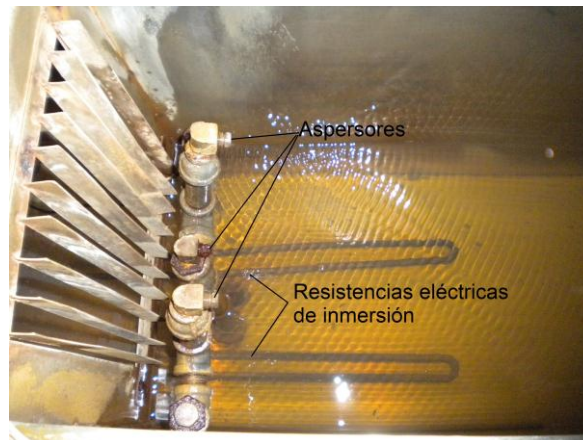
### 3.2.2. Cámara de Secado

Este equipo se utilizó en el desarrollo del proyecto, para la obtención del Contenido de Humedad de Equilibrio. En la Figura 3.4 se aprecia este equipo. Consta de los siguientes sistemas:

1. **Sistema de humidificación:** Este sistema consta de dos resistencias eléctricas de inmersión de 740 Watts cada una (Figura 3.5), las cuales generan el calentamiento del agua, de 6 aspersores los cuales son movidos por una bomba de agua. En las Figura 3.4 y 3.5 se puede observar el sistema de humidificación de este quipo.



**Figura 3.4.** Cámara de secado ubicada en la Planta Piloto de Ingeniería Química.



**Figura 3.5.** Aspersores y resistencias eléctricas de inmersión para generar la humedad en el sistema.

2. **Sistema de Calentamiento de aire:** Este sistema consta de un ventilador centrífugo y de cuatro resistencias aleteadas de 750 Watt cada una, como se muestra en la Figura 3.6.

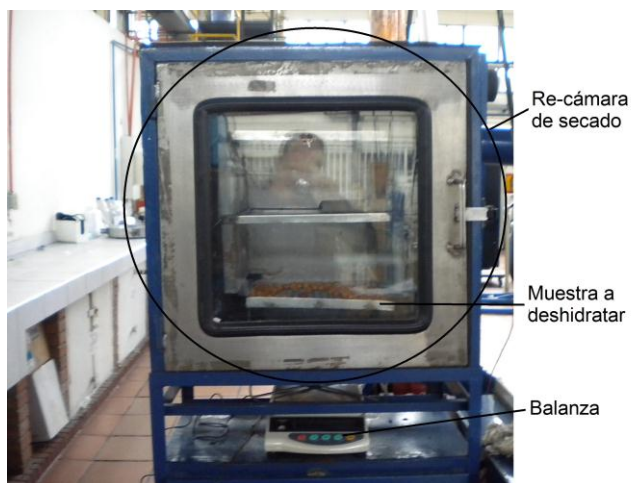


**Figura 3.6.** Ventilador centrífugo y resistencias eléctricas del secador experimental.

3. **Re-cámara de secado:** En la re-cámara de secado es donde se coloca la muestra a deshidratar. Consta de una pared tipo sándwich con aislamiento térmico de fibra de vidrio y un vidrio de seguridad, como se muestra en la Figura 3.7. Por medio de una estructura de alambre de acero inoxidable de  $\frac{1}{4}$



de pulgada que se soporta sobre una balanza, se puede determinar la variación de peso de la muestra a deshidratar, como se puede observar en la Figura 3.7.



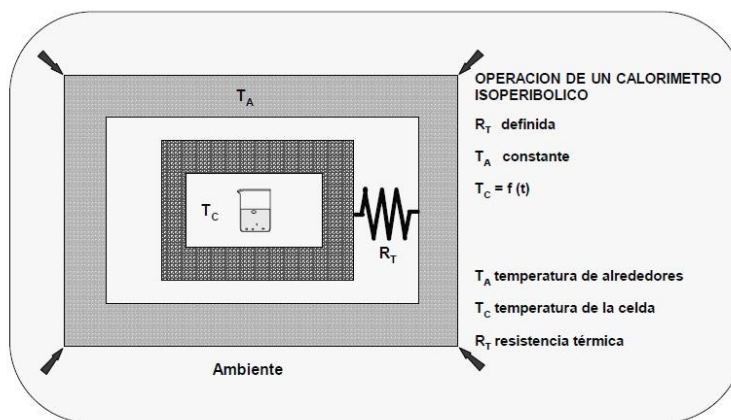
**Figura 3.7.** Re-cámara de secado.

- 4. Tablero de control:** aquí se controla la temperatura del aire (temperatura de bulbo seco), temperatura del agua (indirectamente la temperatura de bulbo húmedo) y el motor eléctrico del ventilador centrífugo.

### 3.2.3. Calorímetro isoperibólico:

Para la determinación del Calor Específico de la Uchuva se utilizó un calorímetro isoperibólico que se encuentra en el Laboratorio CINDILIC del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. Este calorímetro mantiene constante la temperatura de los alrededores mediante el uso de un termostato, mientras que la temperatura del sistema de medida puede variar con el tiempo. Existe una resistencia térmica  $R_T$ , de magnitud definida entre los alrededores y la celda donde se realiza la medida, de tal forma que el intercambio de calor depende de la diferencia de temperatura entre estos ( $T_A$  es igual a la temperatura de los alrededores y  $T_C$  igual a la temperatura de la celda y sistema de medida); como  $T_A$  es constante entonces el flujo de calor es una función de  $T_C$ . Si la generación de calor dentro de la celda se termina, la temperatura  $T_C$  se aproxima a la temperatura de los

alrededores  $T_A$ . La figura 3.8 muestra un esquema de la disposición de este tipo de calorímetros.



**Figura 3.8:** Esquema de un calorímetro isoperibólico. (Quintana G., 2005)

Las variables a controlar en este equipo las realiza un computador además de capturar los datos del experimento, con los cuales se puede obtener la gráfica característica y a partir de allí se determina el calor específico para cada muestra de ensayo. En la Figura 3.9 se observa el Calorímetro Isoperibólico ubicado en el Laboratorio CINDELIC del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. Este equipo se encuentra disponible para docencia e investigación.



**Figura 3.9.** Imágenes del Calorímetro ubicado en el Laboratorio CINDELIC del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.

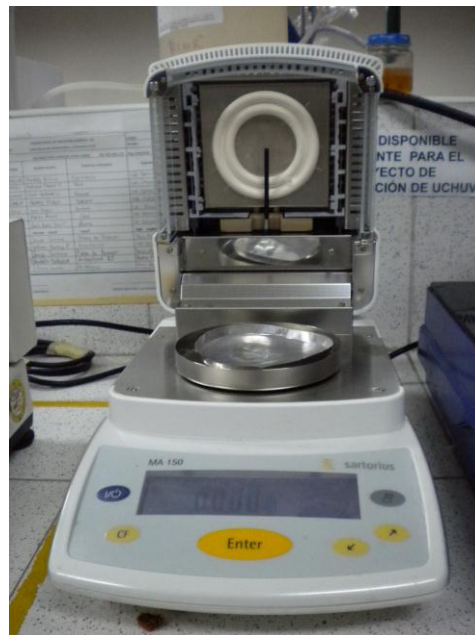
### 3.2.4. Determinación del contenido de humedad

Para determinar el Contenido de Humedad inicial y final de cada uno de los ensayos realizados en el desarrollo de este proyecto se utilizó una balanza determinadora de humedad marca Sartorius Modelo MA150 de los laboratorios de Poscosecha de Productos Agrícolas del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia.

Los parámetros fijados en el equipo para realizar los ensayos fueron:

- T: 120 °C.
- Intervalo: 0,1% por 50 segundos.

En la Figura 3.10 se presenta una imagen de este equipo.



**Figura 3.10.** Balanza determinadora de humedad Marca Sartorius Modelo MA150.

Para determinar el contenido de humedad a la uchuva en fresco se cortó una rodaja como se muestra en la Figura 3.11 con un peso menor a dos gramos y se fijaron los

parámetros en la balanza. En la Figura 3.11 se observa una muestra para realizar la medida antes y después del ensayo.



**Figura 3.11.** Izquierda: muestra para realizar la medida de contenido de humedad inicial; derecha: muestra al finalizar la medida.

Para realizar la medida de contenido de humedad final se tomaba la uchuva deshidratada, se abría a la mitad y se realizaba la medida.

### 3.3. METODOLOGÍA

A continuación se describe los procesos metodológicos empleados durante el desarrollo de este proyecto.

#### 3.3.1. Pre-tratamientos

Para la obtención de los parámetros de la uchuva se realizaron los siguientes pre-tratamientos:

##### 3.3.1.1. Sin ningún pre-tratamiento (blanco)

Para poder tener un punto de comparación se obtuvo los parámetros de deshidratado con uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco). El proceso realizado a estos ensayos fue de lavado en agua, luego lavado en agua con hipoclorito a 80 ppm y terminando con un enjuague en agua.

Luego de realizar este proceso, la fruta fue sometida a deshidratación con aire caliente según el diseño experimental.

### 3.3.1.2. Escaldado

El escaldado aplicado fue con agua a 80°C durante 2 minutos, según datos de Camacho (2004).

En la Figura 3.12 se observa el montaje realizado en la Planta Piloto de Ingeniería Química para el escaldado de la uchuva. Allí se tiene una plancha eléctrica, junto con una termocupla, para mantener la temperatura controlada y una malla en acero inoxidable para sumergir la fruta en el agua durante el tiempo de residencia.



**Figura 3.12.** Montaje para la realización del escaldado de la uchuva.

### 3.3.1.3. Osmodeshidratado

Para la preparación de la solución osmodeshidratante se tomaron 1000 ml de agua destilada las cuales se depositaron en la olla (Figura 3.12), luego se pesaron 2000 g de azúcar y mezclaron con el agua. La mezcla se calentó y se mezcló constantemente para disolver el azúcar y homogenizar la solución, luego de lo cual se determinó la

concentración de azúcar (°Brix) con el uso de un refractómetro marca Atago Referencia HSR-500 con rango de medición de 0 a 90°Brix y precisión de 0,1 °Brix.

Una vez preparada la solución se tomaron 700 g de uchuva los cuales fueron colocados en una bolsa plástica, donde se agregó la solución preparada previamente y se selló la bolsa para ser almacenada durante 24 horas, al cabo de los cuales se retira la muestra, se enjuaga con abundante agua y se pesa.

### 3.3.2. Determinación de los parámetros

Después de realizar los pre-tratamientos a la fruta se procedió a la obtención de cada uno de los parámetros requeridos, de acuerdo al diseño experimental.

#### 3.3.2.1. Ecuación de Contenido de Humedad en Equilibrio (CHeq)

Las isothermas de Contenido de Humedad en Equilibrio (CHeq) se obtuvieron utilizando el método dinámico. Para ello se utilizó un secador experimental ubicado en la Planta Piloto de Ingeniería Química, descrita en el numeral 3.3.2.

Se utilizó un diseño experimental factorial con dos variables, 5x3 y 1 nivel, para un total de 15 ensayos por pre-tratamiento (uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado), 15x3 pre-tratamientos, 45 ensayos, además a cada ensayo se repitió, 45x2, 90 ensayos en total.

Para realizar cada ensayo se fijó las condiciones de Temperatura y humedad relativa del aire y se colocaron muestras de aproximadamente 500 gr. Se registra el dato de variación de peso en el tiempo hasta que el peso sea constante, o sea hasta que el producto alcanza el equilibrio con las condiciones fijadas inicialmente. El planteamiento inicial era obtener isothermas a 4 condiciones de temperatura y 5 de humedad relativa del aire, pero los ensayos a 40°C que se realizaron tuvieron un tiempo de residencia de aproximadamente 360 hr y la fruta no alcanzó el equilibrio (ver Figura 4.1).

**Tabla 3.2.** Matriz de resultados para isoterma de Cheq.

**MATRIZ DE ENSAYOS**

|        |  | ISOTERMAS                                |    |    |    |    |  |  |  |  |  |
|--------|--|--|----|----|----|----|--|--|--|--|--|
|        |  | BLANCOS - ESCALDADOS - OSMODESHIDRATADOS |    |    |    |    |  |  |  |  |  |
|        |  | HR (%)                                   |    |    |    |    |  |  |  |  |  |
| T (°C) |  | 20                                       | 30 | 45 | 60 | 70 |  |  |  |  |  |
| 50     |  |  |    |    |    |    |  |  |  |  |  |
| 60     |  |  |    |    |    |    |  |  |  |  |  |
| 70     |  |  |    |    |    |    |  |  |  |  |  |

En la Tabla 3.2 se presenta la Matriz de Ensayos planteada para la obtención de las isotermas de Cheq. Esta matriz se repitió para cada uno de los pre-tratamientos.

Para la generación del modelo matemático se trabajó con los rangos de temperatura entre 50 y 70°C, ya que en este rango se encuentra la temperatura recomendada para la deshidratación de frutas.

Como se dijo en el numeral 2.4.2, el modelo de Roa es el modelo seleccionado para hacer la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uchuva. Para el ajuste de los parámetros de la ecuación de Roa de contenido de humedad en equilibrio (Ec. 2.4) a partir de los datos experimentales se utilizó una metodología de estimación de parámetros no lineales por mínimos cuadrados que se desarrolló en MS-Excel®, como se describe a continuación:

- Se generan datos de humedad en equilibrio para cada pareja de temperatura y humedad relativa del aire utilizando la ecuación 2.4, asignando valores iniciales arbitrarios a las constantes de la ecuación. Estos valores iniciales pueden ser datos correspondientes a ecuaciones para otros productos con el fin de ayudar a una fácil correlación de la ecuación.
- Se calculan las diferencias entre los valores experimentales y los valores generados por la ecuación y se calcula el cuadrado de cada diferencia.
- Se suman todos los cuadrados de las diferencias.
- Se aplica una función Solver en MS-Excel® para minimizar la sumatoria variando las constantes de la ecuación.



### 3.3.2.2. Ecuación de Calor específico

Para determinar la ecuación de Calor específico los ensayos se realizaron con un calorímetro isoperibólico ubicado en el laboratorio CINDILIC del Departamento de Química, Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. Esta determinación se hizo a diferentes contenidos de humedad de la fruta con una temperatura de 70°C en el proceso de deshidratado para fruta sin ningún pretratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado en la Cámara Experimental de Secado descrita en el numeral 3.2.1. En la medida que el ensayo avanzaba se iban retirando muestras del mismo a diferentes contenidos de humedad. La humedad en cada punto se determinó con la Balanza Determinadora de Humedad descrita en el numeral 3.2.4. Por cada muestra se realizaron tres mediciones de calor específico. En total se realizaron 36 mediciones de calor específico.

Los resultados obtenidos se ajustaron a una ecuación de la forma,

$$C_p = aCH + b \text{ (Ec. 3.14)}$$

En donde:

- $C_p$ : Calor específico ( $\text{KJ kg}^{-1} \text{ C}^{-1}$ )
- CH: Contenido de Humedad (decimal) (base seca)
- a y b: Constantes de la ecuación.

Al obtener los resultados de calorimetría se ajustó la ecuación por medio de mínimos cuadrados, como se describe a continuación:

- Se generan datos de calor específico para cada contenido de humedad muestreado, utilizando la ecuación 3.14, asignando valores iniciales arbitrarios a las constantes de la ecuación. A estos valores iniciales se les pueden dar el valor de uno (1).
- Se calculan las diferencias entre los valores experimentales y los valores generados por la ecuación y se calcula el cuadrado de cada diferencia.



- Se suman todos los cuadrados de las diferencias.
- Se aplica una función Solver en MS-Excel® para minimizar la sumatoria variando las constantes de la ecuación.

### 3.3.2.3. Ecuación de Velocidad de Secado

Para determinar la ecuación de Velocidad de Secado se utilizó la Ecuación propuesta por Roa (1974) (Ec. 2.5). La ecuación de velocidad de secado expresa el cambio de humedad del sólido por unidad de tiempo, en términos de las condiciones de secado. Las variables que tienen mayor influencia son:

- Velocidad del aire ( $\text{m s}^{-1}$ )
- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Humedad del aire (%)
- Densidad de carga ( $\text{kg m}^{-2}$ )
- Geometría del sólido a secar ( $\text{m}^{-2}$ )

La determinación experimental se realiza al determinar las curvas de secado para diferentes niveles de las variables de operación mencionadas (Moreno, 2008).

El método para la determinación de la ecuación de velocidad de secado consiste en hacer pasar una corriente de aire a través del producto, controlando las variables mencionadas anteriormente, y se determina la pérdida de peso en el tiempo. Luego se calcula y se grafica la pérdida de humedad por unidad de tiempo.

Las variables de la Ecuación 2.5 tienen influencia en el proceso de deshidratación las cuales se variaron de la siguiente manera:

- Velocidad del aire ( $\text{m s}^{-1}$ ): Se utilizaron la velocidad máxima permitida en la cámara experimental de secado y una velocidad intermedia, los cuales se encuentran dentro de los rangos admitidos por secadores industriales.

- Temperatura (°C): Las temperaturas con los cuales se trabajó fueron 50, 60 y 70°C, cubriendo un rango aceptable para hacer el Modelamiento matemático.
- Densidad de carga (kg m<sup>-2</sup>): La densidad de carga con la cual se realizaron los ensayos fue de 13,3 kg m<sup>-2</sup>, con muestras entre 950 a 1000 gr por ensayo, una bandeja de 0,35x0,21 m y una sola capa de producto.

Se utilizó un diseño factorial de dos variables 3x2 y dos niveles, para 18 ensayos más las contra-muestras, un total de 36 ensayos, como se indica en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Matriz de ensayos para las curvas de secado.

### MATRIZ DE RESULTADOS

|        |   | CURVAS DE SECADO     |   |           |   |     |   |                   |   |     |  |
|--------|---|----------------------|---|-----------|---|-----|---|-------------------|---|-----|--|
|        |   | Velocidad aire (m/s) |   |           |   |     |   |                   |   |     |  |
|        |   | BLANCOS              |   | ESCALDADO |   |     |   | OSMODESHIDRATADOS |   |     |  |
| T (°C) | 3 | 4,2                  | 3 | 4,2       | 3 | 4,2 | 3 | 4,2               | 3 | 4,2 |  |
| 50     |   |                      |   |           |   |     |   |                   |   |     |  |
| 60     |   |                      |   |           |   |     |   |                   |   |     |  |
| 70     |   |                      |   |           |   |     |   |                   |   |     |  |

Para la determinación de los parámetros se utilizó la metodología de estimación de parámetros no lineal por mínimos cuadrados de tal forma que se busca minimizar la sumatoria del cuadrado de la diferencia entre los datos experimentales y los valores calculados, como se describe a continuación:

- Para cada ensayo realizado se dispone de una velocidad del aire y una temperatura del aire. Con esta información se genera datos para el cambio de humedad (dM/dt).

- La humedad relativa del aire se controló mediante un CONTROLADOR DIGITAL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD MT-530Ri FULL GAUGE. Este dato se ingresa también en la ecuación de velocidad de secado.

El contenido de humedad en equilibrio se calcula mediante la ecuación 2.5. Para su cálculo se ingresa la temperatura y humedad relativa del aire en cada ensayo.

- La presión de vapor de saturación para el agua se calcula mediante la ecuación de Antoine (Ecuación 2.7).

### 3.3.2.4. Ecuación de Calor Latente de Vaporización

La ecuación de Calor Latente de Vaporización se determina utilizando el método descrito por (Brooker et al, 1992), tal como se enunció en el numeral 2.4.3.4. Para esta ecuación no es necesario realizar ensayos experimentales adicionales debido a que se utilizan los resultados obtenidos en la determinación de la ecuación de contenido de humedad en equilibrio y un procedimiento de cálculo conocido como método de Othmer el cual es citado por (Brooker et al, 1992), a continuación se describe el método para este caso:

- Se definieron valores del contenido de humedad de la uchuva en el rango seleccionado, entre 7% y 20% base húmeda (bh) cada 5% de humedad. Esto corresponde a un rango desde 7,53% hasta 25,0% base seca (bs).
- Para cada valor de contenido de humedad y dos valores de temperatura del aire, 50°C y 70°C, según el rango que se desea cubrir, se calcula el valor de la humedad relativa del aire correspondiente, utilizando la ecuación 2.4.
- Para los mismos valores de temperatura se calculó la presión de vapor de saturación del agua utilizando la ecuación de Antoine (Ec. 2.7)
- A partir de la presión de vapor de saturación para las temperaturas 1 y 2, y el valor de la humedad relativa del aire para estas mismas temperaturas, se halló la relación de calores latentes de vaporización con las ecuaciones 2.11 y 2.12
- Para cada contenido de humedad del producto es posible determinar el valor de humedad relativa para las temperaturas T1 y T2 del aire a partir de la ecuación de

contenido de humedad en equilibrio. Así es posible correlacionar la relación entre los calores latentes de vaporización del agua en el producto y del agua pura en función del contenido de humedad del producto, la cual tendrá la forma exponencial indicada en la ecuación 2.13.

$$\frac{h_{fg'}}{h_{fg}} = 1 + \alpha \exp(-\beta M) \text{ (Ec. 2.13)}$$

Para ajustar las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  de la ecuación 2.13 a partir de los datos obtenidos se utilizó una metodología de estimación de parámetros no lineales por mínimos cuadrados de la siguiente forma:

- Se generan datos de la relación de calores latentes ( $h_{fg'}/h_{fg}$ ) para cada contenido de humedad del sólido ( $M$ ) utilizando la ecuación 2.13, asignando valores iniciales arbitrarios a las constantes de la ecuación.
- Se calculan las diferencias entre los valores experimentales y los valores generados por la ecuación y se calcula el cuadrado de cada diferencia.
- Se suman todos los cuadrados de las diferencias
- Se aplica una función Solver en Excel® para minimizar la sumatoria variando las constantes de la ecuación.

### 3.3.3. Análisis Físico-químicos

#### Índice de acidez

Preparación de la muestra de uchuva: se toman 25 g de uchuva y se licuan con 50 ml de agua destilada calentando esta mezcla hasta aproximadamente 40°C y así obtener un líquido homogéneo, luego se adapta el condensador de reflujo, se mantiene la temperatura durante 30 minutos, se enfría y se filtra.

Para la preparación de la solución de NaOH se pesan 4 g de cristales de NaOH, se disuelven en un vaso de precipitado y luego se afora a 1000 ml.

Para la estandarización de la solución de NaOH se pesó entre 0.45 g aproximadamente de ftalato ácido de potasio sobre un vaso de precipitado, luego se disolvió con 25 ml de agua destilado. Se añadió 2 gotas de fenoftaleina, se valoró con la solución de NaOH 0.1 N, lentamente y con agitación, hasta que la solución adquirió una tonalidad rosa persistente. Se anotó el volumen gastado y calculó el factor F de la disolución de la siguiente manera:

$$F = \frac{N_{exacto}}{N_{aprox.}} = \frac{a/Eq}{V \times 0,1} \text{ (Ec. 3.4)}$$

Donde:

- a: gramos de fenolftaleina de ácido de potasio
- Eq: peso equivalente de ftalato de ácido de potasio = 204.22
- V: volumen de NaOH 0.1 N gastados en la valoración.

$$N_{Exacta} = 0,1 \times F \text{ (Ec. 3.5)}$$

Para la determinación de la acidez en % de ácido cítrico de la uchuva se tomó 5 ml de muestra en un vaso de precipitado, se le agregó la solución de NaOH 0.1 N hasta un Ph de  $7 \pm 0.2$ . La acidez se expresa como porcentaje de ácido cítrico se calcula mediante la siguiente ecuación, según la NTC 4580 (ICONTEC, 1999)

$$\% \text{ de ácido cítrico} = \frac{V_1 \times N}{V_2} \times K \times 100 \text{ (Ec. 3.6)}$$

Donde:

- V1: volumen de NaOH consumido (ml)
- V2: volumen de la muestra (5 ml)
- K: peso equivalente del ácido cítrico ( $0,064 \text{ g} \cdot \text{meq}^{-1}$ ).
- N: normalidad de la solución de NaOH ( $0,1 \text{ meq ml}^{-1}$ )

Sólidos solubles totales

Se tomó una muestra del jugo de la fruta, se filtró y se midieron los grados Brix de la fruta con un refractómetro HSR-500 Marca ATAGO y se hizo la corrección mediante la ecuación 3.7, según NTC 4580 (ICONTEC, 1999)

$$S.S.T._{corr} = 0,194 \times A + S.S.T. \text{ (Ec. 3.7)}$$

Donde:

- S.S.T. Sólidos Solubles Totales en grados Brix
- A: % de Acido Citrico

El índice de madurez se halla mediante la ecuación 3-8, según NTC 4580 (ICONTEC, 1999).

$$\text{Índice de madurez} = \frac{S.S.T.}{\text{Acidez titulable}} \text{ (Ec. 3.8)}$$

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. ECUACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO

El contenido de humedad en equilibrio (CHEq) en base seca para Uchuva, sometida a diferentes pre-tratamientos, se determinó mediante el método dinámico siguiendo el diseño experimental y la metodología propuestos, con el fin de ajustar las constantes de la ecuación de Roa. Los promedios de los resultados experimentales se muestran en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

**Tabla 4.1.** Contenido de Humedad en Equilibrio para Uchuva Blancos (sin ningún pre-tratamiento).

| T (°C) | HR AIRE % |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | 20        |        | 30     |        | 45     |        | 60     |        | 70     |        |
|        | bh (%)    | bs (%) | bh (%) | bs (%) | bh (%) | bs (%) | bh (%) | bs (%) | bh (%) | bs (%) |
| 50     | 6,87      | 7,38   | 9      | 9,89   | 15,23  | 17,97  | 18,2   | 22,25  | 21,3   | 27,06  |
| 60     | 5,78      | 6,13   | 8,24   | 8,98   | 14,8   | 17,37  | 17,5   | 21,21  | 20,3   | 25,47  |
| 70     | 5,69      | 6,03   | 8,12   | 8,84   | 13,2   | 15,21  | 16,5   | 19,76  | 19,2   | 23,76  |

Los ensayos realizados a 40°C no dieron resultados que se puedan reportar, ya que el tiempo de residencia en el proceso estuvo alrededor de las 360 hr, presentándose ataque de hongos y deterioro enzimático, razón por la cual los ensayos a esta temperatura fueron descartados. En la Figura 4.1 se presentan algunas imágenes de este ensayo.



**Figura 4-1.** Ataque de hongos y de micro-organismos en ensayo a 40°C y 20 %HR.

**Tabla 4.2.** Contenido de Humedad en Equilibrio para Uchuva sometida a escaldado.

|        |  | HR AIRE % |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        |  | 20        |        | 30     |        | 45     |        | 60     |        | 70     |        |
| T (°C) |  | bh (%)    | bs (%) | bh (%) | bs (%) | bh (%) | bs (%) | bh (%) | bs (%) | bh (%) | bs (%) |
| 50     |  | 7,67      | 8,31   | 14,08  | 16,39  | 18,55  | 22,77  | 21,69  | 27,70  | 25,98  | 35,10  |
| 60     |  | 3,70      | 3,84   | 8,86   | 9,72   | 13,20  | 15,21  | 18,35  | 22,47  | 22,20  | 28,53  |
| 70     |  | 3,40      | 3,52   | 7,80   | 8,46   | 11,99  | 13,62  | 15,82  | 18,79  | 19,25  | 23,84  |

**Tabla 4.3.** Contenido de Humedad en Equilibrio para Uchuva sometida a osmodeshidratación.

|        |  | HR AIRE % |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------|--|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        |  | 20        |         | 30      |         | 45      |         | 60      |         | 70      |         |
| T (°C) |  | HR % bh   | HR % bs | HR % bh | HR % bs | HR % bh | HR % bs | HR % bh | HR % bs | HR % bh | HR % bs |
| 50     |  | 9,40      | 10,38   | 11,78   | 13,35   | 13,30   | 15,34   | 15,26   | 18,01   | 18,55   | 22,77   |
| 60     |  | 5,90      | 6,26    | 7,90    | 8,57    | 8,71    | 9,54    | 15,50   | 18,34   | 18,35   | 22,47   |
| 70     |  | 3,63      | 3,77    | 7,32    | 7,90    | 8,48    | 9,27    | 13,40   | 15,47   | 17,50   | 21,21   |

A continuación, en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4, se presentan las gráficas del Contenido de Humedad en Equilibrio en bs para los tratamientos estudiados (uchuvas sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuvas sometidas a escaldado y uchuvas sometidas a osmodeshidratado, respectivamente).



En estas figuras se observa el comportamiento típico de las isotermas, en las cuales se observa que en la medida que la temperatura aumenta el contenido de humedad en equilibrio del producto disminuye.

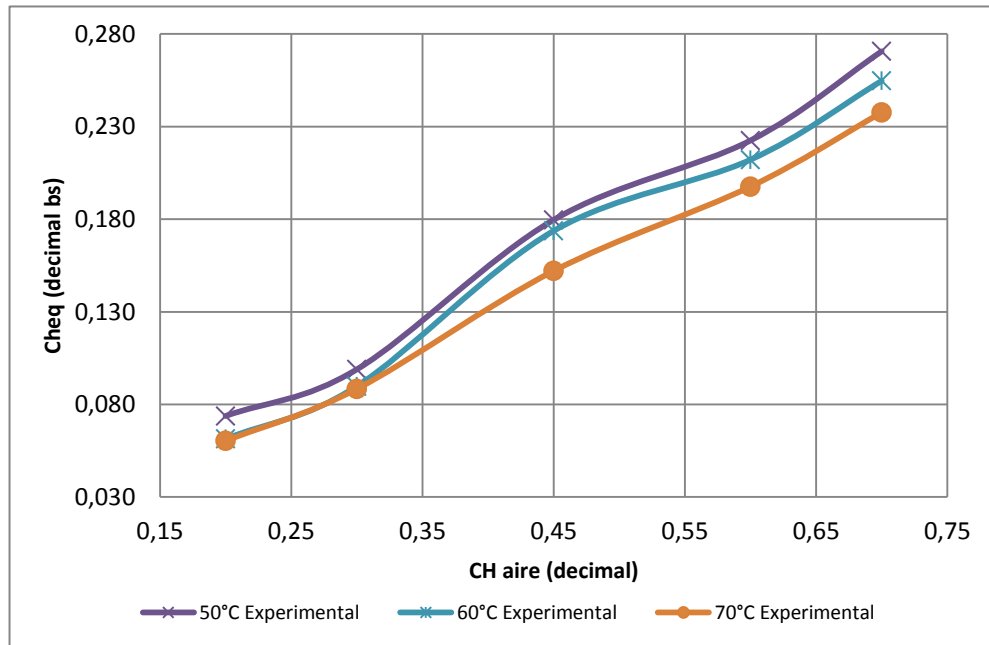


Figura 4.2. Datos experimentales del Contenido de Humedad en Equilibrio en base seca para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento).

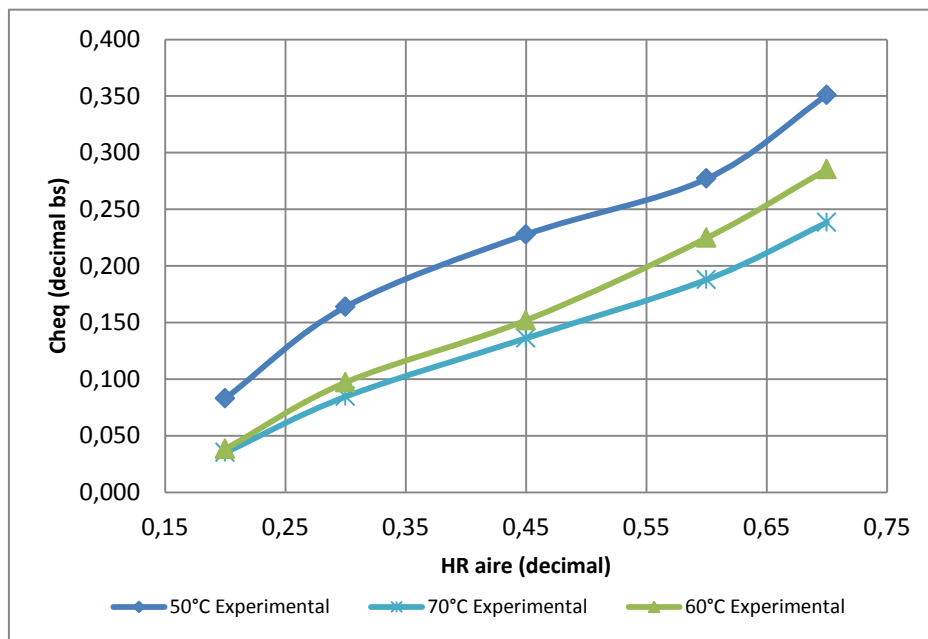
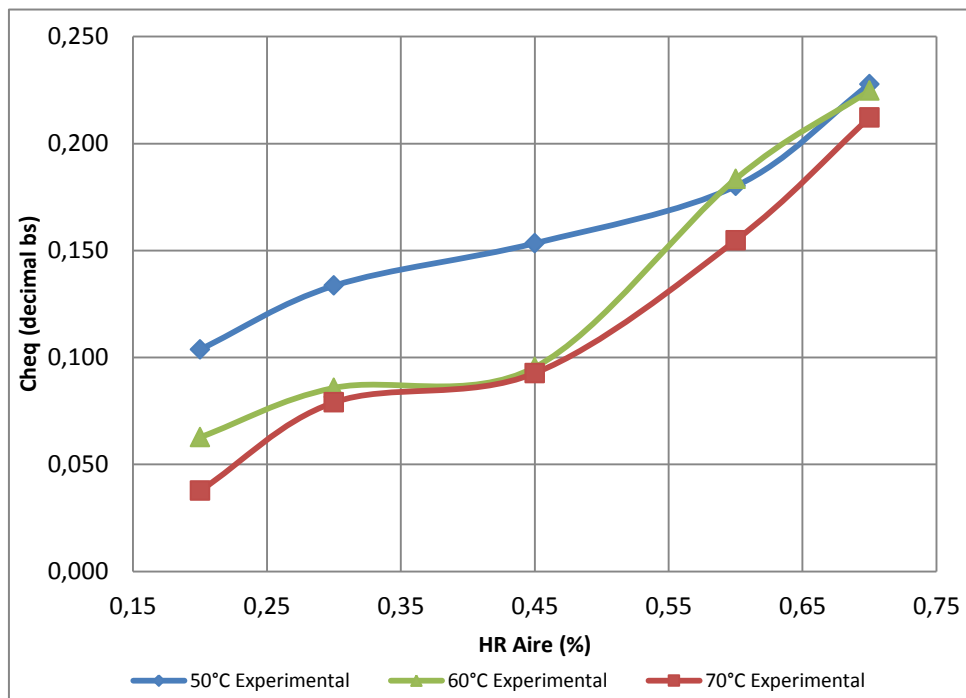


Figura 4.3. Datos experimentales del Contenido de Humedad en Equilibrio en base seca para uchuva sometida a escaldado.



**Figura 4.4.** Datos experimentales del Contenido de Humedad en Equilibrio en base seca para uchuva sometida a osmodeshidratado.

#### 4.1.1. Determinación de los parámetros de la ecuación de contenido de humedad en equilibrio.

Con los datos obtenidos se generan los parámetros de la Ecuación de Roa (Ec. 2.4), los cuales se presentan en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Parámetros para la ecuación de Roa de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado.

| Parámetros | Tratamientos realizados |           |                  |
|------------|-------------------------|-----------|------------------|
|            | Blancos                 | Escaldado | Osmodeshidratado |
| <b>p1</b>  | 0,8571                  | 0,4039    | 2,8010           |
| <b>p2</b>  | 0,1292                  | 0,7184    | -7,4698          |
| <b>p3</b>  | 0,0878                  | -0,7713   | 5,6873           |
| <b>q0</b>  | 0,0525                  | 0,0016    | -0,1250          |

|    |         |          |          |
|----|---------|----------|----------|
| q1 | -0,6282 | -0,2721  | 0,8142   |
| q2 | 2,2756  | -0,3847  | -2,9901  |
| q3 | -3,4190 | 1,9017   | 5,0804   |
| q4 | 1,8235  | -1,4307  | -3,0240  |
| q5 | 79,9957 | -45,0468 | -26,2760 |

Por lo tanto las ecuaciones obtenidas son:

- Uchuva sin ningún pre-tratamiento (Blanco):

$$Meq = (0,8571HR + 0,1292HR^2 + 0,0878HR^3) \exp((0,0525 - 0,6282HR + 2,2756HR^2 - 3,4190HR^3 + 1,8235HR^4) + (T + 79,9957))$$

(Ec. 4.1).

En donde:

- HR: Humedad Relativa del aire (decimal).
- T: Temperatura del aire (°C).
- Meq: Contenido de Humedad de Equilibrio (decimal b.s.)

- Uchuva sometida a escaldado:

$$Meq = (0,4039HR + 0,7184HR^2 - 0,7713HR^3) \exp((0,0016 - 0,2721HR - 0,3847HR^2 + 1,9017HR^3 - 1,4307HR^4) + (T - 45,0468))$$

(Ec. 4.2).

En donde:

- HR: Humedad Relativa del aire (decimal).
- T: Temperatura del aire (°C).
- Meq: Contenido de Humedad de Equilibrio (decimal b.s.)

- Uchuva sometida a osmodeshidratado:

$$Meq = (2,8010HR - 7,4698HR^2 + 5,6873HR^3) \exp((-0,1250 + 0,8142HR - 2,9901HR^2 + 5,0804HR^3 - 3,0240HR^4) + (T - 26,2760))$$

(Ec. 4.3).

En donde:

- HR: Humedad Relativa del aire (decimal).
- T: Temperatura del aire (°C).
- Meq: Contenido de Humedad de Equilibrio (decimal b.s.)

A partir de las Ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 se pueden generar las isotermas de contenido de humedad en equilibrio (CHEq) para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado, respectivamente. En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se pueden apreciar las Isotermas de Contenido de Humedad en equilibrio generadas a partir del modelo para uchuva sin ningún pre-tratamiento, uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado.

Al hacer el modelamiento matemático de la Ecuación de Roa para contenido de humedad en equilibrio se observa que el comportamiento de estas curvas es el esperado y el modelo matemático predice muy bien las isotermas del deshidratado de la uchuva con los tratamientos estudiados.

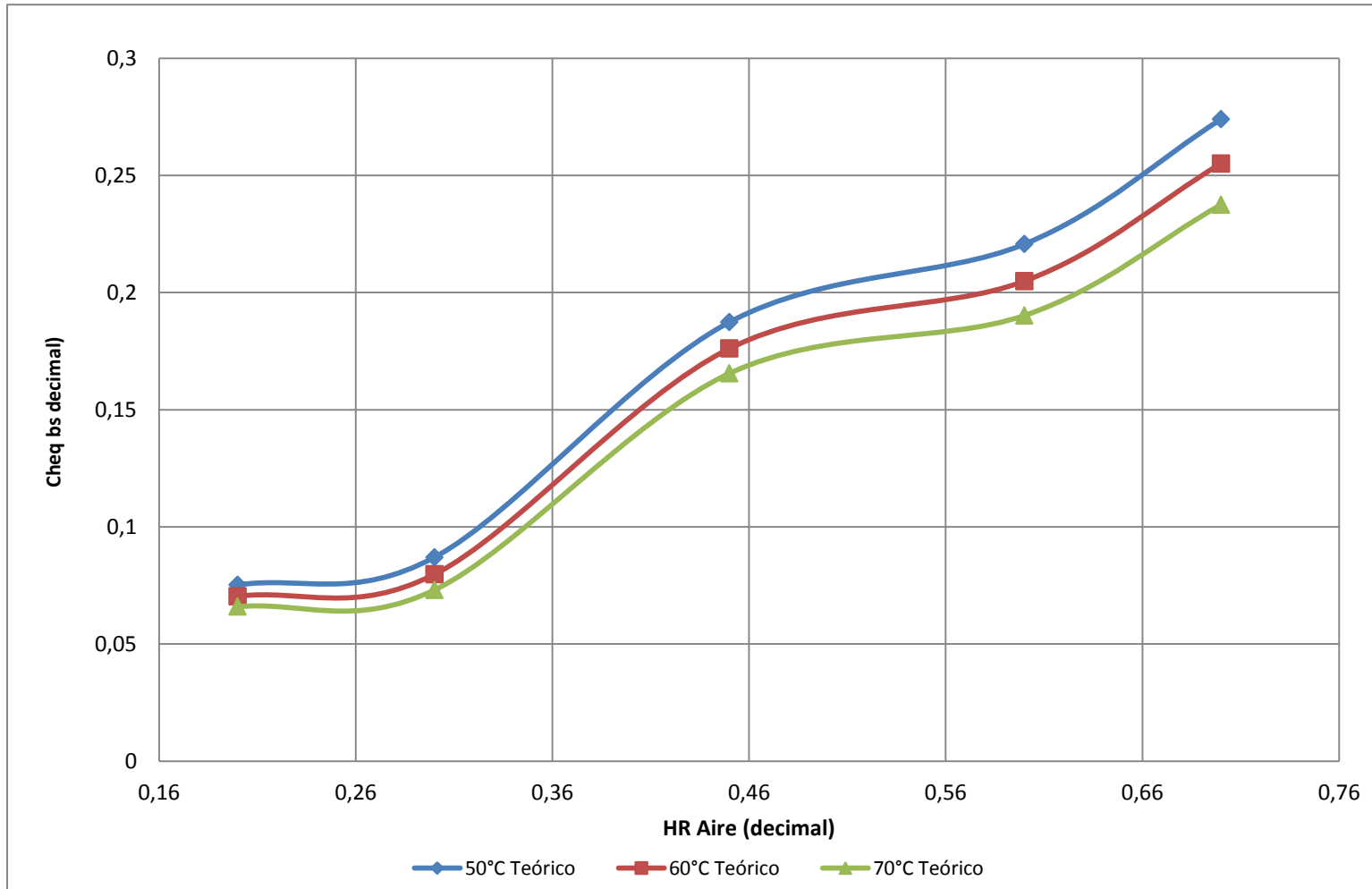


Figura 4.5. Isothermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento) generadas a partir del modelo.

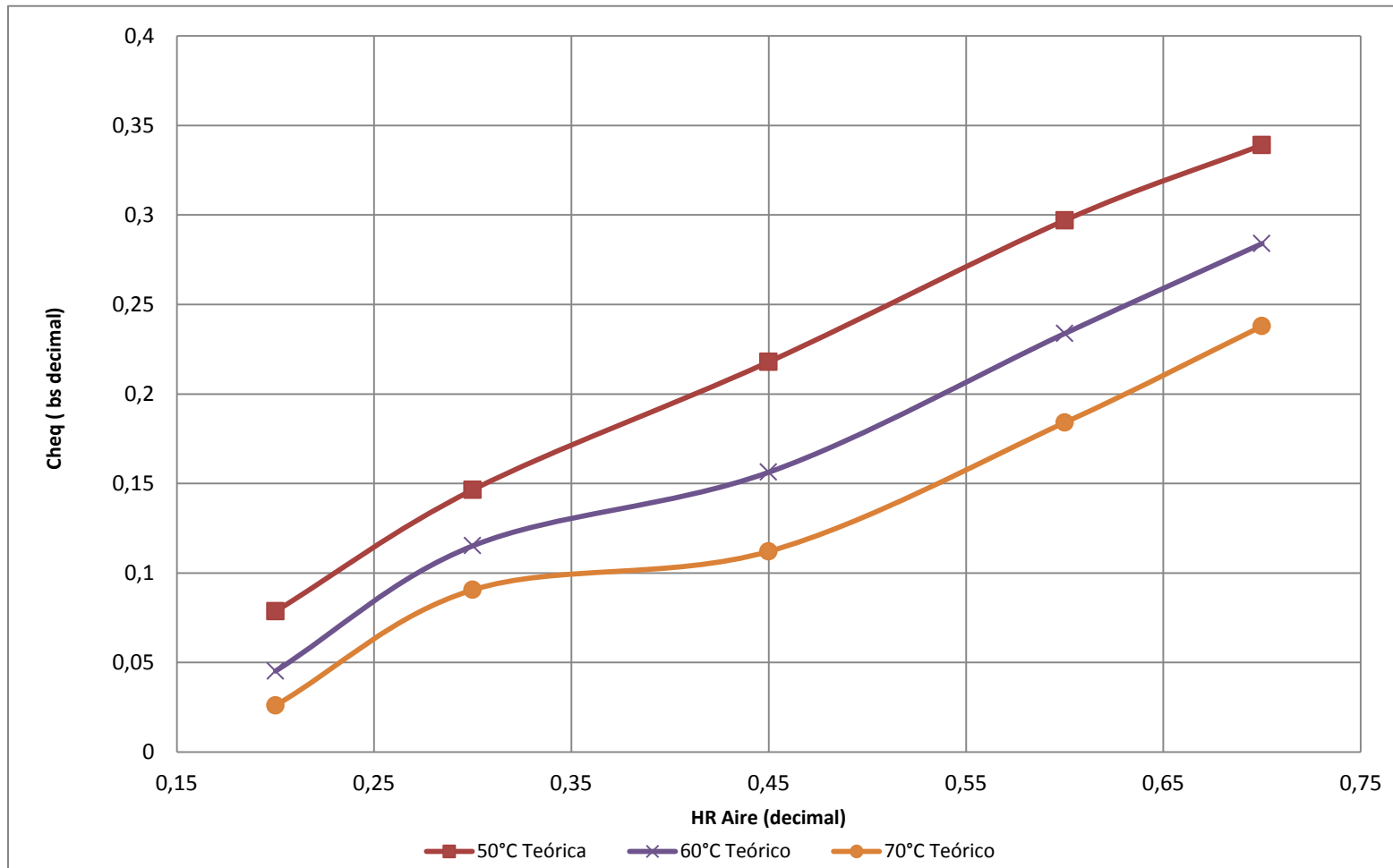


Figura 4.6. Isothermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sometida a escaldado generadas a partir del modelo.

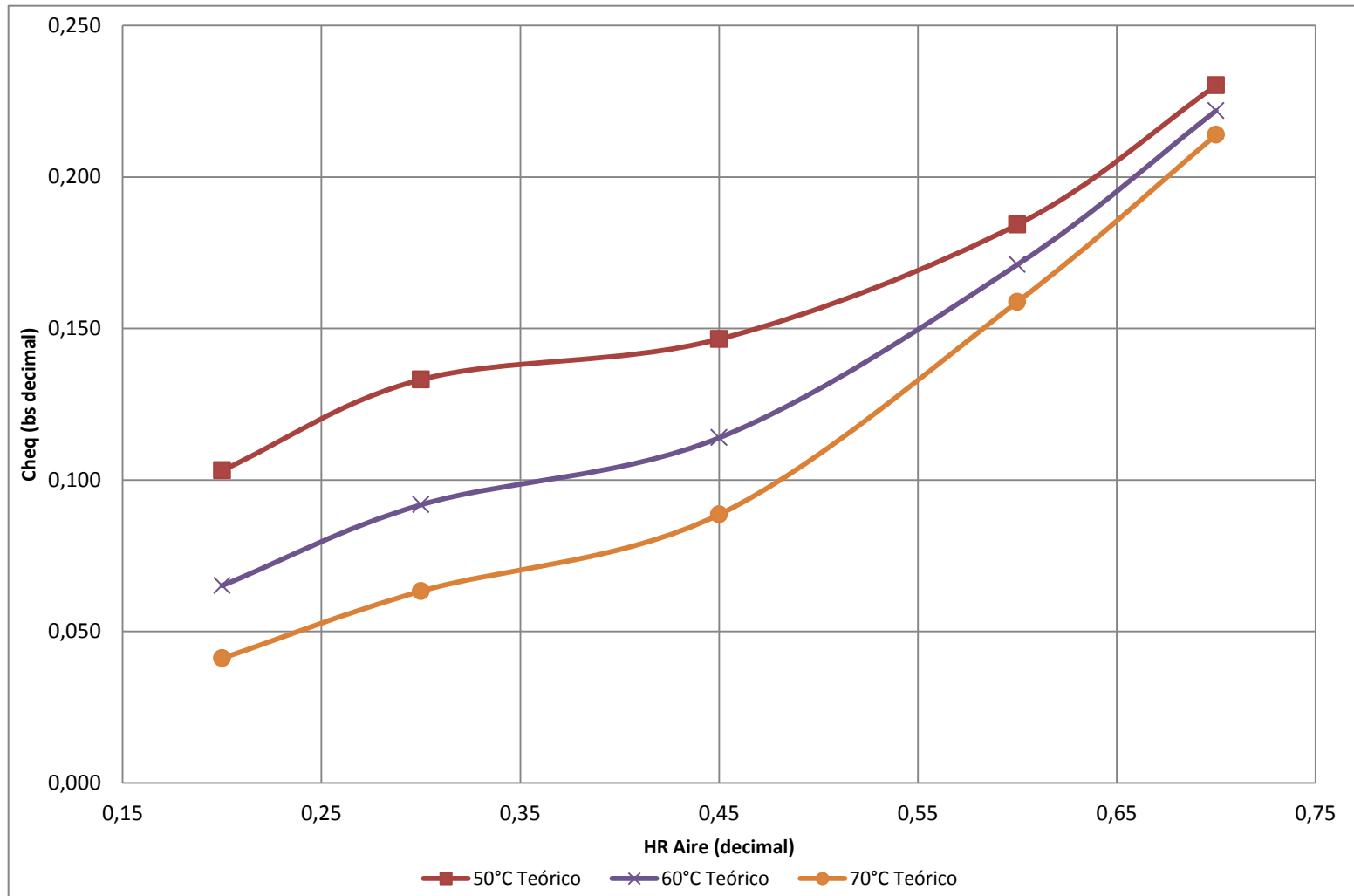


Figura 4.7. Isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sometida a osmodeshidratado generadas a partir del modelo.

**4.1.2. Análisis de la Regresión para el contenido de humedad en equilibrio.**

Se realizó un análisis de regresión lineal consistente en la obtención de un coeficiente de correlación, un análisis de varianza y una prueba t.

Teniendo en cuenta que se realizaron 30 ensayos por pre-tratamiento (uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado), de los cuales se tomaron 15 datos por pre-tratamiento, el valor F tabulado se obtuvo para un intervalo del 95% de confianza y k-1 y 2n-1 grados de libertad, con n= número de datos y k=número de variables, es decir, 1 y 29 grados de libertad. Por su parte el valor t tabulado se lee en una tabla t dos colas para n-k grados de libertad, con n= número de datos y k=número de variables, y un intervalo de confianza del 95%, es decir,  $\alpha=0,05$  y 29 grados de libertad.

**Tabla 4.5.** Estadísticas de regresión para la ecuación de contenido de humedad en equilibrio para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.

|   | <b>Blancos</b> | <b>Escaldado</b> | <b>Osmodeshidratado</b> |
|---|----------------|------------------|-------------------------|
| <b>Prueba T</b>                               | 0,37831        | 0,35155          | 0,49757                 |
| <b>Coefficiente correlación R<sup>2</sup></b> | 0,9880         | 0,98325          | 0,98256                 |
| <b>Coefficiente correlación múltiple</b>      | 0,99398        | 0,99159          | 0,99124                 |
| <b>Error típico</b>                           | 0,00841        | 0,01273          | 0,00837                 |
| <b>Observaciones</b>                          | 15             | 15               | 15                      |
| <b>Análisis de varianza</b>                   | 0,00537        | 0,00872          | 0,00358                 |
| <b>Suma de cuadrados</b>                      | 0,10%          | 0,22%            | 0,09%                   |
| <b>Prueba F</b>                               | 0,95791        | 0,98782          | 0,97965                 |
| <b>Desviación Estándar</b>                    | 0,07328        | 0,09338          | 0,05986                 |

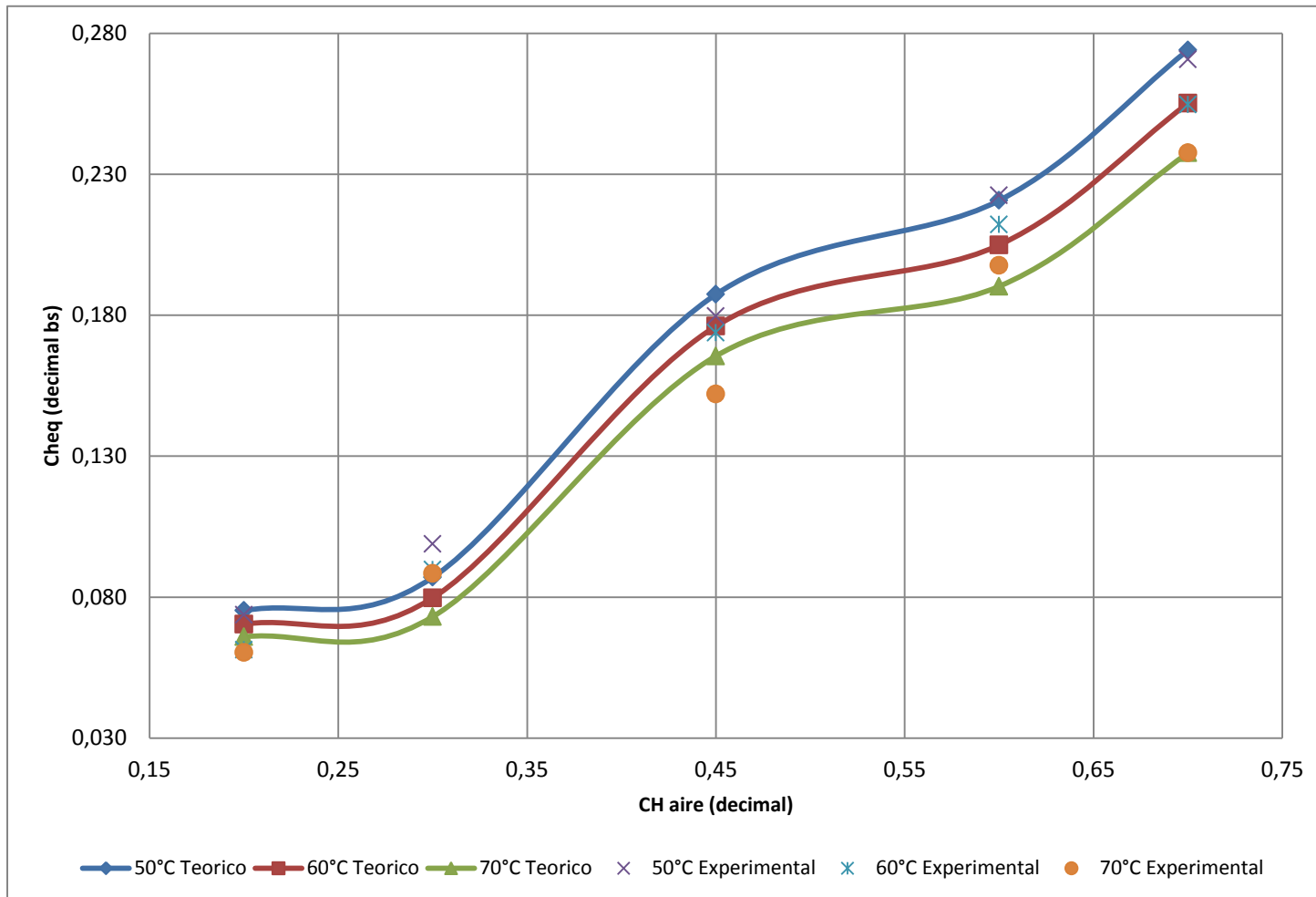
El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para el contenido de humedad en equilibrio (CHEq) para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco) indica que el 98,8% de los valores pueden ser predichos por el modelo generado, el restante 1,2% no se puede explicar con el modelo.



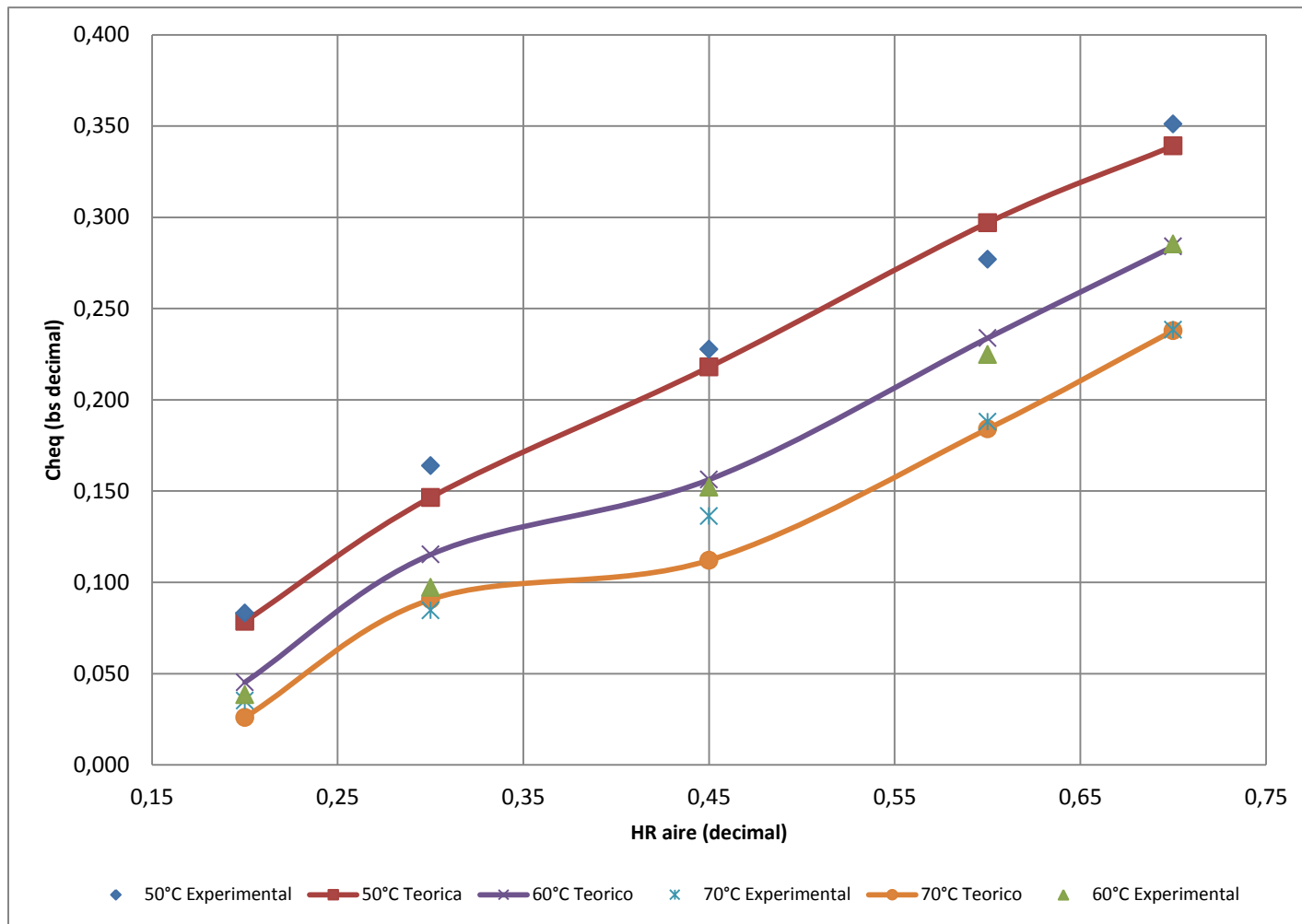
Para la uchuva sometida a escaldado el coeficiente de correlación indica que el 98,3% de los datos pueden ser predichos con el modelo y el 1,7% no se pueden explicar.

Para la uchuva sometida al pre-tratamiento de osmodeshidratado el 98,2% de los datos pueden ser predichos con el modelo y el 1,8% restante no se pueden explicar.

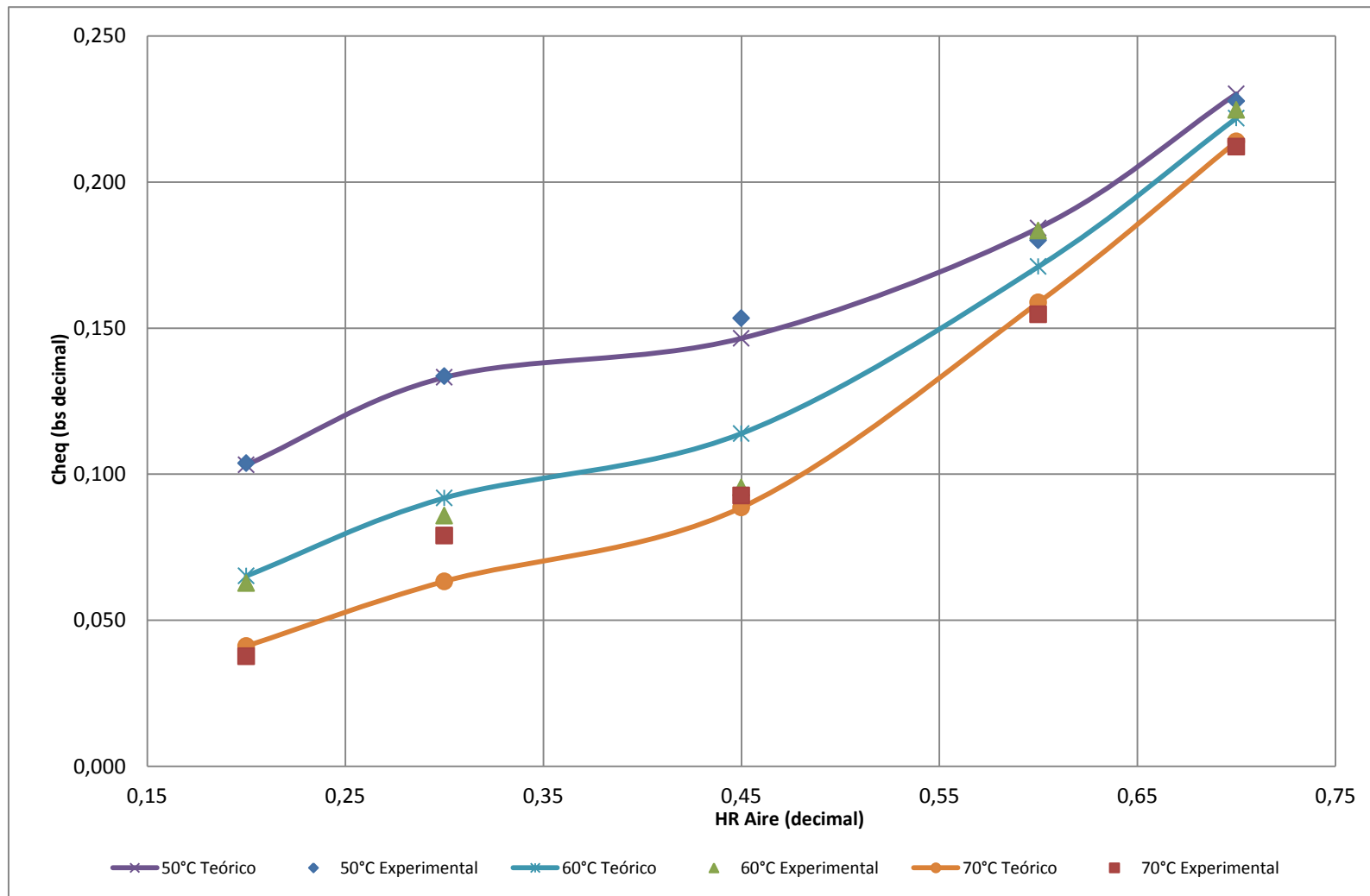
En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran la comparación entre las isotermas experimentales y las teóricas generadas a partir del modelo.



**Figura 4.8.** Comparación de las isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco) generadas a partir del modelo con los valores experimentales.



**Figura 4.9.** Comparación de las isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sometida a escaldado generadas a partir del modelo con los valores experimentales.



**Figura 4.10.** Comparación de las isotermas de contenido de humedad en equilibrio para uchuva sometida a osmodeshidratado generadas a partir del modelo con los valores experimentales.

#### 4.2. ECUACIÓN DE CALOR ESPECÍFICO

Para determinar el calor específico (Cp) de la uchuva en los tres estados, blanco, escaldado y osmodeshidratado, se utilizó un Calorímetro Isoperibólico, por el método de mezclas, cada estado con cuatro contenidos de humedad distintos y a cada contenido de humedad se realizaron dos ensayos en calorímetro.

En las Tablas 4.6, 4.7 y 4.8 se muestran los resultados consolidados de Cp

**Tabla 4.6.** Resultados de calor específico generados para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

| CH (decimal bh) | CH (decimal bs) | Cp (KJ C <sup>-1</sup> *kg <sup>-1</sup> ) | Promedio Cp |
|-----------------|-----------------|--|-------------|
| <b>0,796</b>    | 3,895           | 13,92                                      | 14,54       |
|                 |                 | 15,16                                      |             |
| <b>0,557</b>    | 1,259           | 14,1                                       | 13,4        |
|                 |                 | 12,7                                       |             |
| <b>0,324</b>    | 0,478           | 13,9                                       | 13,2        |
|                 |                 | 12,5                                       |             |
| <b>0,156</b>    | 0,185           | 11,2                                       | 11,5        |
|                 |                 | 11,7                                       |             |

**Tabla 4.7.** Resultados de calor específico generados para uchuva sometida a escaldado.

| CH (decimal bh) | CH (decimal bs) | Cp (KJ C <sup>-1</sup> *kg <sup>-1</sup> ) | Promedio Cp |
|-----------------|-----------------|--|-------------|
| <b>0,784</b>    | 3,630           | 14,22                                      | 13,27       |
|                 |                 | 12,32                                      |             |
| <b>0,538</b>    | 1,164           | 10,11                                      | 10,83       |
|                 |                 | 11,55                                      |             |
| <b>0,307</b>    | 0,442           | 10,77                                      | 11,06       |
|                 |                 | 11,35                                      |             |
| <b>0,123</b>    | 0,140           | 10,85                                      | 10,04       |
|                 |                 | 9,23                                       |             |

**Tabla 4.8.** Resultados de Calor específico generados para uchuva sometida a osmodeshidratado.

| CH (decimal bh) | CH (decimalbs) | Cp (KJ C <sup>-1</sup> *kg <sup>-1</sup> ) | Promedio Cp |
|-----------------|----------------|--|-------------|
| 0,794           | 3,859          | 22,4                                       | 21,07       |
|                 |                | 21   |             |
| 0,492           | 0,970          | 12,3                                       | 11,77       |
|                 |                | 11,24                                      |             |
| 0,254           | 0,340          | 10,4                                       | 9,68        |
|                 |                | 8,96                                       |             |
| 0,135           | 0,156          | 7,95                                       | 7,77        |
|                 |                | 7,59                                       |             |

**4.2.1. Ecuaciones de calor específico para la uchuva sometida a diferentes pre-tratamientos.**

Suponiendo que la relación entre Cp y CH es lineal, se correlacionó la ecuación 3-14

Para ajustar las constantes de la ecuación a partir de los datos experimentales se utilizó la técnica estadística de mínimos cuadrados obteniendo los datos reportados en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9.** Constantes de la ecuación de calor específico para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada, para CH bh y CH bs.

|            |   | Tratamientos realizados |           |                  |
|------------|---|-------------------------|-----------|------------------|
| Parámetros |   | Blanco                  | Escaldado | Osmodeshidratado |
| CH bh      | a | 4,2284                  | 4,317     | 19,554           |
|            | b | 11,222                  | 9,4101    | 4,3849           |
| CH bs      | a | 0,6298                  | 0,8406    | 3,4082           |
|            | b | 12,244                  | 10,17     | 8,0357           |

Por lo tanto las ecuaciones obtenidas son:

- Blanco (producto sin ningún pre-tratamiento):

$$C_p = 0,6298CH + 12,244 \text{ (Ec. 4.4)}$$

- Producto sometido a escaldado:

$$C_p = 0,8406CH + 10,17 \text{ (Ec. 4.5)}$$

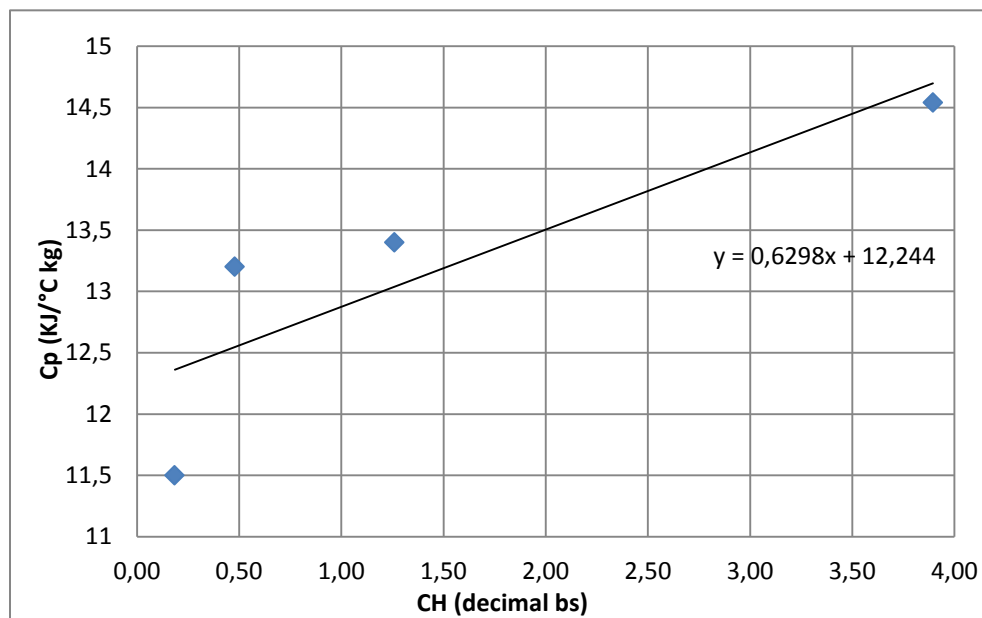
- Producto sometido a osmodeshidratado:

$$C_p = 3,4082CH + 8,0357 \text{ (Ec. 4.6)}$$

En las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6:

- $C_p$ : Calor específico ( $\text{KJ kg}^{-1} \text{ C}^{-1}$ )
- CH: Contenido de Humedad (decimal bs)

En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran las curvas de calor específico de uchuva generadas a partir del modelo para blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldado y osmodeshidratado, respectivamente. Los puntos graficados corresponden al promedio de los valores experimentales obtenidos.



**Figura 4.11.** Curvas de calor específico generadas a partir del modelo para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento).

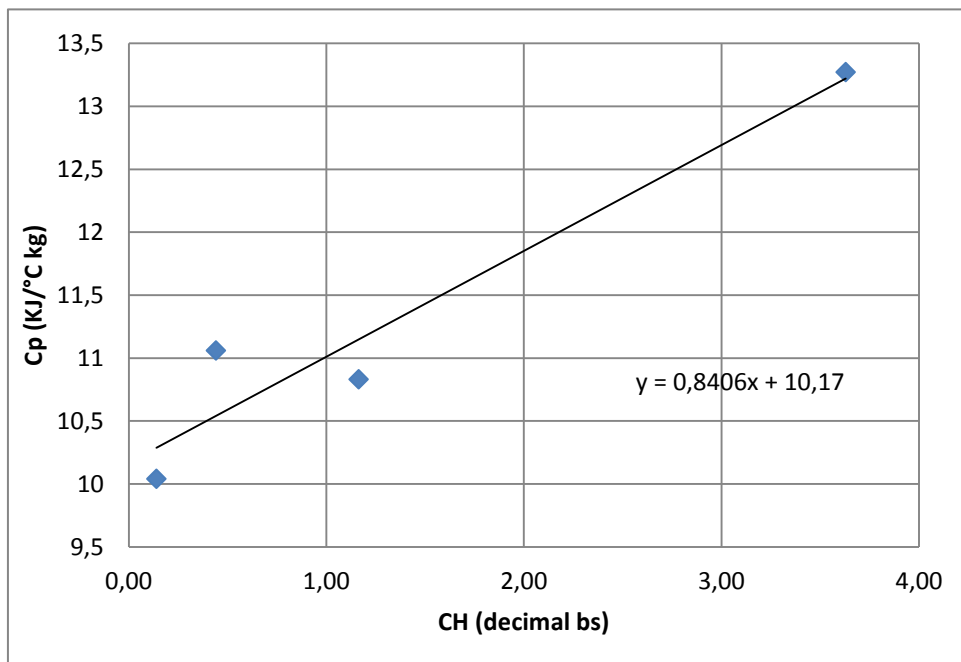


Figura 4.12. Curvas de Calor Específico generadas a partir del modelo para escaldado.

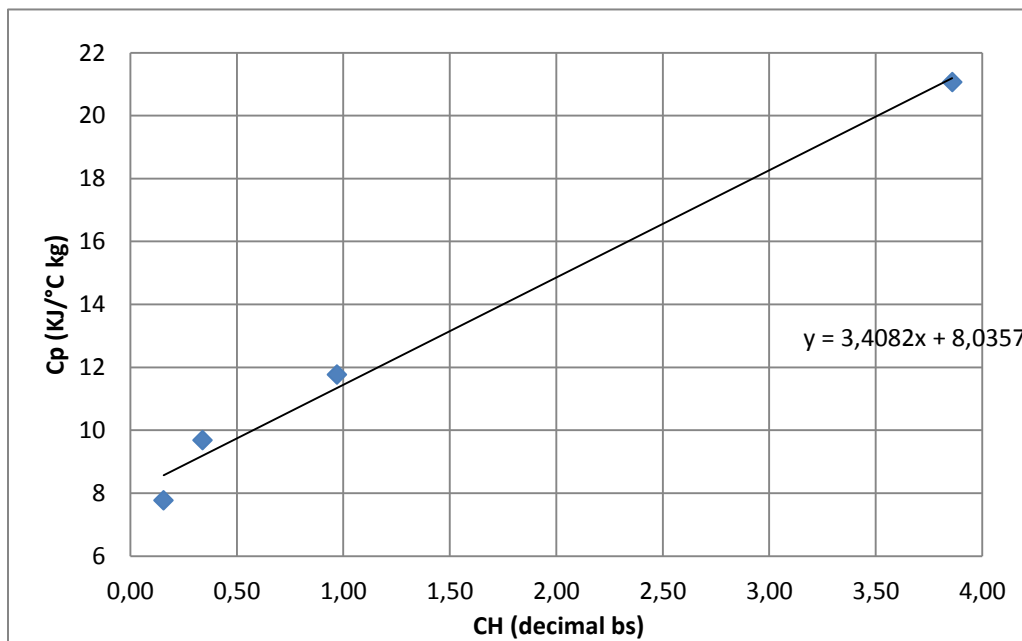


Figura 4.13. Curvas de Calor Específico generadas a partir del modelo para osmodeshidratado.



#### 4.2.2. Análisis de la regresión para el calor específico.

Para estimar el valor de las ecuaciones se hizo un Análisis de Regresión Lineal de los datos obtenidos. Los resultados se muestran en la tabla 4.9.

**Tabla 4.10.** Análisis de regresión lineal de los datos obtenidos para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado, para las ecuaciones de calor específico en función del CH bs.

| Tipo de prueba                   | Blanco  | Escaldado | Osmodeshidratado |
|----------------------------------|---------|-----------|------------------|
| Prueba T                         | 0,5000  | 0,4991    | 0,5000           |
| Coeficiente correlación R2       | 0,9954  | 0,9980    | 0,9971           |
| Coeficiente correlación múltiple | 0,9977  | 0,9990    | 0,9985           |
| Error típico                     | 0,4700  | 0,2688    | 0,4221           |
| Observaciones                    | 4,0000  | 4         | 4                |
| Análisis de varianza             | 38,2206 | 28,1725   | 48,7158          |
| Suma de cuadrados                |         |           |                  |
| Prueba F                         | 0,8641  | 0,8664    | 0,9245           |
| Desviación Estándar              | 5,9860  | 5,1392    | 6,7580           |

El coeficiente de correlación múltiple para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco) es del 99,54%, lo que indica que para esta ecuación esos son los datos que se pueden explicar con el modelo. Para uchuva sometida a escaldado este valor es de 99,8%. Para uchuva sometida a osmodeshidratado es de 99,71%.

En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se puede ver la relación entre los datos experimentales y los datos teóricos para el calor específico de uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado respectivamente.

Los resultados de calor específico encontrados para uchuva sometida a los tratamientos descritos en esta investigación siguen la misma tendencia reportada por diferentes autores (Moreno, 2008; Parra et al, 2008; Villamizar et al, 1986; entre otros) para otros productos agrícolas.

### 4.3. ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE SECADO

Para determinar los parámetros de la ecuación de velocidad de secado (Ec. 3.2) se realizaron los ensayos indicados en el diseño experimental (tres temperaturas y dos velocidades diferentes del aire de secado). Para cada condición se obtuvo una curva de secado registrando el contenido de humedad (CH) en base seca a través del tiempo. La cámara experimental de secado tiene un programa desarrollado especialmente para este proyecto en el cual se registra la variación del peso del producto cada minuto.

En las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran las curvas de secado para cada temperatura y velocidad de aire.

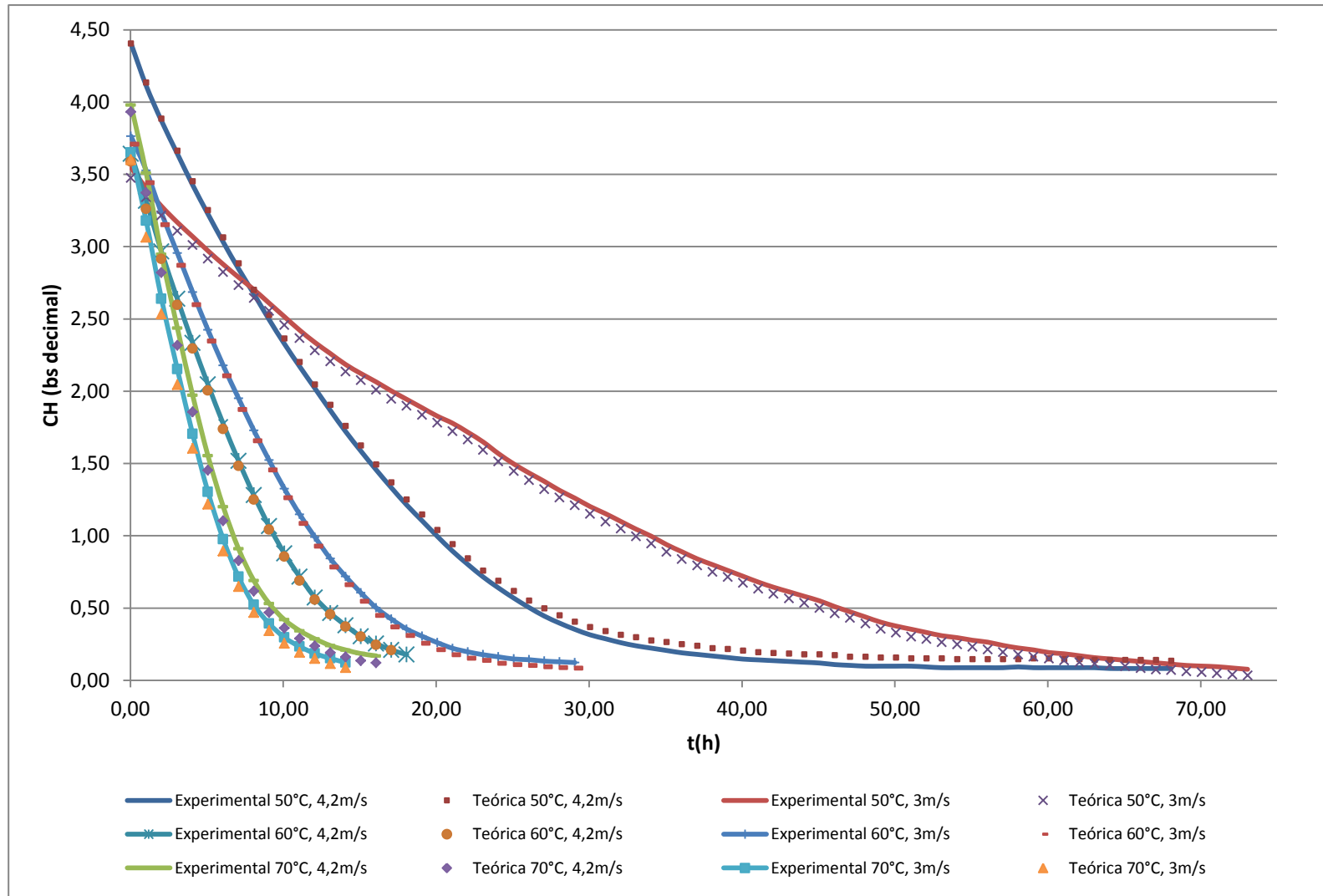


Figura 4.14. Curvas de secado experimentales y teóricas para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

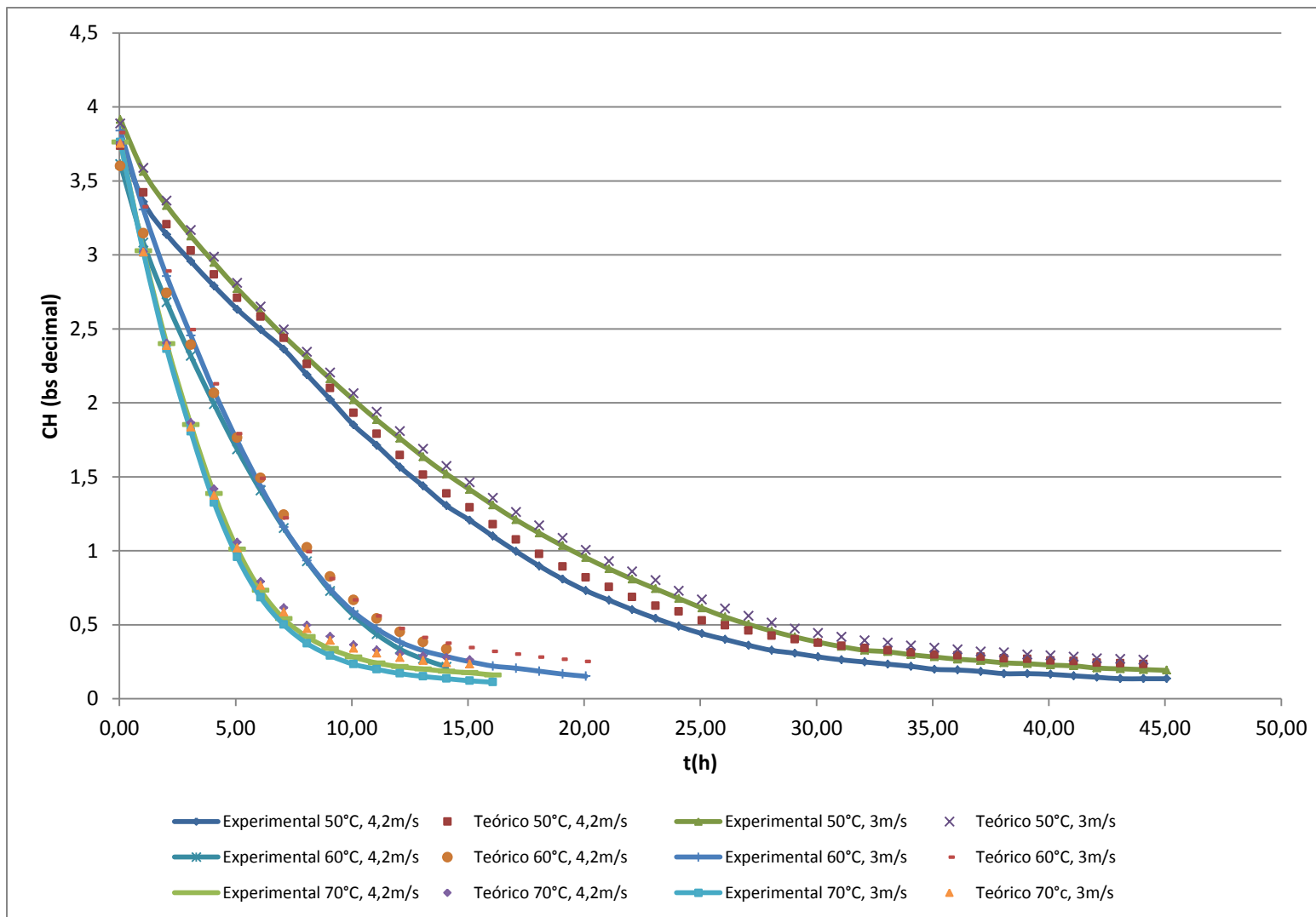


Figura 4.15. Curvas de secado experimentales y teóricas para uchuva sometida a escaldado.

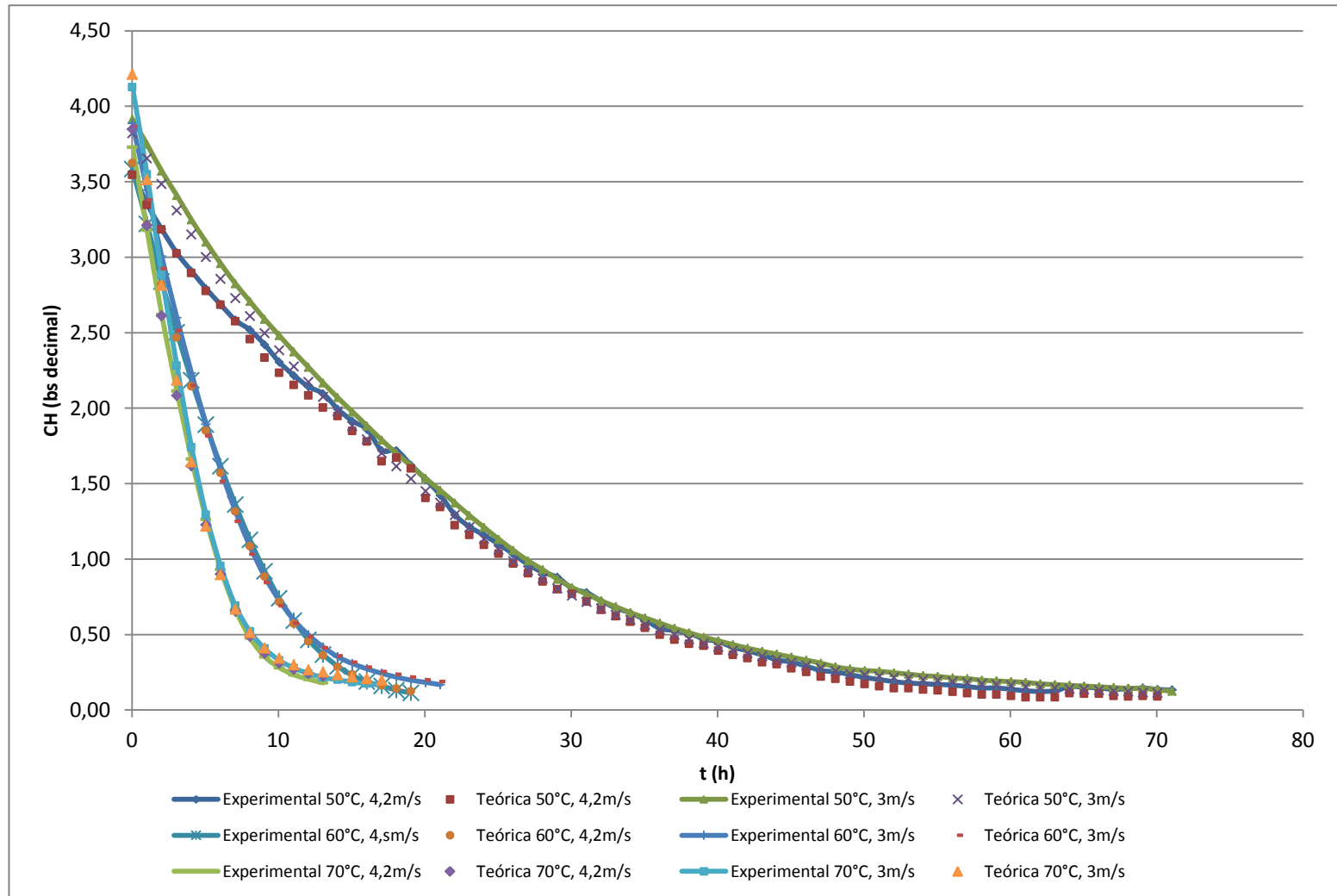


Figura 4.16. Curvas de secado experimentales y teóricas para uchuva osmodeshidratada. FUENTE: EL AUTOR.

**4.3.1. Determinación de los parámetros de la ecuación de velocidad de secado.**

De acuerdo con la metodología descrita en la sección 3.2.2.3 se obtuvieron los valores de las constantes para la Ecuación 3.2 los cuales se presentan en la Tabla 4.11, para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), escaldada y osmodeshidratata.

**Tabla 4.11.** Parámetros generados para la ecuación de velocidad de secado (Ec. 3.2) para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.

| Parámetro            | Tratamientos realizados |            |                  |
|----------------------|-------------------------|------------|------------------|
|                      | BLANCO                  | ESCALDADO  | OSMODESHIDRATADO |
| <b>a<sub>0</sub></b> | 1,8185                  | 1,9061     | 0,38928          |
| <b>a<sub>1</sub></b> | 1,99E-04                | 1,73E-04   | 8,048E-03        |
| <b>a<sub>2</sub></b> | -2,62 E-06              | -3,878E-05 | 3,8E-04          |
| <b>a<sub>3</sub></b> | 2,4 E-04                | 2,94E-04   | -7,92E-04        |
| <b>a<sub>4</sub></b> | 13,5146                 | 4,1694     | 8,9874           |
| <b>a<sub>5</sub></b> | -1,0156                 | -0,3129    | -0,6756          |
| <b>a<sub>6</sub></b> | -0,002252               | 0,01273    | -1,0632          |
| <b>a<sub>7</sub></b> | -0,000272               | 0,00806    | 1,863            |
| <b>a<sub>8</sub></b> | 0,03857                 | 0,03238    | 0,5895           |

Las ecuaciones obtenidas son:

- Uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco):

$$\frac{dM}{dt} = (M - Meq)(1,8185 + 0,000199v - (2,62E - 6) PVS(1 - HR) * M + 0,00024PVS(1 - HR))$$

$$(13,5146 - 1,0156C)(-0,00225 - 0,000271P + 0,0385S)$$

(Ec. 4.7)

- Uchuva sometida a escaldado:

$$\frac{dM}{dt} = (M - Meq)(1,9061 + 0,00017v - (3,87E - 5) PVS(1 - HR) * M + 0,00029PVS(1 - HR))$$

$$(4,1694 - 0,3129C)(0,0127 + 0,0080P + 0,0323S)$$

(Ec. 4.8)

- Uchuva sometida a osmodeshidratado:

$$\frac{dM}{dt} = (M - Meq)(0,3892 + 0,00804v + 0,00038PVS(1 - HR) * M + a_3PVS(1 - HR))$$

$$(8,9874 - 0,6756C)(-1,0632 + 1,8630P + 0,5895S)$$

(Ec. 4.9)

En las ecuaciones 4.7, 4.8 y 4.9 se tiene:

- M: Contenido de humedad del sólido en un instante determinado (b.s. decimal)
- Meq: Contenido de humedad de equilibrio (b.s. decimal)
- HR: Humedad relativa del aire (decimal)
- T: Temperatura del aire (°C).
- PVS: Presión de Vapor de Saturación (Pa).
- v: Velocidad de aire (m s<sup>-1</sup>).
- C: Carga del sólido (kg m<sup>2</sup>).

#### 4.3.2. Análisis de la regresión para la ecuación de velocidad de secado.

Para estimar la validez de las ecuaciones obtenidas se compararon los datos experimentales con los datos generados por el modelo mediante un análisis de regresión lineal. Los resultados se presentan en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12.** Análisis de regresión lineal para los datos obtenidos de velocidad de secado para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.

|   | <b>Blanco</b> | <b>Escaldada</b> | <b>Osmodeshidratada</b> |
|---|---------------|------------------|-------------------------|
| <b>Prueba T</b>                               | 0,1707        | 0,0662           | 0,1686                  |
| <b>Coefficiente correlación R<sup>2</sup></b> | 0,9978        | 0,9908           | 0,9989                  |
| <b>Coefficiente correlación múltiple</b>      | 0,9989        | 0,9954           | 0,9995                  |
| <b>Error típico</b>                           | 0,0495        | 0,0964           | 0,0340                  |
| <b>Análisis de varianza</b>                   | 1,1069        | 1,0265           | 1,0666                  |
| <b>Suma de cuadrados</b>                      | 6,8559        | 11,7908          | 3,6304                  |
| <b>Prueba F</b>                               | 0,3393        | 0,5882           | 0,6695                  |
| <b>Desviación Estándar</b>                    | 1,0521        | 1,0132           | 1,0328                  |

El coeficiente de correlación R<sup>2</sup> para blanco es de 0,9978, lo que indica que el 99,78% de los datos obtenidos para velocidad de secado se pueden explicar con el modelo generado, para escaldado el 99,08% de los datos obtenidos se pueden explicar con el modelo generado y para osmodeshidratado el 99,89% de los datos obtenidos se pueden explicar con el modelo generado.

Al observar los datos del análisis de regresión lineal realizado a los datos generados y obtenidos se concluye que la correlación de los datos es adecuada y el modelo matemático generado explica muy bien el comportamiento del deshidratado de la uchuva en blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.

#### 4.4. ECUACIÓN DE CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN

Para la obtención de la ecuación del calor latente de vaporización se siguió la metodología descrita por Brooker (1992). A partir de las ecuaciones 2.11 y 2.12 se puede calcular la relación de calores latentes de vaporización.

Los datos generados se encuentran consignados en las Tablas 4.13, 4.14 y 4.15 para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), escaldada y osmodeshidratada, respectivamente, para la relación de calores latentes de vaporización en función del contenido de humedad de la uchuva.



**Tabla 4.13.** Calculo de la relación de calor latente de vaporización para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

| CH (% bh) | CH (% bs) | T(°C) | Pvs (Pa) | HR (Decimal) | hfg'/hfg |
|-----------|-----------|-------|----------|--------------|----------|
| 7         | 7,53      | 50    | 12,23    | 0,20         | 3,36     |
| 7         | 7,53      | 70    | 30,88    | 0,31         |          |
| 8         | 8,70      | 50    | 12,23    | 0,30         | 2,55     |
| 8         | 8,70      | 70    | 30,88    | 0,33         |          |
| 9         | 9,89      | 50    | 12,23    | 0,32         | 2,54     |
| 9         | 9,89      | 70    | 30,88    | 0,35         |          |
| 10        | 11,11     | 50    | 12,23    | 0,33         | 2,56     |
| 10        | 11,11     | 70    | 30,88    | 0,36         |          |
| 11        | 12,36     | 50    | 12,23    | 0,36         | 2,48     |
| 11        | 12,36     | 70    | 30,88    | 0,38         |          |
| 12        | 13,64     | 50    | 12,23    | 0,37         | 2,48     |
| 12        | 13,64     | 70    | 30,88    | 0,39         |          |
| 13        | 14,94     | 50    | 12,23    | 0,40         | 2,47     |
| 13        | 14,94     | 70    | 30,88    | 0,42         |          |
| 14        | 16,28     | 50    | 12,23    | 0,42         | 2,48     |
| 14        | 16,28     | 70    | 30,88    | 0,45         |          |
| 15        | 17,65     | 50    | 12,23    | 0,43         | 2,46     |
| 15        | 17,65     | 70    | 30,88    | 0,49         |          |
| 16        | 19,05     | 50    | 12,23    | 0,46         | 2,46     |
| 16        | 19,05     | 70    | 30,88    | 0,60         |          |
| 17        | 20,48     | 50    | 12,23    | 0,47         | 2,45     |
| 17        | 20,48     | 70    | 30,88    | 0,64         |          |
| 18        | 21,95     | 50    | 12,23    | 0,60         | 2,44     |
| 18        | 21,95     | 70    | 30,88    | 0,69         |          |
| 19        | 23,46     | 50    | 12,23    | 0,63         | 2,43     |
| 19        | 23,46     | 70    | 30,88    | 0,70         |          |
| 20        | 25,00     | 50    | 12,23    | 0,66         | 2,39     |
| 20        | 25,00     | 70    | 30,88    | 0,71         |          |

**Tabla 4.14.** Calculo de la relación de Calor Latente de Vaporización para uchuva sometida a escaldado.

| CH (% bh) | CH (% bs) | T(°C) | Pvs (Pa) | HR (Decimal) | hfg'/hfg |
|-----------|-----------|-------|----------|--------------|----------|
| 7         | 7,53      | 50    | 12,23    | 0,19         | 2,54     |
| 7         | 7,53      | 70    | 30,88    | 0,79         |          |
| 8         | 8,70      | 50    | 12,23    | 0,22         | 5,24     |
| 8         | 8,70      | 70    | 30,88    | 11,32        |          |
| 9         | 9,89      | 50    | 12,23    | 0,20         | 1,76     |
| 9         | 9,89      | 70    | 30,88    | 0,39         |          |
| 10        | 11,11     | 50    | 12,23    | 0,22         | 1,76     |
| 10        | 11,11     | 70    | 30,88    | 0,45         |          |
| 11        | 12,36     | 50    | 12,23    | 0,25         | 1,72     |
| 11        | 12,36     | 70    | 30,88    | 0,48         |          |
| 12        | 13,64     | 50    | 12,23    | 0,28         | 1,67     |
| 12        | 13,64     | 70    | 30,88    | 0,51         |          |
| 13        | 14,94     | 50    | 12,23    | 0,31         | 1,61     |
| 13        | 14,94     | 70    | 30,88    | 0,54         |          |
| 14        | 16,28     | 50    | 12,23    | 0,34         | 1,56     |
| 14        | 16,28     | 70    | 30,88    | 0,56         |          |
| 15        | 17,65     | 50    | 12,23    | 0,37         | 1,51     |
| 15        | 17,65     | 70    | 30,88    | 0,59         |          |
| 16        | 19,05     | 50    | 12,23    | 0,39         | 1,47     |
| 16        | 19,05     | 70    | 30,88    | 0,61         |          |
| 17        | 20,48     | 50    | 12,23    | 0,42         | 1,43     |
| 17        | 20,48     | 70    | 30,88    | 0,63         |          |
| 18        | 21,95     | 50    | 12,23    | 0,45         | 1,40     |
| 18        | 21,95     | 70    | 30,88    | 0,66         |          |
| 19        | 23,46     | 50    | 12,23    | 0,48         | 1,39     |
| 19        | 23,46     | 70    | 30,88    | 0,69         |          |

**Tabla 4.15.** Calculo de la relación de Calor Latente de Vaporización para uchuva sometida a osmodeshidratado.

| CH (% bh) | CH (% bs) | T(°C) | Pvs (Pa) | HR (Decimal) | hfg'/hfg |
|-----------|-----------|-------|----------|--------------|----------|
| 7         | 7,53      | 50    | 12,23    | 0,16         | 1,31     |
| 7         | 7,53      | 70    | 30,88    | 0,21         |          |
| 8         | 8,70      | 50    | 12,23    | 0,17         | 1,34     |

|    |       |    |       |      |      |
|----|-------|----|-------|------|------|
| 8  | 8,70  | 70 | 30,88 | 0,24 |      |
| 9  | 9,89  | 50 | 12,23 | 0,19 | 1,38 |
| 9  | 9,89  | 70 | 30,88 | 0,27 |      |
| 10 | 11,11 | 50 | 12,23 | 0,21 | 1,48 |
| 10 | 11,11 | 70 | 30,88 | 0,33 |      |
| 11 | 12,36 | 50 | 12,23 | 0,23 | 1,72 |
| 11 | 12,36 | 70 | 30,88 | 0,46 |      |
| 12 | 13,64 | 50 | 12,23 | 0,26 | 1,76 |
| 12 | 13,64 | 70 | 30,88 | 0,53 |      |
| 13 | 14,94 | 50 | 12,23 | 0,30 | 1,70 |
| 13 | 14,94 | 70 | 30,88 | 0,57 |      |
| 14 | 16,28 | 50 | 12,23 | 0,36 | 1,54 |
| 14 | 16,28 | 70 | 30,88 | 0,60 |      |
| 15 | 17,65 | 50 | 12,23 | 0,49 | 1,25 |
| 15 | 17,65 | 70 | 30,88 | 0,62 |      |
| 16 | 19,05 | 50 | 12,23 | 0,56 | 1,16 |
| 16 | 19,05 | 70 | 30,88 | 0,64 |      |
| 17 | 20,48 | 50 | 12,23 | 0,60 | 1,11 |
| 17 | 20,48 | 70 | 30,88 | 0,66 |      |
| 18 | 21,95 | 50 | 12,23 | 0,63 | 1,08 |
| 18 | 21,95 | 70 | 30,88 | 0,68 |      |
| 19 | 23,46 | 50 | 12,23 | 0,67 | 1,06 |
| 19 | 23,46 | 70 | 30,88 | 0,71 |      |

#### 4.4.1. Determinación de los parámetros de la ecuación de calor latente de vaporización.

La ecuación para correlacionar los datos del contenido de humedad y la relación de calores latente de vaporización tiene la forma exponencial descrita en la ecuación 2.14

En la Tabla 4.16 se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el numeral 3.2.2.4.

**Tabla 4.16.** Constantes estimadas para la ecuación de calor latente de vaporización para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.

| Parámetros | TRATAMIENTOS |           |                  |
|------------|--------------|-----------|------------------|
|            | Blanco       | Escaldado | Osmodeshidratado |
| $\alpha$   | 1,987        | 2,795     | 0,673            |
| $\beta$    | 1,536        | 10        | 6,854            |

La relación de Calor Latente de Vaporización está dada por:

- Uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco):

$$\frac{h_{fg'}}{h_{fg}} = 1 + 1,987 \exp(-1,536 M) \text{ (Ec. 4.10)}$$

Para calcular el calor latente de vaporización para el agua pura ( $h_{fg}$ ) se puede utilizar la ecuación de Thompson (2.13)

$$h_{fg} = 2500,3 - 2,09T \text{ (Ec. 2.13)}$$

En donde:

- $h_{fg}$ : Calor latente de vaporización del agua pura ( $\text{KJ kg}^{-1}$ )
- T: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Por lo tanto la ecuación de calor latente de vaporización para la uchuva sin ningún pre-tratamiento, es:

$$h_{fg'} = (2500,3 - 2,09T)(1 + 1,987 \exp(-1,536 M)) \text{ (Ec. 4.11)}$$

- Ecuación de calor latente de vaporización para uchuva escaldada:

$$h_{fg'} = (2500,3 - 2,09T)(1 + 2,795 \exp(-10 M)) \text{ (Ec. 4.12)}$$

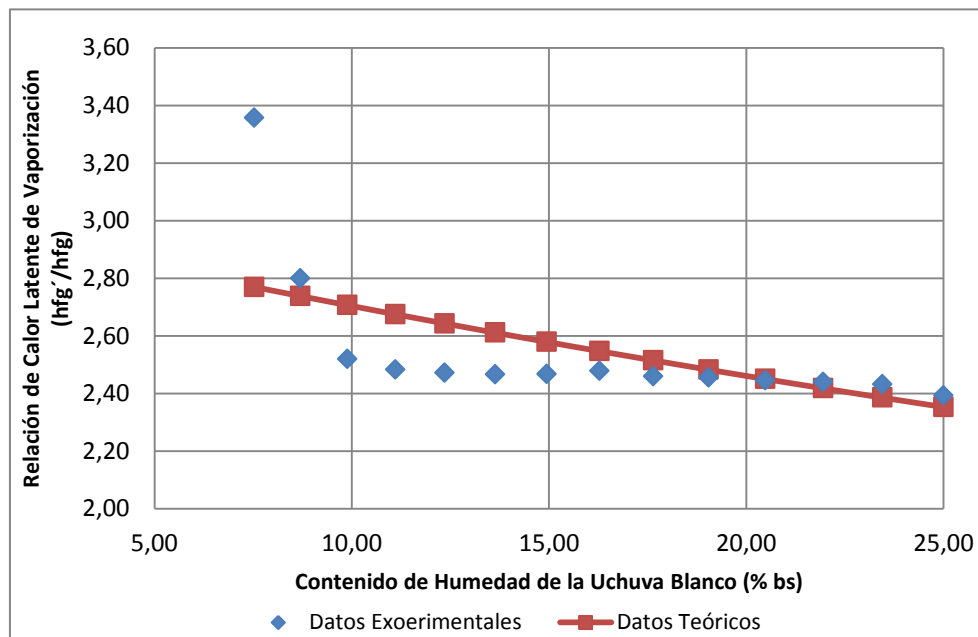
- Ecuación de calor latente de vaporización para uchuva osmodeshidratada:

$$h_{fg'} = (2500,3 - 2,09T)(1 + 0,673 \exp(-6,854 M)) \text{ (Ec. 4.13)}$$

En las ecuaciones 4.11 a 4.13 se tiene:

- $h_{fg'}$ : Calor latente de vaporización del agua contenida en la uchuva ( $\text{KJ kg}^{-1}$ ).
- T: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- M: Contenido de humedad de la uchuva (decimal bs)

En las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran los datos experimentales y los datos generados por el modelo matemático, para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada, respectivamente.



**Figura 4.17.** Comparación entre los datos experimentales y calculados para la relación de calor latente de vaporización de uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

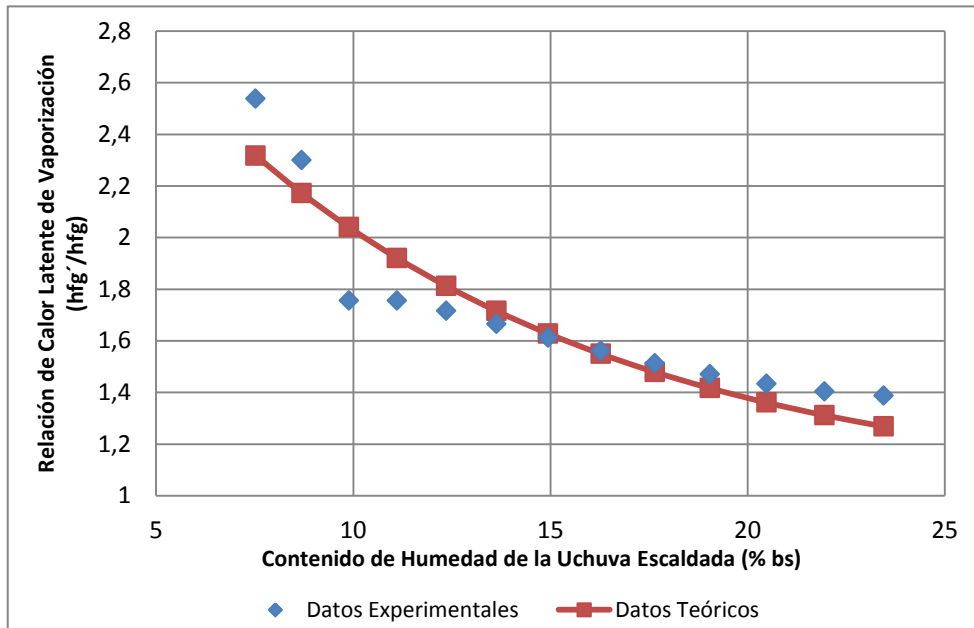


Figura 4.18. Comparación entre los datos experimentales y calculados para la relación de Calor Latente de Vaporización de Uchuva sometida a escaldado.

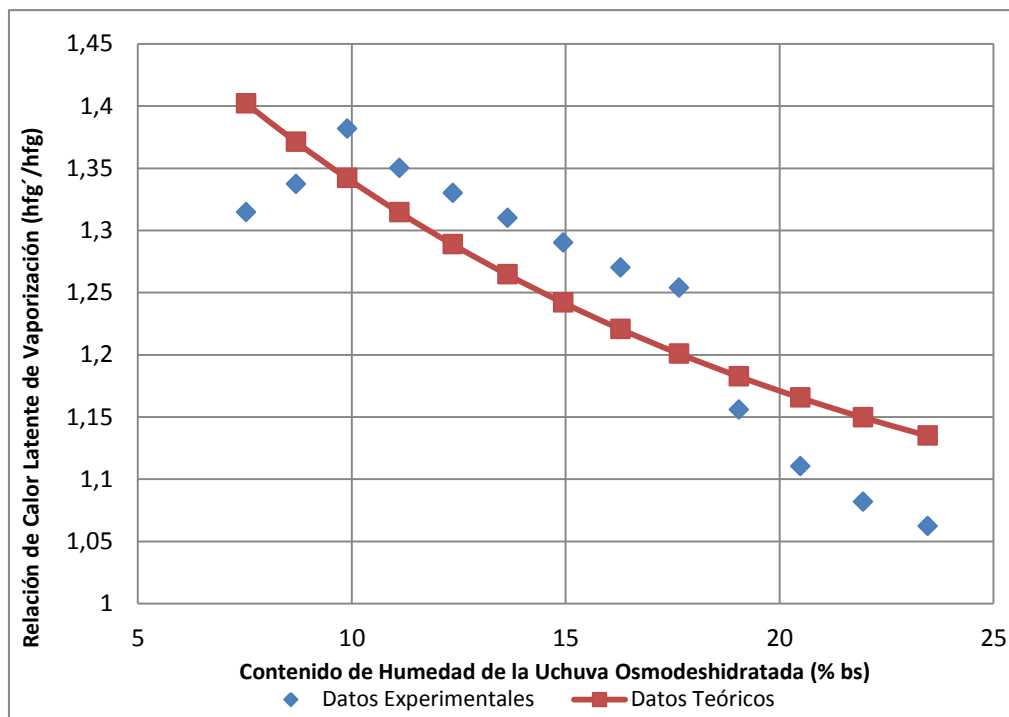


Figura 4.19. Comparación entre los datos experimentales y calculados para la relación de calor latente de vaporización de uchuva sometida a osmodeshidratado.

**4.4.2. Análisis de la regresión para la ecuación de calor latente de vaporización.**

Para determinar la validez de las ecuaciones obtenidas por medio de los datos experimentales, se realizó un análisis de regresión lineal. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.17.

El coeficiente de correlación  $R^2$  para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco) es del 99,97%, lo que indica que para esa ecuación esos son los datos que se pueden explicar con el modelo. Para uchuva escaldada este valor es de 99,99% y para uchuva osmodeshidratada es de 99,99%.

**Tabla 4.17.** Análisis de Regresión Lineal para los datos obtenidos de Calor Latente de Vaporización para uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.

|  | <b>Blanco</b> | <b>Escaldado</b> | <b>Osmodeshidratado</b> |
|--|---------------|------------------|-------------------------|
| <b>Prueba T</b>                          | 0,3869        | 0,4018           | 0,4356                  |
| <b>Coefficiente correlación R2</b>       | 0,9997        | 0,9999           | 0,99998                 |
| <b>Coefficiente correlación múltiple</b> | 0,9999        | 0,9999           | 0,99999                 |
| <b>Error típico</b>                      | 0,1378        | 0,0949           | 0,0390                  |
| <b>Observaciones</b>                     | 14            | 14               | 14                      |
| <b>Análisis de varianza</b>              | 59,9896       | 58,7916          | 61,8476                 |
| <b>Suma de cuadrados</b>                 | 0,5129        | 0,2171           | 0,0366                  |
| <b>Prueba F</b>                          | 0,9958        | 0,9980           | 0,9994                  |
| <b>Desviación Estándar</b>               | 7,7453        | 7,6676           | 7,8643                  |

En las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se pueden observar las relaciones entre los datos experimentales y los datos teóricos generados a partir del modelo matemático, para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), escaldada y osmodeshidratada.

#### **4.5. SIMULACIÓN MATEMÁTICA REALIZADA CON LOS PARÁMETROS ENCONTRADOS.**

A partir de los parámetros generados para la simulación matemática de cada una de las condiciones estudiadas es posible realizar un análisis de las principales variables de operación del deshidratado. En esta sección se utilizan estas ecuaciones generadas para predecir el comportamiento del deshidratado de la uchuva en blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada.

##### **4.5.1. Influencia de la temperatura y de la velocidad del aire en la velocidad de secado**

En las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se observa la influencia de la temperatura en la velocidad de secado para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), escaldada y osmodeshidratada, respectivamente. A medida que la temperatura del aire aumenta la velocidad de secado aumenta y el tiempo de residencia en el proceso de deshidratado se hace más corto.

En la Tabla 4.18 se tienen los diferentes tiempos de deshidratado de la uchuva con los distintos pre-tratamientos aplicados en esta investigación, donde se puede observar una disminución sustancial en los tiempos de residencia en el proceso a medida que se aumenta la temperatura de operación.



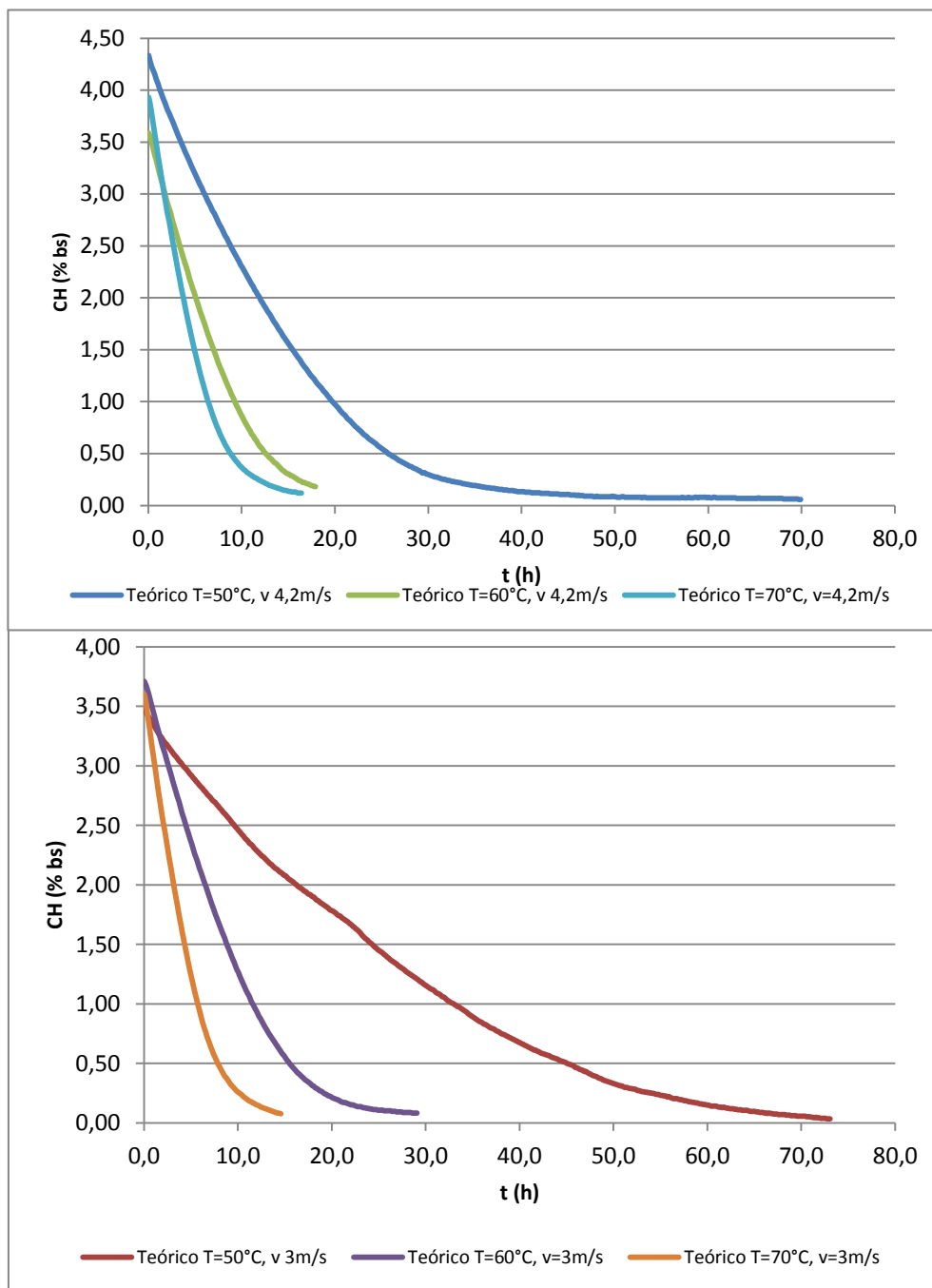


Figura 4.20. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

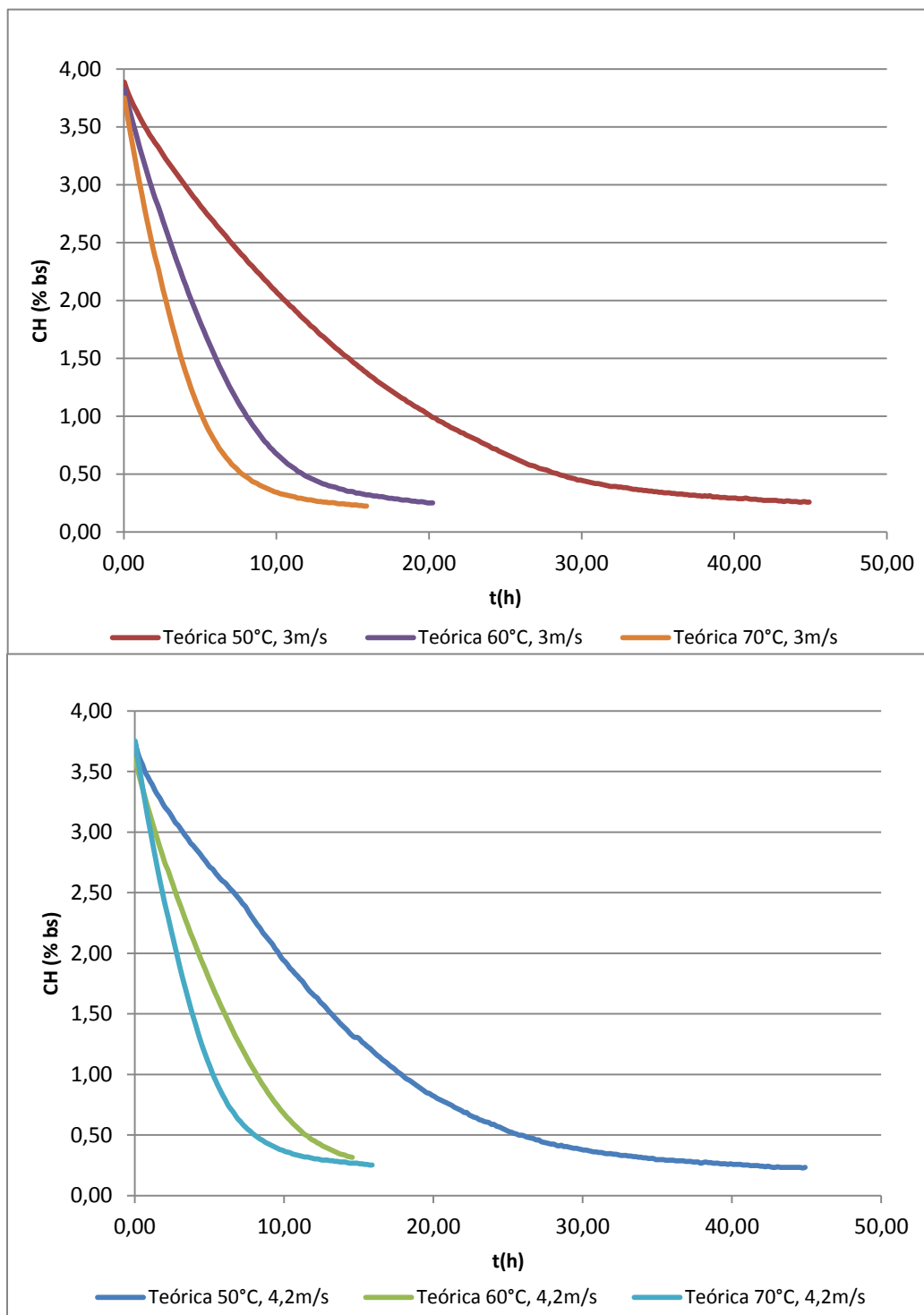
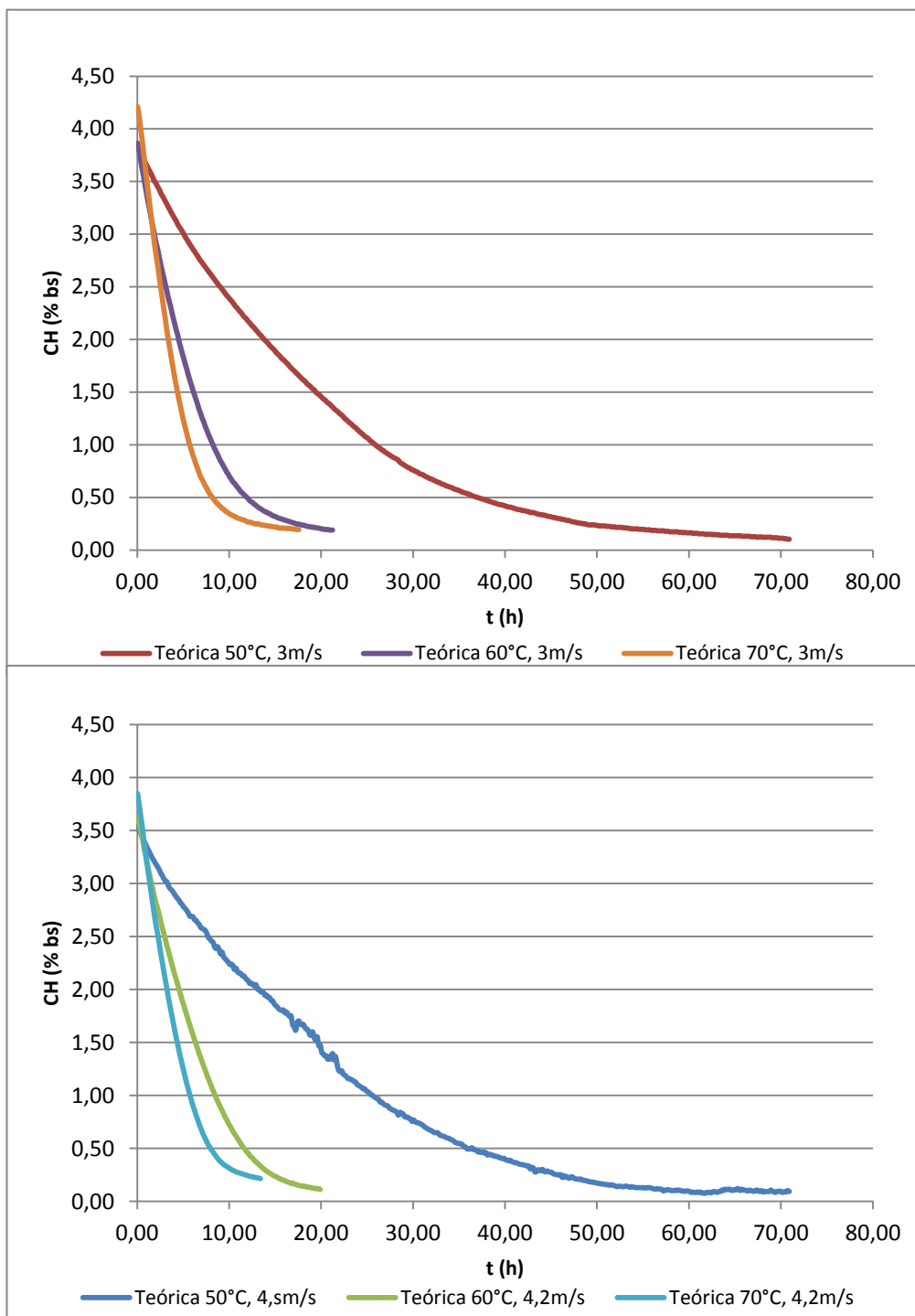


Figura 4.21. Influencia de la temperatura en la velocidad de secado para uchuva escaldada.



**Figura 4.22.** Influencia de la temperatura en la velocidad de secado para uchuva osmodeshidratada.

**Tabla 4.18.** Influencia de la temperatura y de la velocidad del aire en la velocidad de secado de uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldado y osmodeshidratado.

| T (°C)<br>v (m/s) | Blanco  |         |         | Escaldado |         |         | Osmodeshidratado |         |         |
|-------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|------------------|---------|---------|
|                   | 50      | 60      | 70      | 50        | 60      | 70      | 50               | 60      | 70      |
| 4,2               | 70,18 h | 18,07 h | 16,57 h | 45,07 h   | 18,24 h | 16,07 h | 71,07 h          | 20,07 h | 13,57 h |
| 3                 | 73,24 h | 29,24 h | 14,74 h | 45,07     | 20,41 h | 16,07 h | 71,07 h          | 21,41 h | 17,74 h |

En la Tabla 4.18 se observa la influencia de la velocidad del aire. Las velocidades de aire evaluadas fueron de 3 y 4,2 m\*s<sup>-1</sup>. Cuando se aumenta la velocidad del aire la reducción del tiempo de residencia en el proceso de deshidratación no es significativo, lo cual se puede corroborar con el parámetro adimensional que acompaña a la velocidad de secado en la ecuación de velocidad de secado (ver Tabla 4.11 parámetro a<sub>1</sub>). Este parámetro es muy pequeño lo que indica que la velocidad del aire no tiene mucha influencia en la velocidad de secado.

#### 4.5.2. Condiciones de operación

Los resultados obtenidos y las simulaciones realizadas muestran que los tiempos de residencia en deshidratación de la uchuva con los diferentes pre-tratamientos evaluados están influenciados por la temperatura, y en menor medida, por la velocidad del aire, lo cual coincide con el trabajo realizado por Moreno (2008) en almidón de yuca aplicando el mismo modelo matemático, además mediante la simulación matemática del proceso de deshidratación se pueden recomendar algunas condiciones de operación.

Para ello se pueden analizar los resultados y recomendar algunas combinaciones de las variables que tienen más influencia dentro del proceso.

En la Tabla 4.19 se recomiendan algunas condiciones para la deshidratación de la uchuva con los diferentes pre-tratamientos. Para ello se hizo una simulación con las ecuaciones obtenidas variando la temperatura de 55 a 70°C con variación cada 5°C.

**Tabla 4.19.** Condiciones recomendadas de operación del deshidratado de uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldado y osmodeshidratado.

| Parámetro              | TRATAMIENTO                                |                          |                          |
|------------------------|--|--------------------------|--------------------------|
|                        | BLANCO                                     | ESCALDADO                | OSMODESHIDRATADO         |
| Tipo de secado         | Secado con aire caliente en flujo paralelo |                          |                          |
| Temperatura            | 60°C                                       | 60°C                     | 60°C                     |
| Velocidad de aire      | 3 m*s <sup>-1</sup>                        | 3 m*s <sup>-1</sup>      | 3 m*s <sup>-1</sup>      |
| Carga                  | 13,3 kg *m <sup>-2</sup>                   | 13,3 kg *m <sup>-2</sup> | 13,3 kg *m <sup>-2</sup> |
| Diámetro uchuva        | Entre 18 a 23 mm                           | Entre 18 a 23 mm         | Entre 18 a 23 mm         |
| Humedad inicial        | 80% bh aprox.                              | 80% bh aprox.            | 80% bh aprox.            |
| Humedad Final          | Entre 14 y 15% bh                          | Entre 14 y 15% bh        | Entre 14 y 15% bh        |
| Tiempo de deshidratado | 29 h aprox.                                | 20 h aprox.              | 21 h aprox.              |

Cabe anotar que las condiciones de operación se deben optimizar de acuerdo con los costos de operación del proceso, para ello se debe hacer una relación costo/beneficio entre productividad y costo de operación.

#### 4.6. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS

En la Tabla 4.20 se presentan algunos de los análisis físico-químicos realizados durante el desarrollo del proyecto. En ellos se observa que el grado de madurez de la fruta siempre se mantuvo en 6, que según la Norma Técnica Colombiana NTC 4580 (ICONTEC, 1999) este factor indica que la fruta se encuentra en el punto óptimo para su consumo. Como se observa en la Tabla 4.20 el grado de madurez para los ensayos se mantuvo en este valor.

**Tabla 4.20.** Análisis físico-químicos realizados a la fruta antes del proceso de deshidratado.

| FECHA                  | INDICE DE ACIDEZ (%ac cítrico) | SST (°Brix) | SST <sub>CORR</sub> | INDICE DE MADUREZ | GRADO DE MADUREZ |
|------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 7-11 de febrero 2011   | 1.342                          | 14          | 14.104              | 10.513            | 6                |
| 14- 18 de febrero 2011 | 1.392                          | 15          | 15.108              | 10.854            | 6                |
| 21-25 de febrero 2011  | 1.217                          | 14          | 14.094              | 11.583            | 6                |
| 1-11 de marzo 2011     | 0.937                          | 14          | 14.073              | 15.015            | 6                |

|                            |        |    |        |        |   |
|----------------------------|--------|----|--------|--------|---|
| <b>21-25 de marzo 2011</b> | 0.936  | 12 | 12.073 | 12.898 | 6 |
| <b>4-8 de abril 2011</b>   | 1.120  | 14 | 14.087 | 12.578 | 6 |
| <b>11-15 de abril 2011</b> | 1.563  | 14 | 14.121 | 9.038  | 6 |
| <b>18-22 de abril 2011</b> | 1.251  | 14 | 14.097 | 11.273 | 6 |
| <b>2- 6 mayo 2011</b>      | 1,4592 | 16 | 16,283 | 11,158 | 6 |

En el apartado 3.3.3 se describe el procedimiento experimental para la determinación de cada uno de los factores que componen la Tabla 4.19, en donde la acidez titulable se expresa en % de ácido cítrico y se calcula mediante la ecuación 3.6. Los SST (°Brix) es la medida que arroja el refractómetro. La corrección aplicada a esta medida se realiza mediante la ecuación 3.7. El índice de madurez se calcula mediante la ecuación 3.8, y expresa los estados identificados en la tabla de color (Figura 1.2).

#### 4.7. RESULTADOS ANÁLISIS DE TEXTURA, ACTIVIDAD DE AGUA Y COLORIMETRIA

Los resultados de textura, actividad de agua (Aw) y colorimetría se le realizaron a 12 muestras con las características que se muestran en la Tabla 4.21.

**Tabla 4.21.** Lista de Ensayos a los cuales se les realizó las medidas de textura, actividad de agua y colorimetría.

|                               | <b>T (°C)</b> | <b>Fecha ensayo</b> | <b>CH in (%bh)</b> | <b>CH fin (% bh)</b> |
|-------------------------------|---------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| <b>M1- Blanco</b>             | 60            | Abril 26-11         | 78,46              | 15,15                |
| <b>M2 - Blanco</b>            | 70            | Abril 25-11         | 77,42              | 12,27                |
| <b>M3 - Escaldado</b>         | 60            | Abril 28-11         | 78,32              | 15,72                |
| <b>M4 - Escaldado</b>         | 70            | Abril 27-11         | 78,09              | 13,88                |
| <b>M5 - Osmodeshidratato</b>  | 70            | Abril 29-11         | 80,01              | 14,54                |
| <b>M6 - Osmodeshidratato</b>  | 60            | Abril 30-11         | 80,01              | 10,93                |
| <b>M7 - Escaldado</b>         | 60            | Dic 03-10           | 78,65              | 12,55                |
| <b>M8 - escaldado</b>         | 70            | Oct 27-10           | 79                 | 13,8                 |
| <b>M9 - Blanco</b>            | 70            | Sep 30-10           | 79,9               | 13,75                |
| <b>M10- Blanco</b>            | 60            | Sep 08-10           | 79,12              | 12,82                |
| <b>M11 - Osmodeshidratato</b> | 60            | Feb 16-11           | 78,18              | 15,165               |
| <b>M12 - Osmodeshidratato</b> | 70            | Feb 11-11           | 80,49              | 13,72                |

#### 4.7.1. Análisis de textura y actividad de agua

Los análisis de textura realizados se refieren a la fuerza de penetración de una aguja de 0,5 mm de diámetro a la fruta. Los resultados que se muestran en la Tabla 4.22 muestran los promedios y la desviación estándar de estas medidas en la fruta. A cada muestra se les realizó 20 ensayos de textura y 3 ensayos de actividad de agua.

En la Figura 4.22 y en la Tabla 4.22 se muestran los promedios de actividad de agua de las medidas realizadas a las muestras evaluadas. Allí se observa que este promedio está por debajo de 0,6 que es el punto mínimo para el cual el producto se vuelve estable en el tiempo, debido a que por debajo de este valor los microorganismos no se multiplican.

**Tabla 4.22.** Promedios de las medidas de textura y actividad de agua.

|                               | T (°C) | CH fin (% bh) | Promedio F (g) | Desviación estándar | Promedio Aw | Desviación estándar |
|-------------------------------|--------|---------------|----------------|---------------------|-------------|---------------------|
| <b>M1- Blanco</b>             | 60     | 15,15         | 37,26          | 14,028              | 0,584       | 0,0249              |
| <b>M2 - Blanco</b>            | 70     | 12,27         | 78,52          | 21,074              | 0,458       | 0,0131              |
| <b>M3 - Escaldado</b>         | 60     | 15,72         | 42,50          | 8,651               | 0,633       | 0,0286              |
| <b>M4 - Escaldado</b>         | 70     | 13,88         | 75,97          | 26,020              | 0,520       | 0,0182              |
| <b>M5 - Osmodeshidratato</b>  | 70     | 14,54         | 78,93          | 35,025              | 0,507       | 0,0095              |
| <b>M6 - Osmodeshidratato</b>  | 60     | 10,93         | 70,06          | 23,932              | 0,544       | 0,0162              |
| <b>M7 - Escaldado</b>         | 60     | 12,55         | 115,99         | 55,955              | 0,557       | 0,0106              |
| <b>M8 - escaldado</b>         | 70     | 13,8          | 163,34         | 75,912              | 0,470       | 0,0295              |
| <b>M9 - Blanco</b>            | 70     | 13,75         | 137,91         | 54,037              | 0,476       | 0,0312              |
| <b>M10- Blanco</b>            | 60     | 12,82         | 91,30          | 48,071              | 0,526       | 0,0080              |
| <b>M11 - Osmodeshidratato</b> | 60     | 15,165        | 56,02          | 32,907              | 0,554       | 0,0155              |
| <b>M12 - Osmodeshidratato</b> | 70     | 13,72         | 116,05         | 69,405              | 0,468       | 0,0181              |

Los ensayos de textura se realizaron en un Texturometro Marca TA.XT.Plus ubicado en los laboratorios de análisis físico-químicos del Instituto de Ciencia y Tecnología de

Alimentos - ICTA, y los ensayos de actividad de agua se realizaron en un equipo Marca FA-ST Lab ubicado en los mismos laboratorios.

En la Figura 4.24 y en la Tabla 4.22 se muestran los promedios de la medida del punto de penetración por texturometro en los ensayos evaluados. En esta medidas se observa que para los ensayos para los cuales el CH final en bh es más bajo este valor es más alto (Tabla 4.23, Muestras 7, 8, 9 y 12). Esto nos muestra que un punto adecuado de CH final en bh debe estar sobre el 14 y 15%, a este CH la Aw se encuentra por debajo de 0,6. Esta tendencia que se explica no se cumple para el ensayo M6, ya que tiene un CH final de 10,93% bh y el promedio del valor del punto de penetración es de 70,06 g

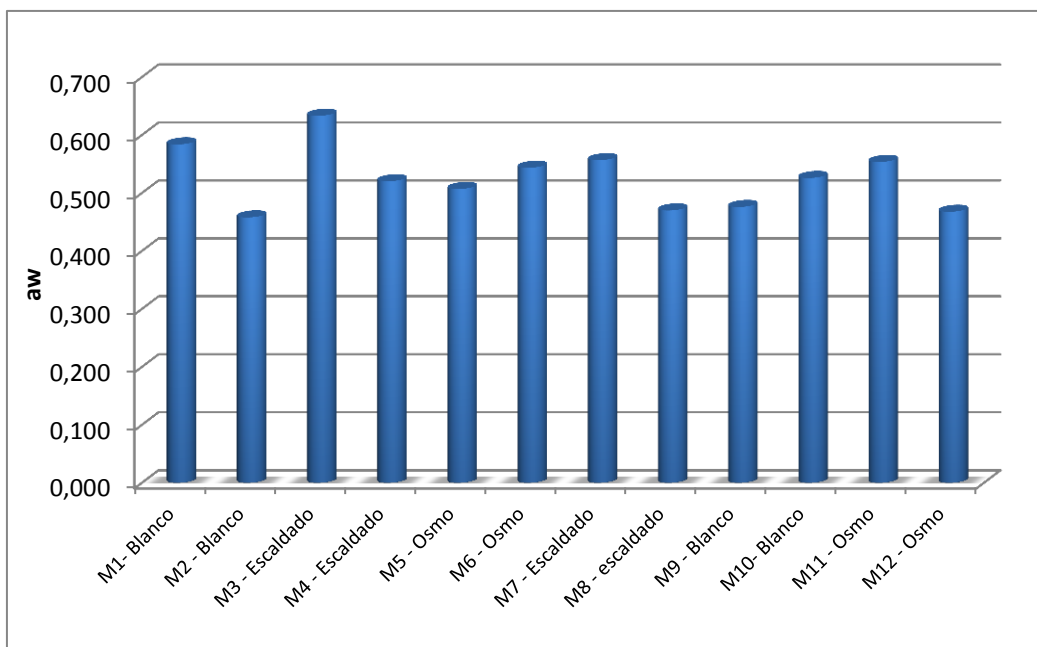


Figura 4.23. Medida de la actividad de agua promedio para los ensayos evaluados.



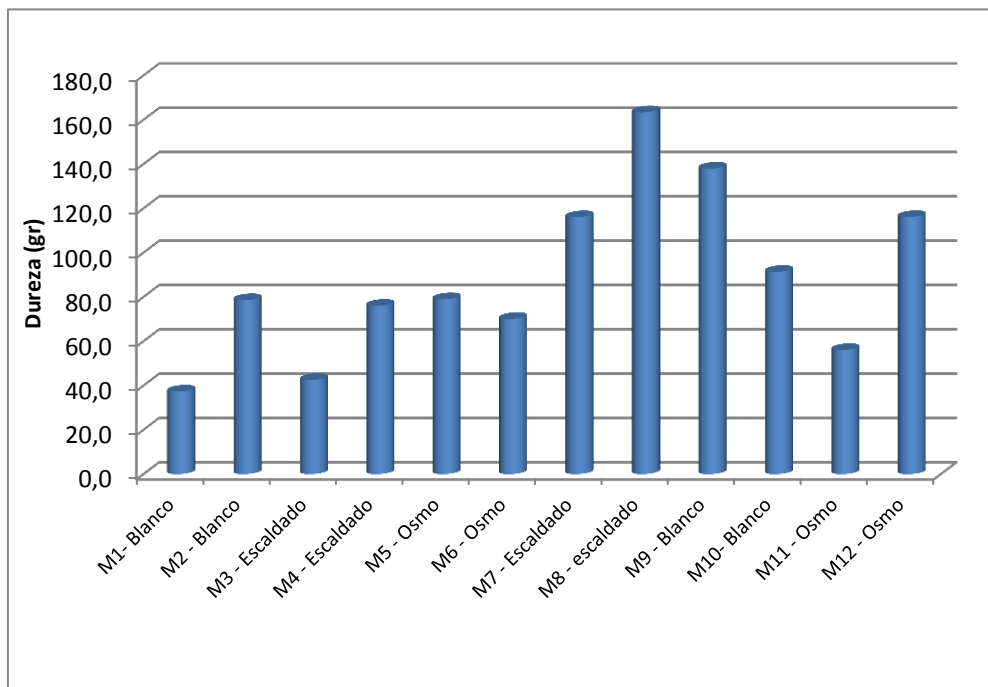


Figura 4.24. Medida de punto de penetración por texturometro para los ensayos evaluados.

Las muestras para los cuales el valor del punto de penetración es más alto, el CH final es más bajo, la palatabilidad por parte del consumidor se hace más difícil, debido a que se debe hacer mayor fuerza para poder digerirlo. Las muestras en las que este valor es más bajo, la degustación por parte del consumidor es más suave.

De acuerdo a estos resultados y los análisis realizados el CH final de la uchuva deshidratada por cualquiera de los pre-tratamientos realizados en esta investigación debe estar entre 14 y 15% CH bh final.

#### 4.7.2. Colorimetría

En 1986 la “Comisión Internationale de L’Eclairage” (CIE), para lograr una representación perceptualmente uniforme del color (uno de los métodos para determinarlo objetivamente, basándose en la determinación de valores triestímulo XYZ) estableció el espacio CIE-LAB (Figura 4.25). Este espacio vectorial utiliza una terna de ejes ortogonales, se basa en el modelo de los colores opuestos, y define cada color a

partir de unas coordenadas denominadas  $L^*$  (claridad/oscuridad: 0, negro, a 100, blanco);  $a^*$  (“+60” intensidad de color rojo y “-60” de color verde), y  $b^*$  (“+60” intensidad de color amarillo y “-60” de color azul), según el método de Grassmann. De esta manera, los colores se representan en el espacio a unas distancias proporcionales a las diferencias visuales entre ellos. Es, por tanto, un sistema recomendado para mediciones industriales del color de los alimentos (Ramírez-Navas, 2010).

Los ensayos de colorimetría se realizaron en un Colorímetro marca CHROMA METER CR-300 ubicado en los laboratorios del Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos ICTA de la Universidad Nacional de Colombia. Para ello se tomaron veinte medidas por cada ensayo realizado. Los resultados se muestran en las Figuras 4.26, 4.27 y 4.28, para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado, respectivamente.

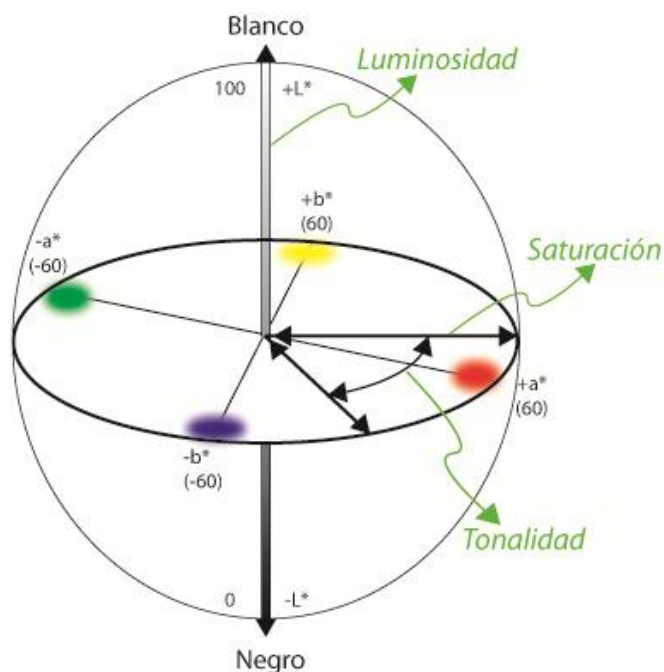


Figura 4.25. Espacio de colores CIE-LAB. (Ramírez-Navas, 2010).

En la Tabla 4.23 se muestran los promedios de las medidas de colorimetría, para cada una de las medidas realizadas y el cálculo del Índice de Color (IC) para cada muestra.

Tabla 4.23. Promedios de las medidas de colorimetría.

|                       | T (°C) | CH fin (% bh) | Valores       | L     | A     | B     | C     | h     | IC    |
|-----------------------|--------|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Fruta Fresca</b>   |        |               | Promedio      | 69,09 | 10,90 | 56,98 | 58,03 | 79,18 | 2,78  |
|                       |        |               | Des. Estándar | 2,38  | 1,47  | 3,33  | 3,31  | 1,51  | 0,46  |
| <b>M1 - Blanco</b>    | 60     | 15,15         | Promedio      | 47,25 | 17,18 | 47,43 | 50,30 | 70,70 | 7,77  |
|                       |        |               | Des. Estándar | 4,12  | 2,48  | 5,95  | 6,28  | 2,28  | 1,24  |
| <b>M2 - Blanco</b>    | 70     | 12,27         | Promedio      | 42,48 | 19,65 | 43,83 | 48,08 | 65,70 | 10,81 |
|                       |        |               | Des. Estándar | 3,81  | 2,49  | 5,73  | 5,89  | 2,69  | 2,42  |
| <b>M3 - Escaldado</b> | 60     | 15,72         | Promedio      | 45,06 | 17,29 | 45,24 | 48,45 | 69,06 | 8,64  |
|                       |        |               | Des. Estándar | 4,01  | 2,38  | 7,15  | 7,37  | 1,87  | 1,40  |
| <b>M4 - Escaldado</b> | 70     | 13,88         | Promedio      | 44,01 | 18,28 | 45,59 | 49,16 | 68,14 | 9,21  |
|                       |        |               | Des. Estándar | 2,72  | 2,03  | 4,63  | 4,63  | 2,39  | 1,38  |
| <b>M5 - Osmo</b>      | 70     | 14,54         | Promedio      | 47,81 | 17,30 | 47,54 | 50,62 | 70,02 | 7,70  |
|                       |        |               | Des. Estándar | 2,50  | 1,78  | 3,69  | 3,60  | 2,23  | 1,36  |
| <b>M6 - Osmo</b>      | 60     | 10,93         | Promedio      | 46,10 | 18,83 | 44,73 | 48,44 | 66,86 | 9,37  |
|                       |        |               | Des. Estándar | 4,10  | 1,97  | 6,75  | 6,95  | 2,26  | 1,77  |
| <b>M7 - Escaldado</b> | 60     | 12,55         | Promedio      | 37,40 | 16,27 | 34,83 | 38,50 | 64,89 | 12,82 |
|                       |        |               | Des. Estándar | 3,32  | 1,73  | 3,76  | 3,57  | 3,16  | 2,74  |
| <b>M8 - escaldado</b> | 70     | 13,8          | Promedio      | 38,52 | 16,83 | 37,49 | 41,12 | 65,89 | 11,76 |
|                       |        |               | Des. Estándar | 2,44  | 1,65  | 2,70  | 2,77  | 2,17  | 1,70  |
| <b>M9 - Blanco</b>    | 70     | 13,75         | Promedio      | 37,80 | 15,31 | 35,03 | 38,27 | 66,42 | 11,70 |
|                       |        |               | Des. Estándar | 2,01  | 1,92  | 3,12  | 3,18  | 2,73  | 1,90  |
| <b>M10- Blanco</b>    | 60     | 12,82         | Promedio      | 37,98 | 14,64 | 33,13 | 36,27 | 66,24 | 11,92 |
|                       |        |               | Des. Estándar | 2,79  | 1,77  | 3,64  | 3,45  | 3,72  | 2,52  |
| <b>M11 - Osmo</b>     | 60     | 15,165        | Promedio      | 44,57 | 19,59 | 43,47 | 47,73 | 65,56 | 10,43 |
|                       |        |               | Des. Estándar | 3,69  | 1,30  | 5,73  | 5,34  | 2,93  | 2,21  |
| <b>M12 - Osmo</b>     | 70     | 13,72         | Promedio      | 44,56 | 20,36 | 45,21 | 49,66 | 65,56 | 10,47 |
|                       |        |               | Des. Estándar | 4,00  | 1,71  | 5,96  | 5,48  | 3,31  | 2,45  |

En las Figura 4.26 se observa los resultados de colorimetría para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco). Allí se observa que la uchuva después del proceso de deshidratado toma una tonalidad amarillo rojiza, ya que pasa de un amarillo intenso, uchuva fresca en la figura 4.18, a tonalidades rojizas, además las muestras que

llevaban más tiempo de haberse procesado el color era más oscuro, lo que indica que los sufría de un pardeamiento debido al contacto con la luz.

En la Figura 4.27 están los graficados los resultados de colorimetría para la uchuva sometida a escaldado, aquí también se observa el mismo corrimiento hacia el rojo observado para la uchuva sin ningún pre-tratamiento.

En la Figura 4.28 están graficados los resultados de colorimetría para uchuva sometida a osmodeshidratado. El color de las muestra con este pre-tratamiento está menos disperso que con los dos tratamientos anteriores, lo cual puede indicar que la osmodeshidratación no permite que la fruta se pardee después de pasar por el proceso de deshidratación.

Los resultados obtenidos para colorimetría no se pueden comparar con otros estudios debido a que no se encontraron trabajos realizados en este tema. Se encontraron trabajos como el de Márquez et al (2009) en el que se hace un estudio de color para uchuva fresca.

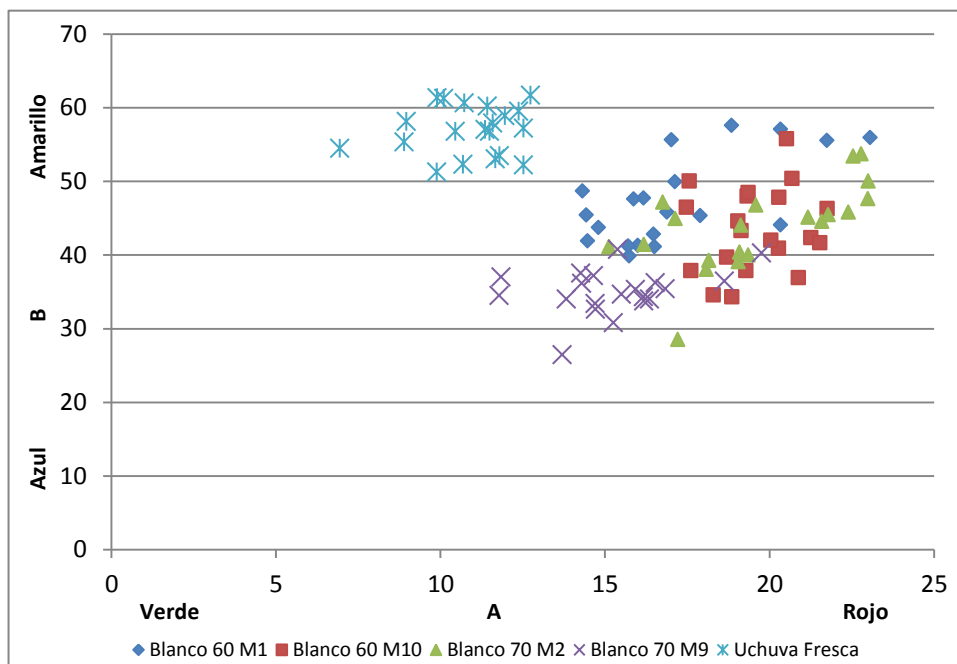


Figura 4.26. Datos de colorimetría para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

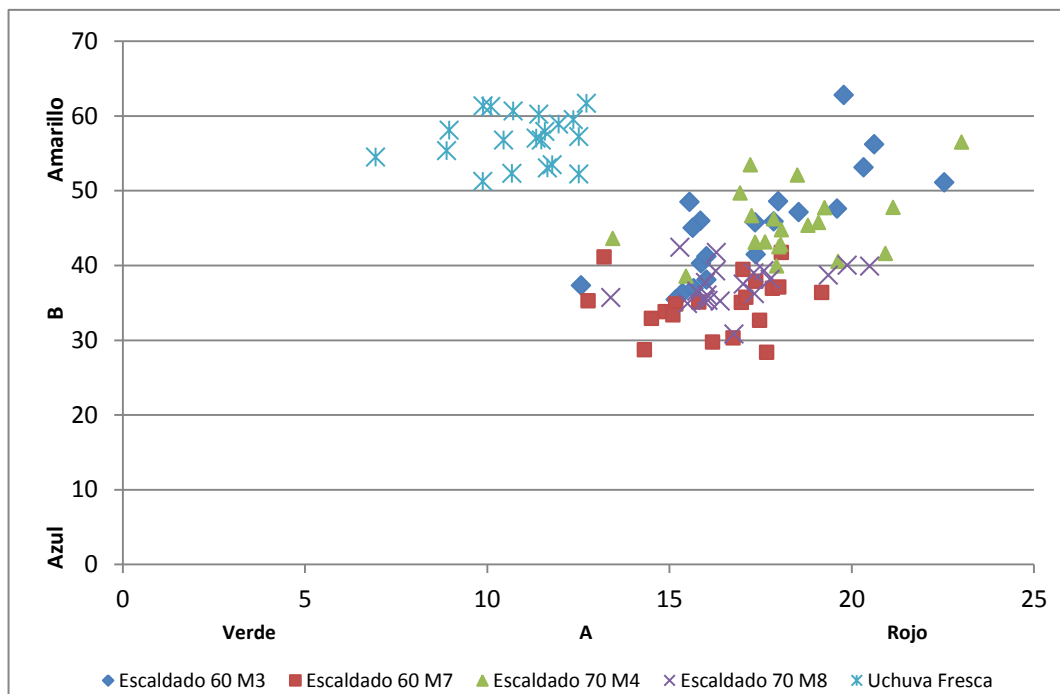


Figura 4.27. Datos de colorimetría para uchuva sometida a escaldado.

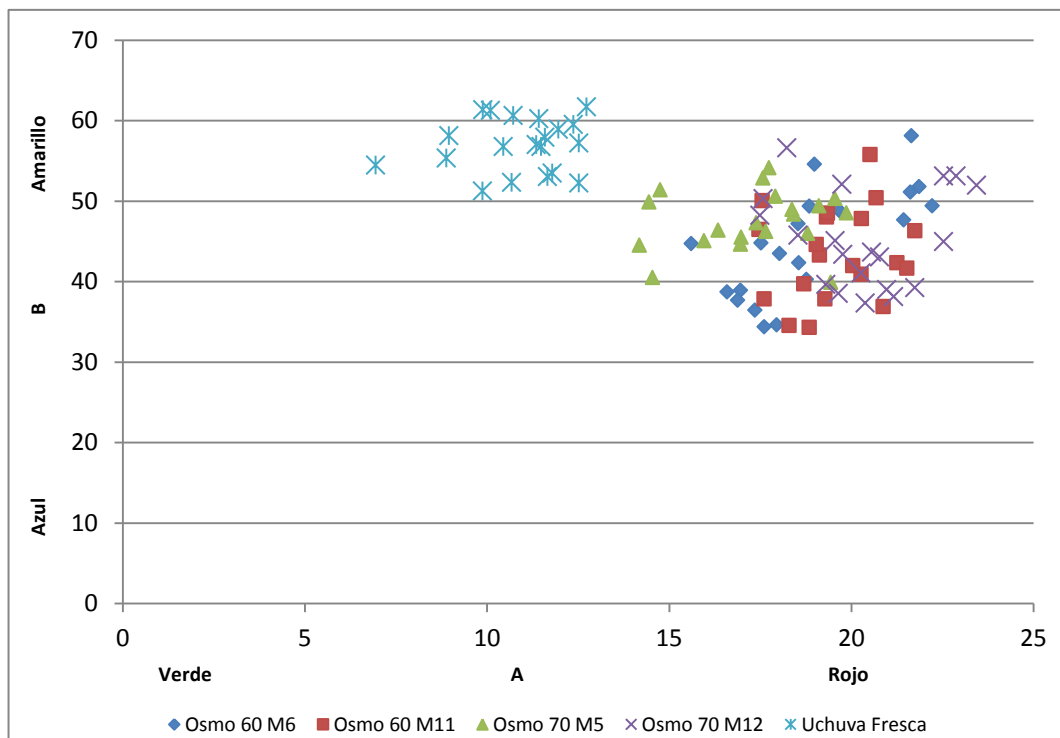


Figura 4.28. Datos de colorimetría para uchuva sometida a osmodeshidratato.

En la Figura 4.30 se muestra el Índice de Color – IC, para cada una de las muestras. En la Ecuación 4.13 se muestra el cálculo del índice de color.

$$IC = 1000 \frac{a^*}{L^* b^*} \text{ (Ec.4.14)}$$

En donde:

- IC: índice de color
- L\*, a\* y b\* son los valores del espacio CIE-LAB mostrados en la Tabla 4.23.

Según Vignoni (2006) si el IC es positivo y se encuentra entre (+2 a +20), se relaciona con los colores que van desde el amarillo pálido al naranja intenso. Para este caso la uchuva en fresco tiene un valor de 2,78 y la uchuva deshidratada con los pre-tratamientos estudiados se encuentra 7,70 y 12,82, lo que indica que cuando la uchuva se somete a deshidratación el color cambia hacia el naranja intenso.

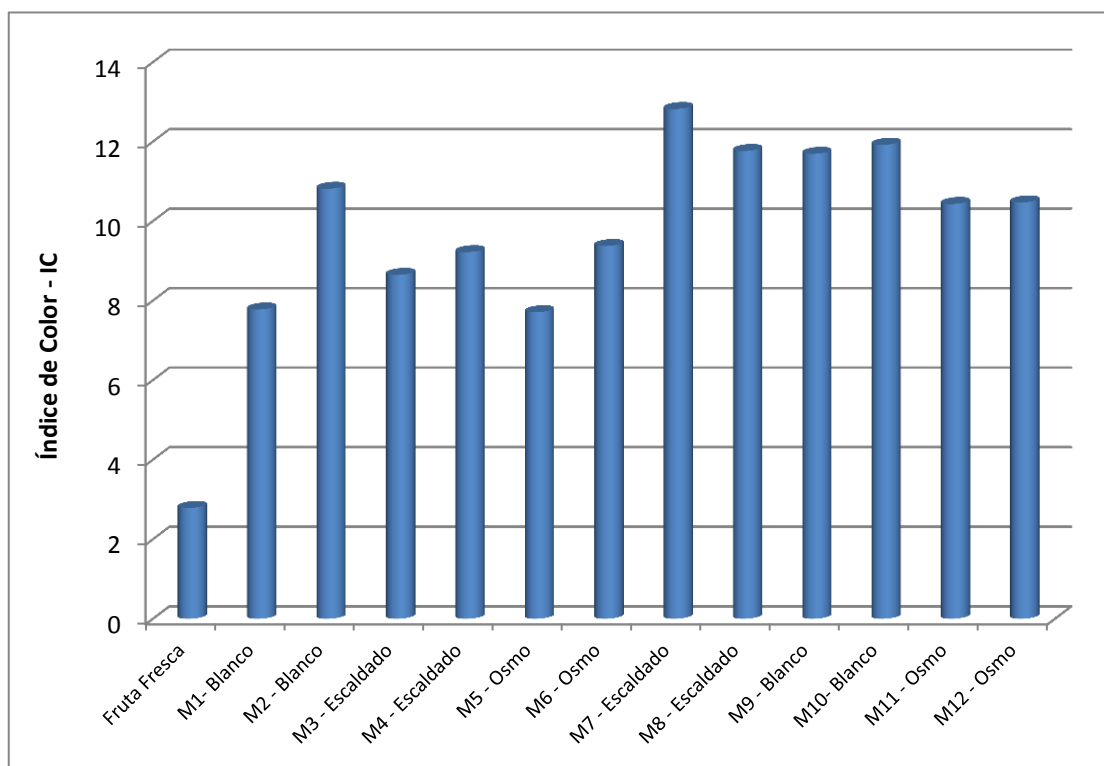


Figura 4.29. Índice de color – IC, para cada una de las muestras evaluadas.

**4.7.3. Panel de Análisis Sensorial de Aceptación**

Otro de los ensayos realizados a las muestras obtenidas fue un panel de análisis sensorial de aceptación. En las Figuras 4.31, 4.32 y 4.33 se muestran los resultados para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), escaldada y osmodeshidratada respectivamente.

A continuación se presenta la encuesta realizada.

**Tabla 4.24.** Encuesta de Panel Sensorial de Aceptación para uchuva deshidratada.

| <b>PRUEBA SENSORIAL DE UCHUVA DESHIDRATADA</b>   |                  |                  |                  |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Edad _____ Hombre _____ Mujer _____  |                  |                  |                  |
| Pruebe la muestra que se le presenta e indique, según la escala su opinión sobre ellas. Marque con una X el renglón que corresponda a la calificación de cada muestra. |                  |                  |                  |
| <b>ESCALA</b>  | <b>MUESTRA 1</b> | <b>MUESTRA 2</b> | <b>MUESTRA 3</b> |
| Me gusta mucho   |                  |                  |                  |
| Me gusta   |                  |                  |                  |
| Me es indiferente  |                  |                  |                  |
| Me disgusta  |                  |                  |                  |
| Me disgusta mucho  |                  |                  |                  |

En base a la Norma Técnica Colombiana NTC 3930 (ICONTEC, 2009) se presentan los resultados del panel:

- Objetivo del panel: Medir la aceptación del público en general de tres muestras de uchuva sometida a diferentes pre-tratamientos.
- Se ofrecieron tres muestras a cada evaluador y no se usó muestra de referencia.

- Número de evaluadores: 48
- Sitio y condiciones de la prueba: Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos ICTA, Universidad Nacional de Colombia. La prueba se aplicó a estudiantes de alimentos y docentes de las líneas de alimentos.
- Condiciones del material utilizado: se utilizó muestras de uchuva blanco (sin ningún pre-tratamiento), escaldada y osmodeshidratada. A cada panelista se le entregaron tres copas marcadas con números de 1 a 3 y se les pidió que colocaran su nivel de aceptación respecto a la Tabla 4.25.
- Nombre de la persona que supervisó la prueba: Juan Carlos Mahecha Godoy.
- Fecha y hora de la prueba: jueves 5 de mayo de 2011, 9 am.

La escala utilizada para la medición de este ensayo fue la siguiente:

- 5: Me gusta mucho.
- 4: Me gusta.
- 3: Me es indiferente.
- 2: Me disgusta.
- 1: Me disgusta mucho.

Para la obtención de los resultados se contaron las respuestas para la escala utilizada, teniendo como punto de partida que el total de evaluadores fue de 48 personas.

En las Tablas 4.25, 4.26 y 4.27 se muestran los resultados del panel sensorial de aceptación.

**Tabla 4.25.** Resultados Panel Sensorial de Aceptación, uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

|                        | <b>M1 - Blancos</b> |          |          |          |          |
|------------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Rango de edades</b> | <b>5</b>            | <b>4</b> | <b>3</b> | <b>2</b> | <b>1</b> |
| <b>15-25</b>           | 5                   | 12       | 5        | 0        | 1        |
| <b>26-40</b>           | 0                   | 4        | 1        | 2        | 0        |
| <b>&gt; 40</b>         | 3                   | 10       | 4        | 1        | 0        |
| <b>Totales</b>         | 8                   | 26       | 10       | 3        | 1        |



**Tabla 4.26.** Resultados Panel Sensorial de Aceptación, uchuva sometida a escaldado.

|                        | <b>M2 - Escaldado</b> |          |          |          |          |
|------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Rango de edades</b> | <b>5</b>              | <b>4</b> | <b>3</b> | <b>2</b> | <b>1</b> |
| <b>15-25</b>           | 5                     | 8        | 5        | 4        | 1        |
| <b>26-40</b>           | 1                     | 5        | 0        | 1        | 0        |
| <b>&gt; 40</b>         | 3                     | 8        | 7        | 0        | 0        |
| <b>Totales</b>         | 9                     | 21       | 12       | 5        | 1        |

**Tabla 4.27.** Resultados Panel Sensorial de Aceptación, uchuva sometida a osmodeshidratado.

|                        | <b>M3 - Osmodeshidratato</b> |          |          |          |          |
|------------------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Rango de edades</b> | <b>5</b>                     | <b>4</b> | <b>3</b> | <b>2</b> | <b>1</b> |
| <b>15-25</b>           | 5                            | 12       | 2        | 4        | 0        |
| <b>26-40</b>           | 3                            | 2        | 1        | 1        | 0        |
| <b>&gt; 40</b>         | 7                            | 6        | 3        | 2        | 0        |
| <b>Totales</b>         | 15                           | 20       | 6        | 7        | 0        |

Para el análisis de los resultados se graficó el total de respuestas según la escala utilizada y se dividieron las respuestas en tres rangos de edades. De 15 a 25 años, de 26 a 40 años y mayores de 40 años. El rango de 15-25 años se tomó porque son personas jóvenes con bajo poder adquisitivo. El rango de 26-40 años se tomó debido a que son personas que inician su vida laboral y su poder adquisitivo aumenta y se dan gustos probando nuevos alimentos. Y mayores de 40 años porque estas personas ya saben lo que quieren y tienen muy definidos sus gustos.

En la Figura 4.29 se observa que el 54,17% de las personas responden que la uchuva sin ningún pre-tratamiento les gusta, seguida por la respuesta de 20,83% que le es indiferente y 16,67% que les gusta mucho. Por rango de edades entre 15-25 años el 25,0% de las personas les gusta el producto, entre 26-40 años el 8,33% les gusta y mayores de 40 años el 20,83% les gusta.

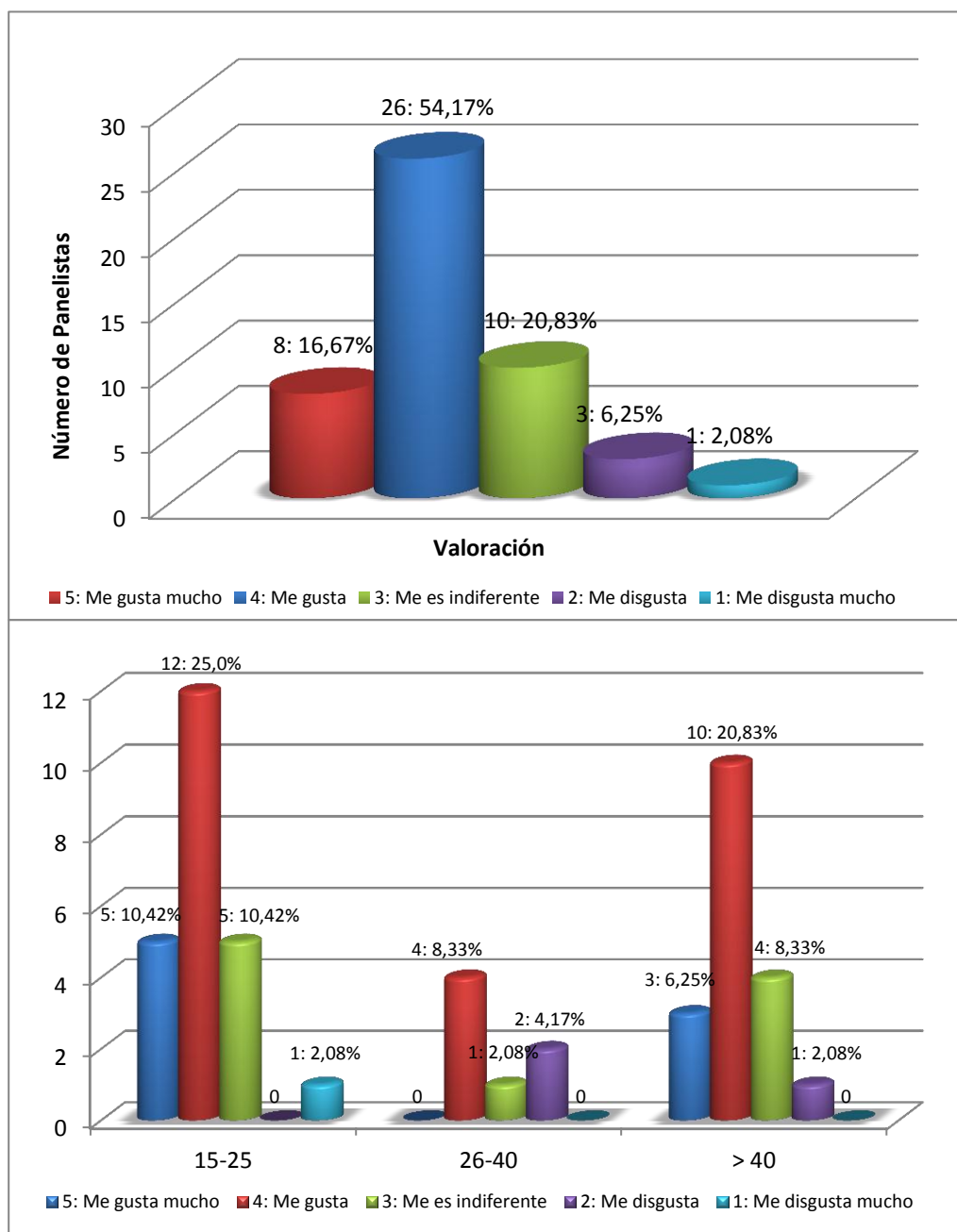
En la Figura 4.30 se tienen los resultados para uchuva sometida a escaldado. Se tiene que el 43,5% de los encuestados manifiestan que les gusta el producto seguido de un

25,0% que le es indiferente y de 18,75% que les gusta mucho. Por rango de edades entre 15-25 años el 16,67% les gusta el producto, seguido de 10,42% que les gusta mucho y les es indiferente. Entre 26-40 años el 10,42% les gusta, seguido por 2,08% que les gusta mucho y la misma cifra les disgusta. Y para mayores de 40 años el 16,67% les gusta el producto, seguido de 14,58% les es indiferente y 6,25% les gusta mucho.

En la Figura 4.31 se tienen los resultados para uchuva sometida a osmodeshidratado. Se tiene que el 41,67% les gusta, seguido del 31,25% que les gusta mucho, el 14,58% les disgusta y el 12,5% les es indiferente.

Como conclusión del panel de aceptación sensorial, en general, a los panelistas les gusta la uchuva deshidratada, con una tendencia a los sabores más ácidos, como lo es la uchuva sin ningún pre-tratamiento, seguida por la uchuva sometida a escaldado y por último la uchuva sometida a osmodeshidratado.

El panel de aceptación sensorial no se tuvo en cuenta la temperatura de deshidratado, debido a que no se aprecia diferencia en el producto obtenido con temperatura de 60°C y de 70°C. En este panel se hizo la evaluación a la uchuva con los diferentes pre-tratamientos.



**Figura 4.30.** Datos del panel sensorial de aceptación para uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco).

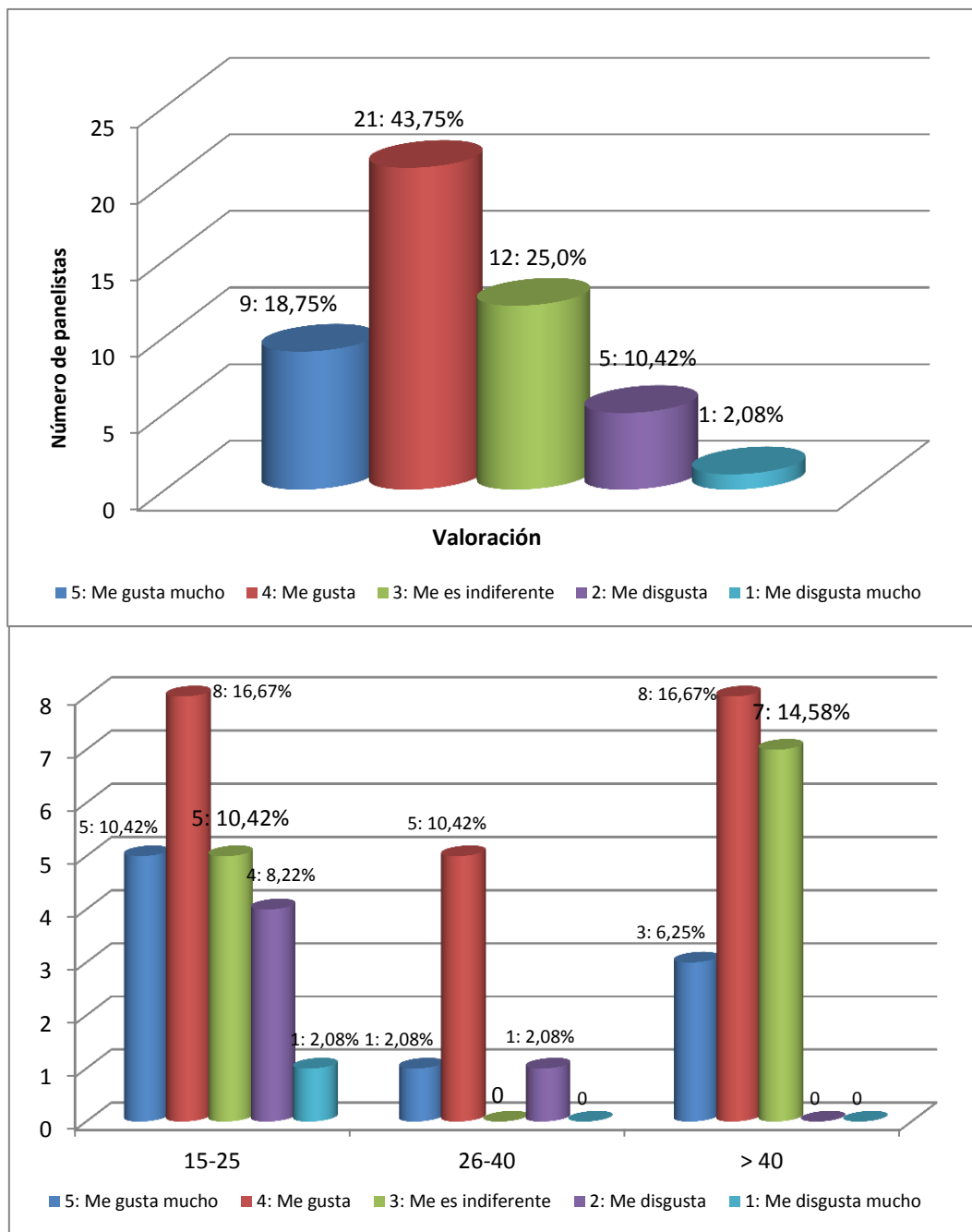


Figura 4.31. Datos del panel sensorial de aceptación para uchuva sometida a escaldado.

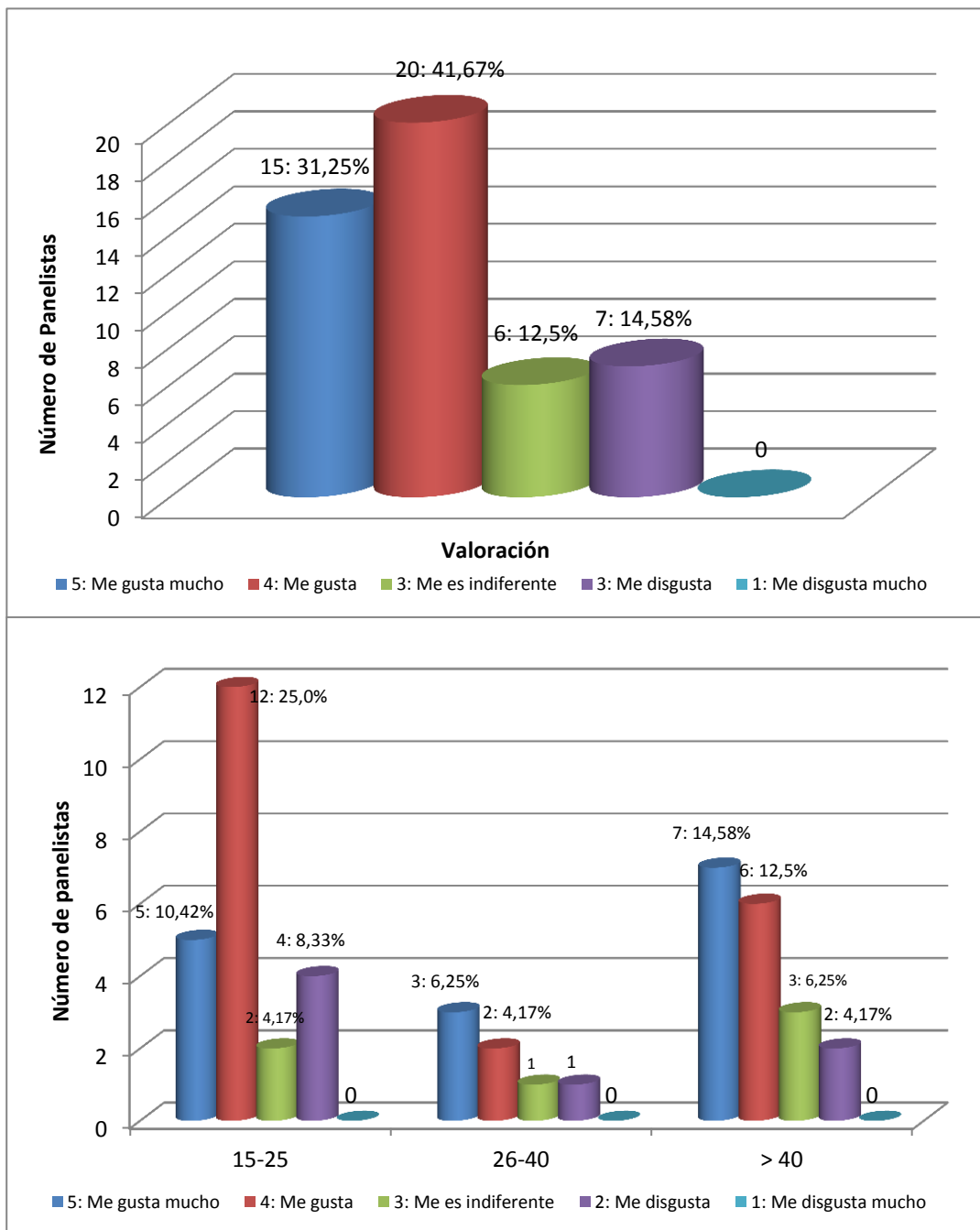


Figura 4.32. Datos del panel sensorial de aceptación para uchuva sometida a osmodeshidratado.

## PARÁMETROS GENERADOS

En el presente trabajo se generaron los parámetros teóricos para la simulación matemática del deshidratado de la uchuva (*Phisalys peruviana* L.) con dos pre-tratamientos térmicos, escaldado y osmodeshidratado, y otro sin ningún pre-tratamiento, blanco. Se obtuvieron las ecuaciones de Contenido de Humedad en equilibrio, la ecuación de velocidad de secado, la ecuación de calor específico y la ecuación de Calor Latente de Vaporización para cada uno de los tratamientos mencionados.

### Ecuación de Contenido de Humedad en Equilibrio.

- Uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco):

$$Meq = (0,8571HR + 0,1292HR^2 + 0,0878HR^3) \exp((0,0525 - 0,6282HR + 2,2756HR^2 - 3,4190HR^3 + 1,8235HR^4) + (T + 79,9957))$$

- Uchuva sometida a escaldado:

$$Meq = (0,4039HR + 0,7184HR^2 - 0,7713HR^3) \exp((0,0016 - 0,2721HR - 0,3847HR^2 + 1,9017HR^3 - 1,4307HR^4) + (T - 45,0468))$$

- Uchuva sometida a osmodeshidratado

$$Meq = (2,8010HR - 7,4698HR^2 + 5,6873HR^3) \exp((-0,1250 + 0,8142HR - 2,9901HR^2 + 5,0804HR^3 - 3,0240HR^4) + (T - 26,2760))$$

En donde:

- HR: Humedad Relativa del aire (decimal).
- T: Temperatura del aire (°C).
- Meq: Contenido de Humedad de Equilibrio (decimal b.s.)

**Ecuación de Calor Específico.**

- Uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco):

$$C_p = 0,6298CH + 12,244$$

- Uchuva sometida a escaldado:

$$C_p = 0,8406CH + 10,17$$

- Uchuva sometida a osmodeshidratado:

$$C_p = 3,4082CH + 8,0357$$

En donde:

- Cp: Calor específico (KJ kg<sup>-1</sup> C<sup>-1</sup>)
- CH: Contenido de Humedad (decimal bs)

**Ecuación de velocidad de Secado.**

- Uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco):

$$\frac{dM}{dt} = (M - Meq)(1,8185 + 0,000199v - (2,62E - 6) PVS(1 - HR) * M + 0,00024PVS(1 - HR)) \\ (13,5146 - 1,0156C)(-0,00225 - 0,000271P + 0,0385S)$$

- Uchuva sometida a escaldado:

$$\frac{dM}{dt} = (M - Meq)(1,9061 + 0,00017v - (3,87E - 5) PVS(1 - HR) * M + 0,00029PVS(1 - HR)) \\ (4,1694 - 0,3129C)(0,0127 + 0,0080P + 0,0323S)$$

- Uchuva sometida a osmodeshidratado:

$$\frac{dM}{dt} = (M - Meq)(0,3892 + 0,00804v + 0,00038PVS(1 - HR) * M + a_3PVS(1 - HR)) \\ (8,9874 - 0,6756C)(-1,0632 + 1,8630P + 0,5895S)$$

En donde:

$$PVS = \exp\left(16,5694 - \frac{3989,9}{T + 233,66}\right)$$

- M: Contenido de humedad del sólido en un instante determinado (decimal b.s.)
- Meq: Contenido de humedad de equilibrio (decimal b.s.)
- HR: Humedad relativa del aire.
- T: Temperatura del aire (°C).
- PVS: Presión de Vapor de Saturación (Pa).
- v: Velocidad de aire (m s<sup>-1</sup>).
- C: Carga del sólido (kg m<sup>2</sup>).

**Ecuación de Calor Latente de Vaporización del agua en el producto.**

- Uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco):

$$h_{fg'} = (2500,3 - 2,09T)(1 + 1,987 \exp(-1,536 M))$$

- Uchuva sometida a escaldado:

$$h_{fg'} = (2500,3 - 2,09T)(1 + 2,795 \exp(-10 M))$$

- Uchuva sometida a osmodeshidratada:

$$h_{fg'} = (2500,3 - 2,09T)(1 + 0,673 \exp(-6,854 M))$$

En donde:

- hfg': Calor latente de vaporización del agua contenida en la uchuva osmodeshidratada (KJ kg<sup>-1</sup>).
- T: Temperatura (°C)
- M: Contenido de humedad de la uchuva osmodeshidratada (decimal bs)



## PARÁMETROS GENERADOS

---

De acuerdo a las condiciones manejadas en los ensayos experimentales las ecuaciones generadas tienen la siguiente validez.

|                                    |                                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| Producto                           | Uchuva fresca                     |
| Diámetro                           | Menor a 27 mm                     |
| Intervalo de humedad del producto  | Entre 0 a 85% bh                  |
| Intervalo de temperatura de secado | Entre 50 a 70 °C                  |
| Intervalo de velocidad del aire    | Entre 1 a 4,2 m s <sup>-1</sup>   |
| Intervalo de humedad del aire      | Entre 20 a 70%                    |
| Intervalo de carga de uchuva       | Entre 1 a 13,3 kg m <sup>-2</sup> |

# CONCLUSIONES

A partir de los datos experimentales se obtuvieron las ecuaciones para la simulación matemática de la deshidratación de uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado.

El análisis estadístico de los datos muestra que las ecuaciones generadas a partir del modelo matemático tienen un buen ajuste respecto a los datos experimentales, constituyéndose en una valiosa herramienta para la predicción de procesos de deshidratación de uchuva.

Como los ensayos realizados en este proyecto de investigación fue con velocidades de aire de 3 y de 4,2 m\*s<sup>-1</sup>, se encontró que la variación entre estos dos valores tiene baja incidencia en los tiempos de deshidratación.

La temperatura de aire tiene alta influencia en la velocidad de deshidratación de la fruta, a mayor temperatura la velocidad de secado aumenta.

La temperatura de aire recomendada para la deshidratación de la uchuva con los pre-tratamientos estudiados es de 60°C con una velocidad de aire de 3 m\*s<sup>-1</sup>. La carga de producto por unidad de área utilizada en este proyecto de investigación fue de 13,3 kg\*m<sup>2</sup>, por condiciones de laboratorio. Estos parámetros deben ser optimizados comparándolos con los costos de operación de un deshidratador industrial.

De los pre-tratamientos evaluados el que presenta mejores ventajas en cuanto a menor tiempo de proceso y calidad del producto terminado, es la uchuva sometida a escaldado, pero la temperatura de escaldado debe ser de 70°C durante dos minutos, para que la fruta a deshidratar no presente rajaduras antes del proceso.

## CONCLUSIONES

---

La uchuva sometida a osmodeshidratado presenta muy buenas condiciones de producto final, pero los costos del agente osmodeshidratante no hace adecuado el proceso.

Mediante la optimización de la automatización y el control de la cámara experimental de secado utilizada en el desarrollo de este proyecto, se realizó un aporte importante a la infraestructura de investigación en tecnologías de poscosecha de la Universidad Nacional de Colombia. Este equipo se encuentra disponible en los Laboratorios de la Planta Piloto de Ingeniería Química de la sede Bogotá.

Con el desarrollo de este proyecto se valida una metodología de trabajo utilizada en el Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola a nivel de productos agrícolas y se demuestra su aplicación para productos agroindustriales derivados de estos.

Mediante la determinación de los parámetros de deshidratación de la uchuva con los pre-tratamientos evaluados, se hace un aporte importante a las tecnologías de poscosecha generando herramientas para el diseño de deshidratadores a nivel industrial para esta fruta y se propicia un adelanto tecnológico de la agroindustria de nuestro país.

## RECOMENDACIONES

Dentro de este proyecto de investigación se evaluó la deshidratación de uchuva sin ningún pre-tratamiento (blanco), uchuva sometida a escaldado y uchuva sometida a osmodeshidratado. Se recomienda evaluar otros pre-tratamientos como uchuva sometida a escaldado y osmodeshidratado al tiempo, uchuva sometida a pitting y escaldado y uchuva sometida a pitting, escaldado y osmodeshidratado, debido a que estudios con uva pasa sometida a un baño en NaOH (soda cáustica) han demostrado una disminución en los tiempos de residencia en el proceso, lo cual podría funcionar para la uchuva.

Se recomienda hacer algunos ensayos con uchuva rajada, debido a que los productores de fruta cuando se presentan estas características, esta fruta es desechada y el valor comercial disminuye sustancialmente, y en los ensayos realizados no se observó pardeamiento en la fruta que presentaba dichas características cuando la fruta se sometía al proceso de escaldado.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, P.A.; C.A. Berdugo y G. Fischer. Efecto de un tratamiento de frío (a 1,5°C) y la humedad relativa sobre las características físico-químicas de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante el posterior transporte y almacenamiento. En *Agronomía Colombiana* No. 22 (2), p. 147-159. 2004.
2. Araya-Farias, M., Ratti, C., *Dehydration of Foods: General Concepts*, Capitulo de libro: *Advances in Food Dehydration*, Ed. Taylor and Francis Group, New York, 2009.
3. Baker, C. *Industrial drying of foods*, Blackie Academic & Professional. 1997.
4. Barbosa-Cánovas, G. V. y H. Vega-Mercado. *Dehydration of foods*, Chapman & Hall. 1996.
5. BARRENA GURBILLON, Miguel Ángel, MAICELO QUINTANA, Jorge Luis, GAMARRA TORRES, Oscar Andrés *et al.* Drying kinetics of eggfruit (*Pouteria lucuma* L.). *Aporte Santiaguino*. [online]. July/dec. 2009, vol.2, no.2 [cited 18 July 2011], p.271-282. Available from World Wide Web: <[http://revistas.concytec.gob.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2070-836X2009000200006&lng=en&nrm=iso](http://revistas.concytec.gob.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2070-836X2009000200006&lng=en&nrm=iso)>. ISSN 2070-836X
6. BROOKER D, BAKKER F, HALL C. *Drying and storage of grains and oilseeds*. AVI Book. New York. 1992.
7. Bruce, D. M. "Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 C." *Journal of Agricultural Engineering Research* V32: P. 337-347. 1985.
8. Camacho, Guillermo. *Procesamiento y Conservación de Frutas*. Curso Virtual ofrecido por el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos ICTA. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2004.

9. Camacho, G., Sanabria, G. Alternativas de Procesamiento y Transformación para la Uchuva. Capítulo de libro. En: Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la Uchuva *Physalis peruviana* L. en Colombia Editores Fischer, Miranda et al, Editorial Universidad Nacional de Colombia. 2005
10. Castañeda, G.E. y R.I. Paredes. Estudio del proceso respiratorio, principales ácidos orgánicos, azúcares y algunos cambios físico-químicos en el desarrollo del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. p. 96. 2003.
11. CCI (Corporación Colombia Internacional). Uchuva – Perfil del Producto. Inteligencia de Mercados 13, p. 1-12. 2001.
12. CCI (Corporación Colombia Internacional). Uchuva – Perfil del Producto. Inteligencia de Mercados 34, p. 1-14. 2005.
13. Diamante, L. M. y P. A. Munro. "Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices." En: International Journal of Food Science and Technology V 26: p. 99. 1991.
14. Domínguez, J. "Simulación matemática y optimización del secado de productos agropecuarios con aire natural y energía solar" En: Revista Ingeniería e Investigación V. 2 No. 3: 57-62. 1983.
15. Dong Chen, X., Mujumdar A. Drying technologies in food processing. Editorial Blackwell Publishing. Reino Unido. 2008.
16. Fischer, G., Crecimiento y desarrollo. p. 9-26. Capítulo de libro. En: Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Editores: Flórez, V.J.; G. Fischer y A.D. Sora. Unibiblos. Universidad Nacional de Colombia. 2000.

17. Fischer, G., Effect of root zone temperature and tropical altitude on the growth, development and fruit quality of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). Tesis de doctorado, p. 171, 1995.
18. Fischer, G. y P. Lüdders. Development changes of carbohydrates in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits in relation to the calyx and the leaves. En *Agronomía Colombiana*. No. 14 (2), p. 95-107. 1997
19. Flórez, V.J.; G. Fischer y A.D. Soria. Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Unibiblos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. p. 175. 2000.
20. Galvis, Jesús Antonio. Cosecha y poscosecha de la Uchuva. Capítulo de libro. En: *Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la Uchuva Physalis peruviana L. en Colombia* Editores Fischer, G., Miranda, D., Editorial Universidad Nacional de Colombia. 2005.
21. GIRALDO-ZUNIGA, Abraham Damian et al. Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* [online]. 2010, vol.30, n.1, pp. 179-182. ISSN 0101-2061.
22. Henderson, S. M. "Progress in developing the thin layer drying equation." *Transactions of ASAC* V 17: p. 1167-1172. 1974.
23. Henderson, S. M. y S. Pabis . "Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients." *Journal of Agricultural Engineering Research* V 6: p. 169-174. 1961.
24. Instituto Colombiano de Normas Técnica, NTC 4580. Frutas Frescas. Uchuva. Especificaciones, NTC 4580. 1999. Bogotá.

## BIBLIOGRAFÍA

---

25. Instituto Colombiano de Normas Técnica. Análisis Sensorial: Metodología. Ordenamiento de acuerdo a un criterio específico. NTC 3930. 2009.
26. Kays, S. Postharvert physiology of perishable plant products. Exon Press. Georgia. p. 532. 1997.
27. Márquez, C.J., Trillo, O., Cartagena, J., Cotes, J.M. Evaluación físico-química y sensorial de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.). En: VITAE: Revista de la Facultad de Química Farmaceutica, Universidad de Antioquia, Medellín. V. 16. (1) 2009. Pág. 42-48.
28. Meyer, M. R. y G. Paltrieri. Elaboración de Frutas y Hortalizas. México. 2004.
29. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Apuesta Exportadora Agropecuaria 2006-2020. 2006. Bogotá.
30. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Agenda Prospectiva de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Cadena Productiva de la Uchuva en Fresco para Exportación en Colombia. Bogotá. 2009. 152 p.
31. Mohsenin, N.N., Thermal properties of foods and agricultural materials. Ed. CRC. 1980.
32. Moreno Moreno, Fabián Leonardo. Determinación de los Parámetros para la Simulación Matemática del Secado de Almidón de Yuca. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. P. 176. 2008
33. Mujumdar, A. S. Handbook of industrial drying, CRC/Taylor & Francis. 2007.
34. Niesteruk, R., Changes of thermal properties of fruits and vegetables during drying, Drying Tech., 14, 415, 1996.
35. Ospina, Julio Ernesto. Características físicas y mecánicas y análisis de calidad de granos. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. 2001.



36. Page, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering. Purdue, Purdue University, U.S.A. 1949.
37. Parra, Alfonso, Roa-Mejía, Gonzalo y otro. "Secafé Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino." Revista Brasileira de Ingeniería Agrícola y Ambiental. 2008. V. 12 No. 4: p. 428-434.
38. PERRY R; GREEN D, MALONEY J. Manual del Ingeniero Químico. 6ª Ed. McGraw Hill. México. 1992
39. PROEXPORT COLOMBIA, [www.proexport.com.co/siic](http://www.proexport.com.co/siic), consultado junio de 2011.
40. Quintana G., Giraldo, Liliana et al. Termodinámica. Bogotá. 2005.
41. Ranhman, M.S. Food properties handbook. Segunda Edición. Ed. CRC. USA. 2009.
42. Ramírez-Navas, Juan Sebastián, Espectrocolorimetría en caracterización de leches y quesos. En: Tecnología láctea latinoamericana. No. 61. P. 52-68. 2010.
43. Ratti, C., Hot air and freeze-drying of high value foods: A review, *J. Food Eng.*, 49, 311–389, 2001.
44. Rehm, S. y G. Espig. The cultivated plants of the tropics and subtropics. Verlag Margraf. Weihersheim, Alemania. 1991.
45. ROA, G. Natural Drying of Cassava. Thesis PhD. Michigan University. 1974.
46. Rodríguez, M. Estudio de la conservación de la uchuva (*physalis peruviana* L.) utilizando los métodos de atmosfera modificada, refrigeración y encerado. Trabajo de grado. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. p. 123. 2003.

## BIBLIOGRAFÍA

---

47. Sharma, S. K. Ingeniería de Alimentos: Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio. Ed. MacGraw Hill. México. 2003.
48. Togrul, I. T. y T. P. Labuza. "Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers." *Journal of Food Engineering* V55: p. 209-216. 2002.
49. Treybal, R. E. y A. G. Rodríguez. Operaciones de transferencia de masa, McGraw-Hill. México. 1988.
50. Trincheró, G.; G.O. Sois; A.M. Cerri; F. Vilella y A. Franschina. Ripening-related changes in ethylene production, respiration rate and cell-wall enzyme activity in Goldenberry (*Physalis peruviana* L.) a solanaceous species. *Postharvest Biology and Technology*. No. 16. p. 139-145. 1999.
51. TROPICAL AND OFF-SEASON FRESH FRUITS MARKET NEWS SERVICE (MNS), Issue No. 38, September 2007.
52. TROPICAL AND OFF-SEASON FRESH FRUITS MARKET NEWS SERVICE (MNS) BULLETIN MNS Week 51, 2008.
53. Valderrama, H. E. Determinación de parámetros para secado de cacao (*Theobroma cacao*). Trabajo de grado. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. 1991.
54. Valencia. M.L. Anatomía del fruto de la uchuva. En *Acta Biológica Colombiana*. No. 1(2), p. 63-89. 1985.
55. Vanaclocha, A. C. (2003). *Procesos de conservación de alimentos*, Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 2003.
56. VEGA, A; ANDRES, A y FITO, P. Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo). *Inf. tecnol.* [online]. 2005, vol.16, n.6, pp. 3-11.

57. VIGNONI, Lucía A; CESARI, Ricardo M; FORTE, Marcela y MIRABILE, Mónica L. Determinación de Índice de Color en Ajo Picado. Inf. tecnol. [online]. 2006, vol.17, n.6, pp. 63-67.
58. Villamizar, F.; A. Ramírez y M. Menes. Estudio de la caracterización física, morfológica y fisiológica poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). En Agro-Desarrollo No. 4 (1-2), p. 305-320. 1993.
59. Villamizar, Fanny, y Hernández, José Eugenio. Determinación de parámetros y simulación matemática del proceso de secado de cacao (*Theobroma cacao*). Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. 1986.
60. Wang, C. Y. and R. P. Singh "Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying". En: Transactions of American Society of Agricultural Engineers. V 11: p. 668-672. 1978
61. Wang, Z., J. Sun, et al. "Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying". En: Journal of Food Engineering 80(2): 536-544. 2007.
62. Wills, R.; B. McGlasson; D. Graham y D. Joyce, Introduction to the physiology and handling of fruit, vegetable and ornamentals. UNSW Press, Adelaine, USA. 1998.
63. White, G. M., I. J. Ross, et al. "Fully exposed drying of popcorn." Transactions of the ASAE V24: p. 466-468. 1981.
64. Yaldiz, O., C. Ertekin, et al. "Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes" En: Energy V 26: p. 457-465. 2001.
65. Zapata, J.L.; A. Saldarriaga; M. Londoño y C. Díaz. Manejo del cultivo de la uchuva en Colombia. Boletín Técnico No. 14. Corpoica, C.I. La Selva, Rionegro, Antioquia. p. 40. 2002.