



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

## **T E S I S**

**IMPLEMENTACION Y EVALUACION DE  
UN SECADOR SOLAR PARA QUESO EN  
LA COMUNIDAD UNESCO, CINTALAPA,  
CHIAPAS Y PRUEBAS DE SECADO DE  
QUESO FRESCO CHIAPANECO.**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS EN  
DESARROLLO SUSTENTABLE**

PRESENTA

**JUANA MARÍA HERNÁNDEZ JARQUÍN**

DIRECTOR

**DR. JOEL PANTOJA ENRIQUEZ**

CO-DIRECTOR

**DR. GUILLERMO IBAÑEZ DUHARTE**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Junio de 2015.



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

## **T E S I S**

### **IMPLEMENTACION Y EVALUACION DE UN SECADOR SOLAR PARA QUESO EN LA COMUNIDAD UNESCO, CINTALAPA, CHIAPAS Y PRUEBAS DE SECADO DE QUESO FRESCO CHIAPANECO.**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

### **MAESTRA EN CIENCIAS EN DESARROLLO SUSTENTABLE**

PRESENTA

**JUANA MARÍA HERNÁNDEZ JARQUÍN**

DIRECTOR

**DR. JOEL PANTOJA ENRIQUEZ**

CO-DIRECTOR

**DR. GUILLERMO R. IBAÑEZ DUHARTE**

ASESOR

**DR. JOEL MOREIRA ACOSTA**

ASESOR

**DR. JORGE EVARISTO CONDE DIAZ**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Junio de 2015.

## DEDICATORIA

A mi Familia.

Gabriel Quetzalcóatl, eres mi motor, en la vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A dios y a mis padres por darme la vida.

Al Dr. Pantoja por todo su apoyo y al Dr. Ibáñez, al Dr. Iglesias y al Dr. Moreira, que me asesoraron, a Enrique Abdala, Juan José Vásquez y Luis Hernández, por la ayuda para la construcción del equipo. A mis compañeros de ing. en energía de la Universidad Politécnica de Chiapas de la 5 generación, que ayudaron en la instalación del secador solar. Además de Carmen María Hernández Jarquín, Edgar Lisandro García López y a Domitila Jarquín López. A Fundación Kolping; a Lot, al Contador Elair, a Cesar, Matea y a al médico veterinario Luis, a Romelia y Osiris que contribuyeron en el transporte y la instalación del secador solar. A los habitantes de la comunidad UNESCO que nos recibieron en su casa y nos brindaron todo su apoyo y abrigo en la larga instalación del equipo, a Beti. A los compañeros de ing. en energías renovables, Rubén, Daniel y Jonathan, que me apoyaron a realizar las pruebas de secado solar de queso fresco en la UNICACH, al Maestro Carlos Narcia de Ing. Ambiental que me ayudo con el programa Matlab a modelar la cinética de secado del queso. Al doctor Noel Ballinas, a los Laboratorista: Luis, Q.B. Morelbi Mora, que me apoyaron para realizar pruebas alimenticias en el queso, a la facultad de alimentos de la UNICAH, a Javier y Alba de la Estancia de Verano de Investigación Científica del 2012. A todos lo que hicieron posible que concluyera con mi tema de tesis...Gracias.

<b>INDICE GENERAL</b> .....	I
<b>LISTA DE TABLAS Y ANEXOS</b> .....	Iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	V
<b>RESUMEN</b> .....	Ix
<b>ABSTRACT</b> .....	X
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>I.1. El producto</b> .....	1
<b>I.2. El proceso de secado</b> .....	2
<b>I.3. El secado solar</b> .....	4
<b>I.4. Objetivo general</b> .....	5
<b>I.5. Objetivos específicos</b> .....	6
<b>I.6. Estructura del trabajo de tesis</b> .....	6
<b>II. GENERALIDADES</b> .....	7
<b>II.1. Introducción</b> .....	7
<b>II.2. Antecedentes del secado solar de queso fresco chiapaneco</b> .....	7
<b>II.3. Antecedentes del diseño de secadores solares</b> .....	8
<b>II.4. Antecedentes de pruebas de secado y cinética de secado</b> .....	12
<b>II.5. Estrategias y acciones para el desarrollo energético sustentable en México y sustentabilidad en el sector rural</b> .....	15
<b>II.6. Realidades del desarrollo sustentable en el sector rural</b> .....	22
<b>III. FUNDAMENTOS TEORICOS</b> .....	26
<b>III.1. Introducción</b> .....	26
<b>III.2. La energía solar</b> .....	26
<b>III.2.1. Naturaleza de la energía solar</b> .....	26
<b>III.2.2. Radiación solar</b> .....	29
<b>III.2.3. Estimación y medición de la radiación solar</b> .....	31
<b>III.3. Tecnología de secado solar</b> .....	35
<b>III.3.1. El Secado solar como método de conservación de alimentos</b> .....	35
<b>III.3.2. Secadores solares</b> .....	36
<b>III.3.2.1. Partes que componen a los secadores solares</b> .....	36
<b>III.3.2.2. Tipos de secadores solares</b> .....	37
<b>III.3.2.3. Circulación de aire dentro de secadores solares</b> .....	40
<b>III.3.2.4. Forma de operación de secadores solares</b> .....	40
<b>III.3.2.5. Condiciones para la construcción de secadores solares</b> .....	41
<b>III.3.3. Ventajas del uso del secado solar</b> .....	43
<b>III.3. Teoría de secado</b> .....	44
<b>III.3.1. Mecanismos de deshidratación</b> .....	44
<b>III.3.2. El proceso de secado</b> .....	46
<b>III.3.2.1. Periodo de velocidad constante</b> .....	50
<b>III.3.2.2. Periodo de velocidad decreciente</b> .....	53
<b>III.3.2.2.1. Teoría de la difusión</b> .....	54
<b>III.4. El queso crema chiapaneco</b> .....	57
<b>III.4.1. Producción y secado de queso fresco chiapaneco</b> .....	60
<b>III.4.1.1. Producción de queso fresco chiapaneco</b> .....	60

III.4.1.2. Secado de queso fresco chiapaneco.....	62
<b>IV. MÉTODOLÓGIA.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.1. Introducción.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.2. Lugar de instalación del secador solar para queso fresco chiapaneco.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.3. Secador solar.....</b>	<b>69</b>
IV.3.1. Partes del secador solar.....	70
IV.3.2. Implementación del secador solar para queso en la comunidad UNESCO....	72
IV.3.2.1. Traslado del secador solar.....	72
IV.3.2.2. Instalación del secador solar.....	73
IV.3.3. Evaluación del secador solar para queso de la comunidad UNESCO.....	76
<b>IV.4. Queso fresco chiapaneco.....</b>	<b>77</b>
IV.4.1. Pruebas de secado de queso fresco chiapaneco.....	77
IV.4.2. Diagrama de flujo.....	78
IV.4.3. Etapas de las pruebas de secado de queso fresco.....	80
IV.4.4. Construcción de las curvas de secado.....	89
VI.4.5. Modelado de la cinética de secado.....	90
IV.4.5.1. Modelo difusional de Fick.....	90
VI.4.5.2. Coeficiente de difusión (Def).....	93
IV.4.5.3. Energía de Activación (Ea).....	93
IV.4.6. Criterios para determinar el modelo de mejor ajuste.....	94
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>96</b>
<b>V.1. Introducción.....</b>	<b>96</b>
<b>V.2. Equipos de secado.....</b>	<b>96</b>
V.2.1. Evaluación del secador solar para queso fresco chiapaneco.....	96
V.2.2. Evaluación de los hornos de laboratorio usados para el secado controlado.....	100
<b>V.3. Producto.....</b>	<b>102</b>
V.3.1. Cinética de secado de queso fresco chiapaneco bajo condiciones controladas de temperatura.....	102
V.3.2. Modelado de la cinética de secado controlado.....	104
V.3.2.1. Coeficiente de difusión (Def).....	110
V.3.2.2. Energía de activación (Ea).....	112
V.3.3. Cinética de secado solar de queso fresco chiapaneco.....	115
<b>V.4. Experiencia de secado solar de queso fresco en la comunidad UNESCO..</b>	<b>118</b>
<b>V.5. Descripción de la quesería como proyecto productivo.....</b>	<b>121</b>
<b>V.6. Observaciones y recomendaciones para la optimización del secador solar para queso crema chiapaneco.....</b>	<b>122</b>
<b>VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>123</b>
<b>VI.1. Introducción.....</b>	<b>123</b>
<b>VI.2. Implementación del secador solar en la comunidad de estudio.....</b>	<b>123</b>
<b>VI.3. Evaluación el secador solar para queso fresco.....</b>	<b>124</b>

<b>VI.4. Pruebas de secado controlado de queso fresco chiapaneco.....</b>	<b>124</b>
<b>VI.5. Pruebas de secado solar de queso fresco chiapaneco.....</b>	<b>125</b>
<b>VII. TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>126</b>
<b>VII.1. Deshidratación solar de queso fresco chiapaneco.....</b>	<b>126</b>
<b>VII.2. Secador Solar.....</b>	<b>127</b>
<b>VII.3. Comunidad UNESCO.....</b>	<b>128</b>
<b>VII LITERATURA CITADA.....</b>	<b>129</b>
<b>IX. ANEXOS.....</b>	<b>133</b>
<b>IX.I. ANEXO 1. Modelos y constantes de secado y coeficientes de determinación, secado controlado de queso fresco chiapaneco.....</b>	<b>133</b>
<b>IX.II. ANEXO 2. Análisis sensorial para queso seco chiapaneco.....</b>	<b>134</b>
<b>IX.III. ANEXO 3 Registro de patente. PROCEDIMIENTO PARA EL SECADO SOLAR DE QUESO FRESCO CHIAPANECO.....</b>	<b>135</b>
<b>IX.IV. ANEXO 4. Trabajo, Congreso Internacional de investigación de materiales (IMRC), CINÉTICA DE SECADO DE QUESO FRESCO CHIAPANECO BAJO CONDICIONES CONTROLADAS.....</b>	<b>136</b>
<b>IX.V. ANEXO 4. Registro de Patente. SECADO SOLAR DE USOS MÚLTIPLES CON SISTEMA DE ACUMULACIÓN TÉRMICA.....</b>	<b>137</b>
<b>IX.VI. ANEXO 5. Artículo, Semana Nacional de la Energía Solar. IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA QUESO CREMA, EN LA COMUNIDAD UNESCO, MUNICIPIO DE CINTALAPA, CHIAPAS.....</b>	<b>138</b>

## LISTA DE TABLAS.

### Capítulo II.

<b>Tabla 2.1.</b> Pruebas de Secado controlado para diversos autores.	13
---	----

### Capítulo III.

<b>Tabla 3.1.</b> Ecuaciones para convertir el día del mes, en el número de día del año.....	27
<b>Tabla 3.2.</b> Carácter higroscópico de azúcares (según Whistler y Daniels, 1985).....	45
<b>Tabla 3.3.</b> Difusividad efectiva de algunos productos alimenticios.....	56

### Capítulo V.

<b>Tabla 5.1.</b> Desvío Medio Relativo y Error Medio Estimado (ecuaciones 4.25 y 4.25), entre la temperatura registrada para cada estufa y la temperatura de control para cada tratamiento 40, 55 y 70 °C.....	101
<b>Tabla 5.2.</b> Modelos de Secado, contantes de secado y coeficiente de determinación.....	104
<b>Tabla 5.3.</b> Valores obtenidos de la correlación logarítmica. $D_{ef}$ es calculada a partir de las pendientes.....	110
<b>Tabla 5.4</b> Valores de los coeficientes para los modelos de secado para tres temperaturas.....	110
<b>Tabla 5.5.</b> Coeficientes de Difusión obtenidos para cada modelo.....	111
<b>Tabla 5.6.</b> Coeficientes de difusión para leche en espuma.....	111
<b>Tabla 5.7.</b> Correlación Logarítmica para Coeficiente de Difusión.....	113
<b>Tabla 5.8.</b> Energía de activación y factor de Arrhenius para cada modelo.....	113
<b>Tabla 5.9.</b> Comparación del Coeficiente de Difusión y energía de activación para diversos productos.....	114

## LISTA DE FIGURAS.

### CAPITULO II.

<b>Figura 2.1.</b> Impulsores de las políticas de eficiencia del gobierno.....	21
<b>Figura 2.2.</b> Alineación de los objetivos de PRONASE 2013-2018 al PND 2013-2018 y al PROSENER 2013-2018.....	22

### CAPITULO III.

<b>Figura 3.1.</b> Irradiancia espectral del Sol y de un cuerpo negro a 5763 K.....	28
<b>Figura 3.2.</b> Esquema de un piranómetro.....	32
<b>Figura 3.3.</b> Pantalla del programa Datasol, que muestra la radiación medida y calculada.....	33
<b>Figura 3.4.</b> . Mapa de Irradiancia Solar en México, Valores diarios promedio anual Martínez R. 2007.....	34
<b>Figura 3.5.</b> Radiación Global incidente en Tuxtla Gutiérrez Chiapas, calculada con ecuaciones conocidas de la literatura.....	35
<b>Figura 3.6.</b> Secador solar directo (a) Esquema del secador, (b) secador comercial.....	37
<b>Figura 3.7.</b> Secador solar indirecto, (a) esquema secador solar (b) secador solar comercial.....	38
<b>Figura 3.8.</b> Secador solar mixto.....	39
<b>Figura 3.9.</b> Cambio de peso durante el proceso de secado.....	46
<b>Figura 3.10.</b> Curva de rapidez de secado.....	47
<b>Figura 3.11.</b> Curva de Velocidad de Secado.....	48
<b>Figura 3.12.</b> Sistema típico para pruebas cinéticas de secado.....	50
<b>Figura 3.13.</b> Transferencia de calor y de materia durante el secado.....	51
<b>Figura 3.14.</b> Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua.....	54
<b>Figura 3.15.</b> Queso crema fresco chiapaneco, producido en la comunidad UNESCO.....	58
<b>Figura 3.16.</b> Queso crema chiapaneco, Montes et al (2010).....	58
<b>Figura 3.17.</b> Diagrama general para elaborar el queso crema de Chiapas. Villegas et al (2009).....	60
<b>Figura 3.18.</b> (a) Ordeña de la leche, (b) cuajada puesta en un costal, (c) costal colgado para retirar suero.....	61
<b>Figura 3.19.</b> (a) La leche cruda de la garrafa se vierte en una cubeta, (b) filtración de la leche mediante una manta para retirar sólidos, (c) a la cuajada del día anterior ya prensada se le agrega sal.....	61
<b>Figura 3.20.</b> (a) Amasado de la cuajada, (b) cuajada puesta en los moldes, (c) prensado de los quesos frescos.....	62

<b>Figura 3.21.</b> (a) Queso seco entero, quesería de Cintalapa.....	62
<b>Figura 3.22.</b> (a) Queso seco entero y (b) queso seco rayado, quesería de Cintalapa.....	63
<b>Figura 3.23.</b> (a) Gabinete de secado, quesería de Cintalapa, (b) gabinete de secado usado por Berrones et al (2010.).....	64

#### **CAPITULO IV.**

<b>Figura 4.1.</b> Imagen satelital, forma de llegar a la comunidad, desde Cintalapa, la línea roja señala el camino y el pin amarillo la comunidad UNESCO.....	67
<b>Figura 4.2.</b> Mapa de la selva el ocote, en este se puede observar la ubicación de la comunidad UNESCO con respecto a la reserva, en Chiapas y en México.....	68
<b>Figura 4.3.</b> Esquema del secador solar de queso desarmable, instalado en la comunidad Unesco, vista frontal.....	70
<b>Figura 4.4.</b> Esquema del secador solar de queso desarmable, instalado en la comunidad Unesco, vista lateral.....	71
<b>Figura 4.5.</b> Camionetas y remolque utilizados para el traslado del secador solar, apoyo de la Fundación Kolping.....	72
<b>Figura 4.6.</b> Techo la vivienda para la instalación del secador.....	73
<b>Figura 4.7.</b> Estructura de soporte del secador solar desarmable.....	73
<b>Figura 4.8.</b> Paredes del secador solar.....	73
<b>Figura 4.9.</b> Fondo del secador solar.....	73
<b>Figura 4.10.</b> Puertas del secador.....	74
<b>Figura 4.11.</b> Rieles para las bandejas.....	74
<b>Figura 4.12.</b> Estructuras para poner la lámina secundaria como techo del secador.....	74
<b>Figura 4.13.</b> Colocación de extractor entre cámara de secado y cámara del colector.....	74
<b>Figura 4.14.</b> Estructuras metálicas para la chapa principal.....	75
<b>Figura 4.15.</b> Cámara de secado y colectores solares de aire instalados.....	75
<b>Figura 4.16.</b> (a) Sellado de la cámara del colector de aire con madera, (b) canal liso para cubrir la cámara del colector, (c) cubiertas de vidrio del colector solar de aire.....	75
<b>Figura 4.17.</b> Termómetro de bulbo seco y de bulbo húmedo.....	76
<b>Figura 4.18.</b> Solarímetro para determinar la radiación solar in situ.....	76
<b>Figura 4.19.</b> Termo higrómetro, y multímetro usados.....	77
<b>Figura 4.20.</b> Sensores de temperatura y humedad.....	77
<b>Figura 4.21.</b> Esquema del secador solar donde muestra, los puntos dentro del equipo donde se midieron la temperatura, (1) placa absorbadora principal, (2) placa absorbadora secundaria, (3) cámara del calentador solar de aire. (4) cámara del secador solar, temperatura y humedad. (5) termómetro de bulbo seco y bulbo húmedo.....	77
<b>Figura 4.22.</b> Estufa eléctrica de laboratorio, dispositivo de secado para las pruebas bajo condiciones constantes.....	78

<b>Figura 4.23.</b> Secado solar multipropósitos, en la plataforma del CIDTER de la UNICACH.....	78
<b>Figura 4.24.</b> Muestras de queso en cubos.....	81
<b>Figura 4.25.</b> Manejo de los cubos mediante una charola.....	81
<b>Figura 4.26.</b> Quesos cortados, para el secado solar.....	81
<b>Figura 4.27.</b> Balanza analítica, pesado de las muestras de queso.....	81
<b>Figura 4.28.</b> Etiquetado de las muestras.....	82
<b>Figura 4.29.</b> Pesado de quesos enteros, medios quesos y cuartos de queso para el secado solar.....	82
<b>Figura 4.30.</b> Etiquetar las muestras para llevar el control de la variación de la masa en el cuadro de registro.....	82
<b>Figura 4.31.</b> Estufas eléctricas de laboratorio, usadas en las pruebas (a) 40 ° C, (b) 55°C y (C) 70 °C.....	83
<b>Figura 4.32.</b> Cubos de queso dentro de la estufa eléctrica.....	83
<b>Figura 4.33.</b> Termo balanza.....	83
<b>Figura 4.34.</b> Secadores solares en la plataforma del CIDTER, UNICACH.....	84
<b>Figura 4.35.</b> Limpieza de charolas.....	85
<b>Figura 4.36.</b> Muestras de queso dentro del secador solar.....	85
<b>Figura 4.37.</b> Muestra de queso en cubos, para determinar humeada.....	86
<b>Figura 4.38.</b> Termo balanza usada para determinar la humedad de las muestras.....	86
<b>Figura 4.39.</b> Balanza digital, con esta se determinó y registro la variación de la masa de las muestras de queso.....	86
<b>Figura 4.40.</b> Sensor de temperatura y humedad.....	87
<b>Figura 4.41.</b> Termo higrómetro.....	87
<b>Figura 4.42.</b> Sensores de temperatura.....	87
<b>Figura 4.43.</b> Solarímetro usado para medir la radiación solar.....	88
<b>Figura 4.43.</b> Solarímetro usado para medir la radiación solar.....	88
<b>Figura 4.45.</b> Muestras de queso deshidratadas, pruebas de secado controlado.....	88

## **CAPITULO V.**

<b>Figura 5.1.</b> Variación de las temperaturas alcanzadas en diversas partes del secador solar y del ambiente y radiación solar incidente en el tiempo. Evaluación del secador solar de queso con carga mínima y baja radiación solar, de la comunidad UNESCO, 30 de julio de 2010.....	98
<b>Figura 5.2.</b> Variación de la humedad relativa en el ambiente y dentro de la cámara de secado. Evaluación del secador solar de queso con carga mínima, de la comunidad UNESCO, 30 de Julio de 2010.....	99
<b>Figura 5.3.</b> Variación de la humedad dentro de la estufa, Pruebas de secado controlado de queso fresco chiapaneco, 22 de junio de 2012.....	100
<b>Figura 5.4.</b> Variación de la temperatura dentro de la estufa, Pruebas de secado controlado de queso fresco chiapaneco, 22 de junio de 2012.....	101
<b>Figura 5.5.</b> Variación del contenido de humedad de las muestras de queso	

fresco, para los tres tratamientos térmicos en el tiempo, Datos Experimentales, determinación de humedad por medio de termobalanza.....	102
<b>Figura 5.6.</b> Curva de Rapidez de Secado para Queso Fresco Chiapaneco, Variación de la Humedad Libre en el tiempo.....	103
<b>Figura 5.7.</b> Modelos usados, para el ajuste de los datos experimentales (Newton, Page, Henderson y Logarítmico), para 40°C.....	105
<b>Figura 5.8.</b> Modelos usados, para el ajuste de los datos experimentales (Newton, Page, Henderson y Logarítmico), para 55°C.....	106
<b>Figura 5.9.</b> Modelos usados, para el ajuste de los datos experimentales (Newton, Page, Henderson y Logarítmico), para 70°C.....	107
<b>Figura 5.10.</b> Correlación logarítmica de la humedad libre para las tres temperaturas tratadas.....	108
<b>Figura 5.11.</b> Correlación logarítmica de la humedad libre para 40 °C.....	109
<b>Figura 5.12.</b> Correlación logarítmica de la humedad libre para 55 °C.....	109
<b>Figura 5.13.</b> Correlación logarítmica de la humedad libre para 70 °C.....	109
<b>Figura 5.14.</b> Coeficiente de Difusión, obtenido experimentalmente y a partir de los Modelos de Newton y Henderson.....	112
<b>Figura 5.15.</b> Correlación logarítmica de Def, para cada modelo, ajuste lineal para determinar $E_a$ y $D_o$ .....	114
<b>Figura 5.16.</b> Variación de la masa de las muestras de queso deshidratadas solarmente para diferentes tamaños.....	115
<b>Figura 5.17</b> Variación del contenido de humedad de las muestras de queso deshidratadas solarmente para diferentes tamaños.....	116
<b>Figura 5.18</b> Curva de Rapidez de Secado Solar para diferentes tamaños de muestra.....	117
<b>Figura 5.19.</b> (a)Quesos frescos dentro de la cámara de secado, (b) Queso deshidratado Solarmente quesos enteros cuartos de queso y octavos de queso.....	119
<b>Figura 5.20.</b> Quesos deshidratados solarmente, maduración de 300 (a) y 1000 quesos (b).....	120

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la implementación y evaluación de un secador solar de tipo gabinete con circulación forzada para el secado solar de queso fresco chiapaneco, mediante el secador solar la energía radiante del sol eleva la temperatura del aire y evapora la humedad contenida en el queso. El Equipo de secado se caracteriza por ser completamente desarmable, con paredes aislantes que forman la cámara de secado y un colector solar de aire en la parte superior del equipo, las condiciones que se alcanzan en el secado solar son temperaturas de entre 27 y 50 °C, y una humedad relativa dentro de la cámara de entre 9 y 50 %. El secador se encuentra instalado en la Colonia Nuevo México, del municipio de Cintalapa, Chiapas, este es operado por sus habitantes, lo que aumenta la capacidad de producción y de secado de queso doble crema. El equipo presenta un buen desempeño in situ desde su instalación, permitiendo el secado solar del queso en la temporada de lluvias, donde existe una sobreproducción de leche y una caída de su precio, obteniendo lotes de 100 a 300 quesos secos, deshidratando más de 3000 quesos desde su instalación en 2009 a la fecha. Los productores afirman que el secador ha funcionado bien y recomienda su uso, pues les permite reducir el tiempo de secado del queso fresco chiapaneco de 15 a 30 días, comparado con el tiempo de secado tradicional de 30 a 60 días, además el uso del secador solar permite mayores condiciones de higiene al producto, debido a que este se deshidrata en una cámara de secado. Este proyecto, apporto información para el desarrollo tecnológico del proceso de secado solar del queso fresco chiapaneco, también se generaron experiencias basadas en la implementación del prototipo de secador solar estudiado, que darán pie a mejoras futuras en la construcción de secadores solares para queso, además este trabajo representa un antecedente de la introducción de secadores solares y del uso de las energías renovables en la comunidad de estudio. Para los estudios cinéticos del queso fresco chiapaneco se observó que la cinética de secado es fuertemente influenciada por la temperatura, debido a que a bajas temperaturas el proceso de secado del queso ocurre en el periodo de velocidad

constante y a medida que aumenta la temperatura el periodo de velocidad decreciente domina el proceso de secado.

## **ABSTRACT**

In this work are presented the results of the implementation and evaluation of a solar cabinet dryer with forced circulation type, for the solar drying of Chiapas fresh cheese. The solar dryer absorbe the sun's radiant energy raising the temperature of the air and evaporates the moisture content in cheese. The drying equipment is characterized by being completely disassembled, with insulating walls forming the drying chamber and a solar air collector on top of the equipment, the conditions in solar drying, are temperatures between 27 and 50 ° C and a relative humidity within the chamber between 9 and 50%. The dryer was installed in Colonia Nuevo Mexico, municipality of Cintalapa, Chiapas, it is operated by its habitants, increasing production capacity of fresh cheese and drye cheese. The solar dryer has a good site performance since its installation, allowing the solar drying of the cheese in the rainy season, where there is an overproduction of milk and a drop in price, getting lots of 100-300 dry cheeses, drying over 3000 cheeses since its installation in 2009 to date. Producers say that the solar dryer worked well and recommended to use it, allowing them to reduce the drying time of the cheese of 15-30 days, compared to traditional drying time of 30-60 days, in addition the use of the solar dryer allows higher hygiene product, because this is prosesing in a hermetic chamber. This project, bring information technology development process of solar drying of Chiapas cheese, based on the implementation of the prototype of solar dryer. The instalation will give rise to future improvements in the construction of solar dryers for cheese experiences, were also generated in addition of this work the introduction of solar dryers and the use of renewable energy in the community of study. The kinetic dryer studies of cheese show that the drying kinetics is strongly influenced by temperature, for low temperatures cheese drying process occurs in the period of constant speed and when the temperature increas period decreasing speed dominates. the drying process.

### I. INTRODUCCIÓN.

A continuación se presentan los aspectos a considerar para tener un panorama completo de este trabajo, **el producto**; el queso fresco y seco chiapaneco, **el proceso de secado**; como método de conservación de alimentos y el **secado solar**; una propuesta renovable alternativa al secado convencional. Como primer aspecto, se mencionan las características del queso fresco chiapaneco, también se presenta el queso seco o queso deshidratado, además de la problemática que conlleva el proceso de secado tradicional de queso. Como segundo aspecto se resalta el proceso de secado como un método de conservación de alimentos así como el secado convencional, así mismo se describe el proceso de secado tradicional del queso fresco chiapaneco. Como tercer aspecto se introduce el secado solar de queso fresco como una opción, a los métodos convencionales o tradicionales de secado que se usan actualmente, también se mencionan las ventajas de usar la energía del sol en este proceso productivo. Seguido se presenta el objetivo general y los objetivos particulares de esta tesis y finalmente se describe como está estructurado el presente trabajo de tesis, los temas a tocar en cada capítulo.

#### I.1. El producto.

El queso fresco chiapaneco es un producto elaborado con leche y cuajada de vaca, es de sabor y consistencia suave, de color blanco y sin corteza (Hernández *et al*, 2010), pertenece a los quesos típicos y genuinos, y exhibe ciertas características que lo hacen competir por una denominación “Queso Chiapas”. Este es elaborado en su mayoría de leche de vacas que pastan libre en sistemas extensivos de producción (Santos, 2006) y presenta una calidad y características variables, esto se debe a que son producidos artesanalmente en el campo chiapaneco.

El queso fresco es la presentación más común, y tiene que conservarse en refrigeración a una temperatura máxima de 7 °C para evitar su descomposición,

debido a su alto contenido de humedad propicio para la proliferación de hongos y bacterias, dándole un tiempo de anaquel corto. Pero cuando lo dejamos secar y madurar podemos molerlo y obtener un tipo de queso seco añejo para espolvorear, el queso seco tiene una buena aceptación y es consumido en platillos tradicionales, su presentación final es en polvo. El queso chiapaneco deshidratado puede encontrar un nicho de mercado en el mercado del recuerdo y sin olvidar el mercado local de la comida tradicional.

En el tiempo de lluvias existe una mayor abundancia de pastos para el ganado, y por lo tanto una sobreproducción de leche y una caída en el precio de venta, lo que hace de la elaboración de quesos una solución para la conservación de la leche en un producto de un mayor valor agregado y altamente nutritivo esencial en la dieta de los chiapanecos. La deshidratación de los quesos frescos en la temporada de mayor abundancia correspondiente al tiempo de lluvias, ofrece una solución a la conservación tanto de la leche como de los quesos frescos.

En Chiapas la forma de secado es la natural o tradicional en este proceso, el queso es expuesto a flujos de aire caliente lo que permite su deshidratación, el tiempo de secado de este método varia de 40 a 90 días en la sombra o en el sol dependiendo de las condiciones ambientales.

Debido a las condiciones climáticas y geográficas de la comunidad es muy difícil de secar queso de forma tradicional, se prolonga el tiempo de secado en el peor de los escenarios hasta 3 meses, y se arriesga el producto al enmohecimiento y a larvas.

### **I.2. El proceso de secado.**

El deshidratado, está definido como un proceso simultaneo de transporte de calor y masa entre el producto y el aire de secado, consiste en la remoción de humedad excesiva contenida en el producto generalmente por medio de la convección forzada (Montes *et al*, 2008).

Cuando la humedad es removida de un alimento, las levaduras, hongos y mohos no pueden crecer, ya que se disminuye la acción de las enzimas en los alimentos y se previene su deterioro (Berrones *et al*, 2009). La conservación de los alimentos a través del proceso de deshidratación reduce las pérdidas pos cosecha, pues el secado es un método simple y barato que ocasiona una reducción drástica de la actividad del agua del producto, facilitando su transporte y almacenamiento (Giraldo-Zúñiga *et al*, 2010).

Muchos productos agrícolas requieren un secado pos producción para su adecuada conservación hasta que llegan a los centros de consumo. Aún en el caso de los productos que se comercializan en forma fresca como lo es el queso, el secado ofrece una alternativa al productor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobre producción (Hermosillo *et al*, 1995).

En las regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial a gran escala basados en el uso de combustibles convencionales (Hermosillo *et al*, 1995), los cuales fácilmente podría brindar las condiciones de secado para el queso fresco chiapaneco. Este no es el caso de la deshidratación de queso en el estado de Chiapas, pues el método tradicional es el más extendido y el de más bajo costo.

Es claro que las condiciones ambientales actuales restringen el empleo de procesos que conlleven a un gasto considerable de energía, tal es el caso de la deshidratación artificial a través de estufas eléctricas y secadores a gas, un proceso de elevado consumo energético (Mulet *et al*, 1983).

El elevado costo de los combustibles, sumado a un considerable consumo, por la ineficiencia de los procesos de secado convencional, ha conducido no solamente a utilizar fuentes alternativas de energía, como la solar, sino el desarrollo de modelos matemáticos que permitan alcanzar las mejores condiciones del proceso (Ocampo *et al*, 2006).

La modelización de la cinética de secado de productos alimenticios es importante para estudios de diseño, optimización, y operación de los equipos utilizados para la deshidratación solar (López *et al*, 1995).

### **I.3. El secado solar.**

En los últimos años, la escasez y el encarecimiento de los combustibles ha presentado interés del uso de la energía solar, para el secado de productos a diversas escalas comerciales y para autoconsumo (Hermosillo *et al*, 1995)

Usar un secador solar acorde con las necesidades del producto a secar garantiza la calidad de este, lo cual es importante para la productividad de una empresa procesadora de alimentos secos que use energías renovables, esto garantiza alcanzar la mejores condiciones del proceso de secado de nuestro producto (Giraldo *et al*, 2010) La optimización del proceso de secado constituye un primer paso hacia una meta de ahorro energético y uso de fuentes alternativas de energía, debido a esto se registran cada vez más trabajos de investigación sobre procesos de secado con aire ambiente y con energía solar (Mulet *et al*, 1983)

Es un hecho que el proceso de secado solar de quesos para su conservación puede ser más lento en el tiempo de lluvias, donde los días se caracterizan por baja radiación solar y alta humedad relativa, en contraste en esta temporada es cuando existe una mayor demanda del proceso de secado solar de quesos frescos debido a la sobre producción de quesos, por lo que es importante asegurarse que los secadores solares operen aceptablemente bajo condiciones ambientales desfavorables, incluso considerar sistemas de respaldo para el secado, a partir otras fuentes de energías renovable, en trabajos futuros a los presentados en esta tesis.

Es necesario el uso y la aplicación de energías renovables, en los procesos de deshidratación de alimentos. Esto a través de secadores solares,

En nuestro estado, las acciones orientadas al uso de energías renovables deben ser una realidad estratégica en los programas de desarrollo sustentable principalmente en el sector agropecuario rural. (Ochoa *et al*, 2007). El uso de fuentes de energías renovables, como es el caso del aprovechamiento de la energía solar térmica, ha abierto la puerta para atender de forma amigable con el medio ambiente, esta energía es limpia ya que no emite gases contaminantes y a largo plazo la inversión se recupera.

Este proyecto, busca la aplicación de energías renovables dentro de los procesos productivos en específico la deshidratación solar de queso crema, además acercar estas tecnologías a los productores y así superar la barrera de desconocimiento y propiciara un efecto de difusión, promoción y replica. Falta mucho por hacer para convencer a los productores de las bondades economía que tiene el uso de este tipo de fuentes alternas de energía debido a la actual desinformación sobre el uso de las energías renovables, tanto en los productores como en las personas en general. (Ochoa *et al*, 2007).

### **I.4. Objetivo general.**

Secado solar y secado controlado de queso fresco chiapaneco.

### **I.5. Objetivos específicos.**

- Implementar el secador solar para queso en la comunidad UNESCO.
- Evaluar el secador solar.
- Realizar pruebas de secado controlado de queso fresco.
- Realizar pruebas de secado solar de queso fresco.

### **I.6. Estructura del trabajo de tesis**

En el capítulo 1, se presenta una introducción al secado solar de queso fresco así como la problemática que conlleva al secado de este producto, seguido se presentan los objetivos de esta tesis general y específicos. En el capítulo 2, se hace referencia a diversos antecedentes de secado solar de queso y demás productos alimenticios, además de mencionar estrategias para el impulso de las energías renovables y las realidades del desarrollo rural sustentable en el país. En el capítulo 3, se introducen conceptos básicos para este tema, la radiación solar, medición de la radiación solar, teoría de secado, modelo de Fick, la leche como materia prima, la producción de quesos y los métodos de secado natural existentes. En el capítulo 4, se aborda la construcción de un secador solar de tipo gabinete con circulación forzada, además de la instalación del mismo en la comunidad UNESCO, así como la evaluación térmica del secador solar. Así mismo se realizaron diversas pruebas de secado con el producto, estas consistieron en pruebas de secado bajo condiciones controladas en estufas eléctricas, que comprenden el secado de queso a diferentes temperaturas y su efecto en el tiempo de secado. Además pruebas de secado solar del queso fresco, en estas se deshidrataron muestras de queso de tres tamaños, queso entero, medio queso y cuartos de queso y se determinó el tiempo de secado. En el capítulo 5 se presentan los resultados de la evaluación del secador solar, así como determinación de la cinética de secado convencional y solar, además los resultados del modelado de la cinética de secado controlado, coeficiente de difusión y energía de activación. En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta tesis y trabajos futuros.

## **II. GENERALIDADES.**

### **II.1. Introducción.**

A continuación se presentan diversos antecedentes de secado, como primera parte una descripción del trabajo realizado en el estado de la deshidratación solar que queso fresco chiapaneco mediante un secador solar, además se pone en contexto dos métodos para el diseño de secadores solares y unas consideraciones a tener en cuenta para construir un secador solar, seguido se presenta una tabla en la que se concentra una descripción de las pruebas de secado de diversos autores, y como cuarta parte se presenta el concepto de desarrollo energético sustentable, las medidas que han tomado en el gobierno para favorecer un desarrollo rural sustentable, mediante el Plan Nacional de Desarrollo, Diversos programas de Sagarpa, Firco etc., Finalmente se presentan una serie de análisis, de las realidades a las que se afronta la población del medio rural, para poder alcanzar un desarrollo sustentable.

### **II.2. Antecedente del secado solar de queso fresco chiapaneco.**

Berrones R. y Saldaña T. 2009, presentaron por primera vez en el estado el uso de secadores solares para la deshidratación solar de queso fresco chiapaneco, el secador solar usado para las pruebas de secado corresponde a un secador solar de tipo gabinete. Este fue diseñado y construido en la Universidad Politécnica de Chiapas por Pantoja J. y Mojica E. 2009, para el secado de productos agrícolas en general. Cuenta con un sistema de almacenamiento térmico que consiste en un colector solar integral ya que además de calentar el aire para el proceso, calienta un fluido de trabajo a través de una rejilla de cobre integrada al mismo colector solar para aire, lo que permite el almacenamiento de calor dentro del secador solar a través de un tanque de almacenamiento de agua y un intercambiador de calor.

Durante la evaluación del secador solar y pruebas de secado solar de queso, se tomaron y registraron datos de temperatura dentro de la cámara del secador solar, así como de la humedad relativa dentro de esta y la humedad relativa del medio exterior. La temperatura en las chapas de los colectores, la temperatura del aire a la entrada y a la salida tanto del colector solar como de la cámara de secado, la radiación global para esos días no fue registrada.

Cabe mencionar que el trabajo de Berrones et al, representa el único antecedente del uso de secadores solares para el secado de queso fresco, y dentro de sus resultados destacan temperaturas de la cámara de secado de entre 30 y 50 °C, humedad ambiental superior a la humedad dentro de la cámara, determinación del contenido de humedad cada tres días para las muestras de queso, tiempo de secado de 15 días, para llevar el producto de una humedad inicial del 45% a una humedad final del 15 %.

También es importante recalcar que las pruebas de secado solar fueron realizadas en la plataforma de energías renovables de la universidad Politécnica de Chiapas, haciéndose estas pruebas en Tuxtla Gutiérrez, en contraste del secador solar de queso de este trabajo de tesis, que fue evaluado in situ en la comunidad UNESCO, la cual presenta alta humedad ambiental y nublados parciales.

Si bien es cierto que los antecedentes son únicos para el secado de queso, existen diversos antecedentes de diseño, construcción, evaluación y uso de secadores solares para la deshidratación de otros productos agrícolas y alimenticios, así como del uso de secadores solares tanto en plataforma como en el medio rural.

### **II.3. Antecedentes del diseño de secadores solares.**

Diversos han sido los trabajos de diseño de secadores solares para otros productos, también se registran diferentes métodos para el diseño de estos. El diseño de secadores es el primer paso para pensar en usar la tecnología de secado solar.

(Corp *et al*, 2009) señalan que dentro de los métodos generales para el diseño podemos encontrar métodos analíticos y numéricos.

La simulación computacional de secadores solares es uno de ellos, donde a través de modelos matemáticos que contemplan parámetros del proceso de secado, se predice el comportamiento del secador y por tanto el diseño óptimo. Otros métodos se basan en la investigación del proceso de secado y de modelos de predicción, y experiencias en la evaluación de secadores.

Para diseñar secadores solares, Corp Linares 2009, hace referencia a métodos que se soportan fundamentalmente en dos elementos, que son los balances de energía y el uso de modelos del comportamiento térmico del sistema. Actualmente el diseño de estos equipos se ha encaminado a dar soluciones geométricas de la superficie absorbidora que incrementen el rendimiento de la captación solar, conjuntamente con el empleo de materiales de mejores propiedades ópticas. Esto ha conllevado a que las diferencias de estos equipos se encuentran fundamentalmente en la configuración del plato absorbedor. Corp Linares señala que para el diseño de secadores solares la determinación del área del plato absorbedor dentro del colector solar y el volumen del secador son los dos parámetros principales para comenzar el diseño.

Este autor indica que los datos iniciales para el diseño de secadores solares son; Características del producto a secar, la temperatura de secado y la humedad inicial y final del material o la humedad a extraer, el tiempo de secado, la información sobre la procedencia de los parámetros anteriores (estufas eléctricas u otro tipo de secador) y los conocimientos del proceso de secado de cada producto. También indica que el diseño del secador depende de factores como la radiación solar, la composición del producto a secar, y las propiedades del aire.

En este método de diseño Corp Linares propone un modelo matemático para la determinación del volumen de la cámara de secado y una metodología de cálculo que contempla la determinación de los siguientes parámetros; Cantidad de agua a extraer del producto, seleccionar el tipo de secador, determinar las propiedades

psicométricas del aire, determinar el flujo volumétrico de aire y la potencia útil del secador, determinar el área del plato absorbedor, la potencia calorífica útil y específica y todas las dimensiones del secador a través de un método grafico o monograma y finalmente el cálculo comprobatorio.

Dentro de los métodos analíticos se encuentra el diseño a través de métodos gráficos, altamente dinámicos y de carácter práctico. Para este fin se presenta un nomograma, que aunque determina solo los parámetros fundamentales, como el área del plato absorbedor, el volumen del secador y el flujo de aire necesario para secar el material, reporta ventajas por su facilidad de uso y rapidez del cálculo.

En el nomograma propuesto, se muestra el trazado de las líneas, que partiendo del valor numérico que corresponde a los datos de entrada, se intercepta con las curvas de trabajo del gráfico.

Saravia y Sánchez 2007, proponen un método de diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto como información disponible para las consideraciones de diseño. El método propuesto se basa en el cálculo computacional del comportamiento del secador mediante un programa de nombre Simusol usándose un modelo fenomenológico que se ajusta utilizando como datos experimentales las curvas de secado de la muestra.

El programa Simusol permite el cálculo del comportamiento transitorio de sistemas térmicos. Las ecuaciones necesarias para la simulación del proceso de secado son varias, la primera de ellas consiste en la ecuación de la velocidad de secado esta ecuación considera un proceso de perdida de vapor del producto hacia la cámara y una velocidad de perdida de humedad, la segunda ecuación considera un balance térmico del producto, en la que se incorpora la transmisión de calor desde el aire hasta el producto a través de su superficie y otras ecuaciones para determinar la humedad absoluta, la humedad relativa, la presión de saturación del vapor de agua en el aire y la presión atmosférica del lugar. Las curvas de secado del producto se obtienen experimentalmente en forma sencilla mediante un pequeño túnel de secado donde se ajusta la temperatura de secado y la velocidad del aire, midiéndose la

temperatura del producto, temperatura y humedad del aire y pérdida de peso del producto como función del tiempo. El túnel de secado se ensayó con plátano.

En el trabajo de Saravia, la simulación se basa en las dos primeras ecuaciones mencionadas anteriormente. Las mismas tienen dos parámetros, coeficiente de difusión ( $h_d$ ) y coeficiente de convección ( $h_c$ ), estos deberán ser ajustados usando las medidas experimentales de la velocidad de secado y temperaturas obtenidas con el mini secador. En estas ecuaciones también se presenta el área total  $A_t$ , la cual no es constante durante el secado debido a que se produce una contracción en las muestras del producto. La metodología usada para determinar los dos parámetros  $h_c$  y  $h_d$ , consta de dos etapas: el tratamiento de los datos experimentales y el cálculo de  $A_{hd}$  y  $A_{hc}$  ambos como nuevas funciones del coeficiente de difusión y el coeficiente de convección las que se incluye el área total del producto a secar.

Es obvio que para el proceso de secado solar de queso, lo primero a realizarse sería pruebas de secado con el producto, El equipo usado para el secado de queso en la comunidad fue construido bajo criterios generales o métodos basados en experiencias previas de secado con nuestro producto, como es el caso del secador solar de tipo gabinete usado por Berrones y Saldaña. Ambos prototipos aportan información para el diseño posterior de un equipo de secado para queso fresco chiapaneco.

Rivasplata, Calízaya y Gutiérrez 2003, no proponen un método como tal para el diseño de secadores solares, pero sí mencionan las condiciones a considerar para la construcción de un secador solar, ellos lo conciben como un pre diseño en el que se deben de tomar en cuenta y conocer ciertas características para la construcción del equipo.

La primera de ellas corresponde a las características meteorológicas, para esto debemos conocer el lugar donde será instalado el secador solar, la velocidad del viento, la altitud, la humedad relativa.

La segunda pertenece a las características de operabilidad, estas se refieren a tener en cuenta las vías de comunicación y distancia de la zona, entonces para zonas alejadas, el secador solar debe ser desmontable, para así facilitar el transporte, para zonas poco alejadas, los secadores solares serán parcialmente desmontables y por ultimo para zonas cercanas los secadores solares pueden ser totalmente fijos.

La tercera contempla a las características del producto para escoger el tipo de bandejas a emplear. Las bandejas fijas están sujetas a la estructura del secador solar, estas ayudan a rigidizar el secador y se utilizan para productos pesados. Las bandejas móviles son portátiles o deslizables a través de rieles, las cuales permiten el manejo del producto dentro y fuera del secador, facilitando la limpieza y el secado de productos livianos. Las bandejas combinadas son bandejas fijas a un carrito, y este carrito es móvil o deslizable dentro del equipo de secado.

### **II.4. Antecedentes de pruebas de secado y cinética de secado.**

A continuación se presenta una Tabla 2.1. en ella se concentra la descripción de las pruebas de secado para cada trabajo, se consideran seis autores que han trabajado en la cinética de secado de diversos productos, ya sea controlado en su mayoría de trabajos o pruebas de secado solar, también se menciona el tipo de equipo usado para realizar las pruebas y se describe las variables a estudiar. En la mayoría de los casos se evalúa el efecto de la temperatura sobre el tiempo de secado, además del efecto; de la geometría, velocidad de secado, densidad de carga, y variedades diferentes de un mismo producto, sobre el tiempo de secado. Además se mencionan los resultados obtenidos para cada trabajo. Toda esta información nos permitió, determinar las condiciones de secado para las muestras de queso fresco con referencia a los trabajos analizados, el tamaño de la muestra, así como la metodología a seguir para realizar las pruebas de secado controlado y secado solar de queso fresco.

**Tabla 2.1.** Pruebas de Secado controlado para diversos autores.

Autor	Producto a secar	Equipo de secado	Experimento	Variables y Parámetros de operación	Resultados
Montes	Ñame	Secador de laboratorio tipo bandeja	Evaluación del efecto de la temperatura, variedad y geometría del producto a secar en el tiempo de secado	Geometría: rodajas y láminas. Variedades: 9811,089 y 9811,091. Temperatura: 45, 55 y 70. Velocidad de aire: 1 m/s	Influencia de la temperatura sobre el tiempo de secado, influencia de la geometría sobre tiempo de secado, la variedad no represento una influencia en el proceso de secado. La difusión es el mecanismo que gobierna el secado de ñame
Mulet	Zanahoria	Secadero de armario experimental	Efecto de las temperatura y densidades de carga ensayados sobre el secado del producto	Temperatura: 50,60 y 70 °C. Densidad de carga: 10, 20 y 30 Kg de producto/m <sup>2</sup> . Geometría: 10x10x8 mm	Influencia de la temperatura y la carga sobre el tiempo de secado, la mayor parte del proceso transcurre dentro del periodo decreciente para 50 y 60 °C, ,mientras que para las pruebas a 60 °C se observan dos periodos de velocidad decreciente
López et al.	Papa	Túnel de secado diseñado por el autor	Efecto de la variación de la velocidad y temperatura del aire en la Cinética de secado de papa cortada en lamina	Temperatura: 60,70, 80 y 85 °C. Velocidad del aire: 0.5, 1 y 1.5 m/s. Carga: 25 Kg/m <sup>2</sup>	Influencia de la temperatura sobre el coeficiente de difusión es más importante que la influencia de la velocidad del aire de secado, se observan dos periodos de velocidad de secado decreciente a medida que la temperatura disminuye

## CAPITULO II. GENERALIDADES

<p>Carranza <i>et al.</i></p>	<p>Plátano y Yuca</p>	<p>Horno secador de bandejas por convección forzada</p>	<p>Efecto de la variación de la temperatura, la velocidad de secado, y grosor de las muestras en la cinética de secado</p>	<p>Temperatura: 40, 50, 60 °C. Velocidad del aire: 5.08, 7.62 y 9.65 m/s. Geometría: 2x3x0.2 y 2x3x0.4 cm</p>	<p>Se observa una fuerte influencia de la velocidad del aire y de la temperatura sobre el tiempo de secado, presentando una pérdida de calidad a 70 °C, los mejores resultados son obtenidos a 50 °C y velocidad de aire de 7.62 m/s para yuca y plátano con un tiempo de secado de 180 min</p>
<p>Ocampo <i>et al.</i></p>	<p>Mango</p>	<p>Secador de laboratorio construido</p>	<p>Modelado para predecir el tiempo de secado a diferentes temperaturas</p>	<p>Temperatura: 50, 60,65 °C. Velocidad del aire 2 m/s</p>	<p>El proceso cinético del secado de la pulpa de mango puede ser modelado a partir del modelo de Crank simplificado, Un solo periodo de velocidad de secado decreciente sobre todo el proceso</p>
<p>Giraldo <i>et al.</i></p>	<p>Cupuacu</p>	<p>Secador laboratorio de bandejas</p>	<p>Efecto de la variación de la temperatura en la cinética de secado del producto</p>	<p>Temperatura: 50, 60 y 70 °C. Velocidad del aire: 1.5 m/s Geometría. Rodajas de 0.5 cm de espesor</p>	<p>Influencia de la temperatura sobre el tiempo de secado y la velocidad de secado, a mayores temperaturas mayores flujos de secado y aumento del coeficiente de convección de transferencia de calor</p>

## **II.5. Estrategias y acciones para el desarrollo energético sustentable y sustentabilidad en el sector rural.**

El análisis de las experiencias internacionales muestra que las nuevas fuentes renovables de energía son un tema prioritario en las agendas energéticas, tanto de los países industrializados como de muchas economías en desarrollo, gracias a sus efectos beneficiosos en las esferas económica, social y ambiental. Así, se les ha identificado como impulsoras del desarrollo y comercialización de nuevas tecnologías, de la creación de empleo, de la conservación de los recursos energéticos no renovables, de la reducción de gases de efecto invernadero. En resumen las nuevas fuentes de energías renovables se identifican ampliamente con los objetivos del desarrollo sustentable (Hernández H. *et al* 2004).

México ha emprendido una serie de acciones y estrategias para lograr que el sector rural contribuya al desarrollo de actividades productivas más amigables con el medio ambiente que hagan frente a la demanda de energía rural y además prevengan los efectos del calentamiento global y fomenten un desarrollo rural sustentable. En diciembre de 2001 el gobierno Mexicano promulgó su *Ley de Desarrollo Rural Sustentable*, ley que busca establecer y fortalecer las instancias de participación social del sector rural en la toma de decisiones a través de la creación de los consejos de Desarrollo Rural Sustentable a nivel Municipal, Estatal y Nacional y sentar las bases para la coordinación institucional de tal forma que todas las dependencias que inciden en el sector rural puedan conjuntar sus programas y acciones institucionales en respuesta a las demandas planteadas en estas instancias de representación de la sociedad rural (Ley de Desarrollo Rural Sustentable, 2001).

*En el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012*, la política pública del Gobierno Mexicano reconocía el derecho a la sustentabilidad ambiental, mediante el uso responsable e inteligente de los recursos naturales además proponía, la transversalidad de las políticas públicas para preservar el medio ambiente.

En contraste los esfuerzos de conservación de los recursos naturales se ven obstaculizados por un círculo vicioso que incluye: pobreza, agotamiento de los

recursos naturales, deterioro ambiental y más pobreza por lo que para la protección de los recursos se debe de dar solución a los problemas sociales y económicos.

El plan PND pasado, consideraba al medio ambiente como uno de los elementos fundamentales para lograr la competitividad de las actividades productivas y para el desarrollo económico y social del país, de tal forma que uno de los 5 ejes con que cuenta este Plan es el de sustentabilidad ambiental, (eje cuatro) en este perfilan los objetivos y compromisos que el país asume para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, mediante proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio MDL; tecnologías limpias, energías renovables; uso eficiente de la energía así como las medidas que habrá de asumir para adaptarse a los efectos de este cambio climático. La política para la sustentabilidad energética, buscaba incrementar la eficiencia energética y el aprovechamiento de las energías renovables en México, con una visión de largo plazo.

*El Programa Sectorial de Energía (PROSENER) 2007-2012* contenía tres de los nueve objetivos del PND, relacionados con el impulso a las energías renovables: (Alatorre C., *et al* 2009).

- Equilibrar el portafolio de fuentes primarias de energía.
- Fomentar el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y biocombustibles técnica, económica, ambiental y socialmente viables.
- Mitigar el incremento en las emisiones de gases efecto invernadero.

Es obvio que la energía es un importante elemento del desarrollo socioeconómico de las ciudades y del sector rural, no como fin en sí misma sino a través de la demanda de los servicios que permite ofrecer, como el bombeo de agua potable, la prolongación del día gracias a la iluminación, y la preparación de alimentos, el secado de semillas y madera, la leña para la cocción de alimentos, el transporte y la generación de energía eléctrica con plantas y motores de diesel y gasolina actualmente. En general, el aumento de la demanda de energía está directamente relacionado con el desarrollo socioeconómico. Pero las poblaciones rurales de

muchos países en desarrollo han quedado excluidas de la mayor parte de los beneficios del desarrollo económico y de la transición energética hacia fuentes de energías renovables.

A fines de 1960 se plantearon por primera vez las cuestiones y los problemas de la energía rural, de los problemas para su producción y conservación al ser recursos no renovables a la velocidad de extracción que comenzaba a aumentar. Las fuentes tradicionales de energía; leña, residuos de biomasa, tracción humana y animal, aire y sol eran los principales y con frecuencia los únicos recursos energéticos disponibles para millones de familias rurales que comenzaban a ser insuficientes para alcanzar el modelo de desarrollo económico y energético perteneciente en su época, con limitaciones y efectos en el bienestar rural en ámbitos como la salud, la seguridad alimentaria, la producción agrícola y la seguridad energética.

Retomando el fomento de las energías renovables la secretaria de Agricultura, incluyó en sus Programas de trabajo para el periodo 2007-2012 estrategias para hacer frente a la variabilidad climática generada por el calentamiento global. En enero de 2010 se emitió un comunicado de SAGARPA en la que daba a conocer que se ejercerían recursos por 60.5 millones de dólares (50 MDD préstamo del BM y 10.5 como donativo del Fondo Mundial para el Medio Ambiente-GEF), en la aplicación de tecnologías e infraestructura en proyectos productivos. Para contribuir a la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que incidan en la mitigación de los impactos del Cambio Climático.

Diez de Sollano Elcoro, Director General de FIRCO, explicó que el Programa de Desarrollo Rural Sustentable, orientado al uso eficiente de energías renovables tenía metas a corto, mediano y largo plazo: En 2012 instalaron 1000 sistemas de energías renovables, proporcionando el intercambio de experiencias y líneas de cooperación entre países de Europa y América Latina promovida por el BM, toda vez que uno de los objetivos centrales de estos programas fue multiplicar estas acciones a efecto de cubrir las necesidades que presentan los sectores agropecuarios para utilizar

mejores modelos de producción y uso de energías limpias, estas acciones se enfocaron a productores de mediana escala en México.

El Proyecto “*Agricultura y Desarrollo Sustentable*”, reconocido por el Banco Mundial, detecto opciones de innovación tecnológica en nuevas aplicaciones de energía renovable en agronegociós como el calentamiento de aire para regular el crecimiento vegetativo, el calentamiento solar de agua para el tratamiento hidrotérmico del mango, entre otras acciones.

Reafirmando este compromiso la Secretaria de Energía lanzo una Estrategia Nacional de Acción Climática mediante la propuesta de un *Programa Especial de Cambio Climático*, en el que se estableció la visión de largo plazo sobre la mitigación global y las trayectorias de mitigación y adaptación de México ante diversos escenarios; en materia de mitigación se establecen las acciones y metas específicas enfocadas a la generación y uso de energía, en agricultura, bosques, usos de suelo y en el sector privado, las medidas de adaptación que deberán implementarse en los distintos sectores productivos del país (SAGARPA, 2010).

El “*Programa Estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región Sur 2010*” en sus lineamientos emitidos por la SAGARPA hace notar que el PND también marcaba dentro de sus principales ejes de acción: lograr una economía competitiva y generadora de empleos y garantizar la igualdad de oportunidades y la sustentabilidad ambiental.

El Sector Agropecuario y Pesquero es estratégico y prioritario para el desarrollo del País, porque ofrece los alimentos que consumen las familias mexicanas. En contraste, los productores agropecuarios y pesqueros enfrentan limitantes por bajos niveles de capitalización de sus unidades económicas, insuficiente acceso a servicios financieros en el medio rural, deterioro de los recursos naturales para la producción primaria, reducidos márgenes de operación, bajas capacidades para la inserción sostenible de sus productos en los mercados, dificultad de reincorporarse a sus actividades productivas ante la ocurrencia de contingencias climatológicas, e insuficiente profesionalización de las organizaciones sociales y económicas; teniendo

como efecto bajos niveles de ingreso de los productores, provenientes de sus actividades económicas, que en algunos casos significa altos índices de pobreza. Lo que obliga a que los recursos gubernamentales destinados al desarrollo rural deban ser utilizados de una manera más eficiente para atender la problemática en la que está inmerso el sector. Para atender esta problemática, la SAGARPA ha establecido materializar la consecución de cinco objetivos que se propone alcanzar en forma conjunta con los tres órdenes de gobierno y la sociedad rural:

Elevar el nivel de desarrollo humano y patrimonial de los mexicanos que viven en las zonas rurales y costeras.

- Abastecer el mercado interno con alimentos de calidad, sanos y accesibles provenientes de nuestros campos y mares.
- Mejorar los ingresos de los productores incrementando nuestra presencia en los mercados globales, vinculándolos con los procesos de agregación de valor y la producción de bioenergéticos.
- Revertir el deterioro de los ecosistemas, a través de acciones para preservar el agua, el suelo y la biodiversidad;
- Conducir el desarrollo armónico del medio rural mediante acciones concertadas, tomando acuerdos con todos los actores de la sociedad rural.

Por lo que, para el logro de estos objetivos, la SAGARPA ha consolidado todos los apoyos en ocho grandes programas de los cuales se derivan diversos proyectos, estrategias y acciones que permiten revertir la problemática planteada. En función de lo anterior, se implementa el “Proyecto Estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región Sur Sureste de México – Trópico Húmedo”, que tiene diversas componentes de apoyo que permiten garantizar la igualdad de oportunidades y la sustentabilidad ambiental en ésta región del País. El programa tiene como objetivo reforzar de manera focalizada las acciones de la SAGARPA en ésta región para coadyuvar a nivelar el desarrollo rural del sur sureste con el resto del país, aprovechando su potencial productivo y sus ventajas comparativas, en

armonía con el medio ambiente y con el desarrollo social además de capitalizar a las unidades de producción agrícolas y acuícolas, particularmente de los sistemas Café, Cacao y Cítricos, así como camarón, ostión y tilapia.

Es obvio que existen diversos apoyos por parte de las instituciones de gobierno, lo importante para este proyecto es canalizar cualquier tipo de recurso para la capitalización y tecnificación de la unidad de producción y la capacitación de los productores de queso de la comunidad a un largo plazo, independiente al trabajo a alcanzar por este trabajo y buscar un verdadero desarrollo sustentable en un sentido más amplio.

*El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013-2018*, propone el impuso y aprovechamiento de las energías renovables, en su meta número IV. México Prospero, este señala la necesidad de impulsar a los sectores de mayor importancia para el desarrollo del país como lo es el energético.

*El Programa Sectorial de Energía (PROSENER) 2013-2018* presenta las líneas de acción en materia energética, estas están alineadas a las metas del PND, 2013-2018. Este programa propone políticas en materia energética sólidamente sustentadas para impulsar las inversiones del sector, fomentar nuevos y diversos mercados, democratizar la productividad y orientar el desarrollo al cumplimiento de las principales metas del sector. Además menciona que las energías renovables deben contribuir para enfrentar los retos en materia de diversificación y seguridad energética.

*El Programa Nacional de Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE) 2013-2018*. Menciona que el uso y suministro de energía son esenciales para las actividades productivas de la sociedad. Por lo que su escasez deriva en un obstáculo para el desarrollo de cualquier economía.

A su vez equipos más eficientes ya están en el mercado como lámparas refrigeradores, motores y vehículos, que consumen 5 veces menos energía que equipos con el mismo propósito existentes en el mercado desde hace 20 años. El

cambio de tecnologías más eficientes brinda la oportunidad de aprovechar de forma sustentable la energía.

Por otro lado las necesidades de las empresas de enfrentar mercados cada vez más competitivos y sujetos a crecientes requerimiento de menores impactos ambientales, han generado y siguen generando grandes retos y oportunidades.

Este potencial de uso eficiente de la energía y un variado conjunto de razones de interés público, que van desde la racionalización de la energía hasta el combate al cambio climático, han llevado a que se diseñen y pongan en operación una gran variedad de programas de gobierno, los que se impulsan con diversos objetivos. (Figura 2.1)

IMPULSOR	OBJETIVOS TÍPICOS
Desarrollo económico y competitividad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lograr costos más asequibles para los consumidores de energía</li> <li>• Reducir la intensidad energética</li> <li>• Incrementar la competitividad económica industrial y nacional</li> <li>• Reducir los costos de producción</li> </ul>
Seguridad energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir las importaciones de energía</li> <li>• Reducir la demanda interna para maximizar las exportaciones</li> <li>• Elevar la confiabilidad del sistema energético</li> <li>• Controlar el aumento de la demanda de energía</li> </ul>
Cambio climático	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribuir a los esfuerzos de mitigación y adaptación mundiales</li> <li>• Cumplir las obligaciones estipuladas en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)</li> </ul>
Salud pública	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir la contaminación local y en interiores</li> </ul>

Fuente: 2012 - Agencia Internacional de Energía, Gobernanza de la eficiencia energética.

**Figura 2.1.** Impulsores de las políticas de eficiencia del gobierno.

Es imperativo satisfacer las necesidades energéticas del país, identificando de manera anticipada los requerimientos asociados al crecimiento económico y extenderlos a todos los mexicanos. El PRONASE 2013-2018, ha desarrollado sus objetivos alineados a los objetivos y estrategias al PND 2013-2018 y al PROSENER 2013-2018 (Figura 2.2)

Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018			Programa Sectorial de Energía 2013-2018	Programa Nacional de Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018
Meta Nacional	Objetivo de la Meta Nacional	Estrategias del Objetivo de la Meta Nacional	Objetivo del PROSENER	Objetivos del Programa
<b>México Próspero</b>	Objetivo 4.6. Abastecer de energía al país con precios competitivos, calidad y eficiencia a lo largo de la cadena productiva.	Estrategia 4.6.1. Asegurar el abastecimiento de petróleo crudo, gas natural y petrolíferos que demanda el país	Objetivo 5. Ampliar la utilización de fuentes de energía limpias y renovables, promoviendo la eficiencia energética y la responsabilidad social y ambiental	Objetivo 1. Diseñar y desarrollar programas y acciones que propicien el uso óptimo de energía en procesos y actividades de la cadena energética nacional.
		Estrategia 4.6.2. Asegurar el abastecimiento racional de energía eléctrica a lo largo del país.		Objetivo 2. Fortalecer la regulación de la eficiencia energética para aparatos y sistemas consumidores de energía fabricados y/o comercializados en el país.
				Objetivo 3. Fortalecer los sistemas e instancias de gobernanza de la eficiencia energética a nivel federal, estatal y municipal e integrando instituciones públicas, privadas, académicas y sociales.
				Objetivo 4. Fomentar el desarrollo de capacidades técnicas y tecnológicas vinculadas al aprovechamiento sustentable de la energía.
				Objetivo 5. Contribuir en la formación y difusión de la cultura del ahorro de energía entre la población.
				Objetivo 6. Promover la investigación y desarrollo tecnológico en eficiencia energética.

*Figura 2.2. Alineación de los objetivos de PRONASE 2013-2018 al PND 2013-2018 y al PROSENER 2013-2018.*

## II.6. Realidades del desarrollo sustentable en el sector rural.

A pesar de todas las leyes y políticas a implementarse por parte del gobierno, es visible que la realidad es otra. Los grandes retos que enfrenta actualmente la humanidad (crisis financiera, crisis alimentaria, calentamiento global, desigualdades sociales y económicas) crean una situación en la cual todos nosotros, quienes vivimos en las llamadas economías en desarrollo, estamos entre la espada y la pared

de consumir los recursos de una manera consciente o en la otra mira de una manera consumista hasta su terminación.

Por una parte es evidente que se deben de atender las preocupaciones relacionadas con el medio ambiente y promover políticas sustentables en las que todos nosotros podamos tener acceso a empleo justo y bien remunerado, servicios médicos y educativos de alta calidad, poder adquirir una vivienda digna, alimentos, ropa y finalmente, pero no menos importante, acceder a fuentes de esparcimiento y diversión, sin embargo, satisfacer todas estas necesidades de bienes y servicios parecen topar con la limitante de recursos naturales, en particular de energéticos. Ya es evidente la deforestación de selvas tropicales; la decadencia de los mega yacimientos petroleros, la contaminación del mar, tierra y aire.

El cambio climático, otra consecuencia de la sobreexplotación de recursos, ya se hace notar en las afectaciones a la producción de alimentos. Este efecto climático es ocasionado por la acumulación en exceso de gases invernadero entre ellos, el más importante, el dióxido de carbono "CO<sub>2</sub>" cuya producción se liga de manera directa con las fuentes de energía provenientes de los hidrocarburos, por lo tanto, esas grandes necesidades de generación de bienes y servicios parecen estar en contra de la lógica de preservación del medio ambiente y de las reservas reales de energéticos que el mundo tiene a su disposición.

Problemas de amplio espectro tal como el cambio climático, la crisis de alimentos, desigualdades económicas y sociales no pueden ser afrontados con un enfoque único y particular puesto que son temas que involucran a muchos actores de una población con distintos tipos de intereses, metas y objetivos. Los enfoques hacia la solución del problema afortunadamente convergen, y aunque existen muchos puntos de vista a nivel global, se ve un consenso en la necesidad del desarrollo de fuentes alternas de energía.

Romo (2009), explica que la pobreza es eminentemente rural con diversos orígenes, el recalca que las repercusiones de este cambio climático se han hecho notar en el sector rural mexicano; En el centro y en el norte del territorio son vulnerables a una

mayor severidad y frecuencia de los meses secos acentuándose en los efectos de las sequías en el sector agropecuario. En contraposición en el sur y en las costas de México las precipitaciones que se presentan ahora con mayor intensidad y concentración en la época de lluvias, ponen en peligro a las personas, su abastecimiento de alimento, a los cultivos y ganado de las comunidades rurales. La presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos degradan la calidad de la tierra y afecta por deficiencia o exceso, la disponibilidad de los recursos hídricos y por tanto la sustentabilidad de las actividades agropecuarias, forestales y en general la actividad humana.

Martínez y Arellano (2007), hacen notar que la pérdida de suelo, la deforestación, la desaparición de la flora y fauna silvestre, la escases del agua, el cambio en el ciclo de las lluvias, el incremento de las plagas en los cultivos, la disminución de la fertilidad del suelo, el aumento de las enfermedades en el ganado, los altos costos de producción y mínimos rendimientos, los elevados índices de migración, el limitado acceso a los mercados y los bajos ingresos obtenidos, son los problemas que aquejan al sector rural.

El Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible (IIDS) afirma que la energía renovable se ha convertido no sólo una cuestión ambiental, sino también en un componente social y económico esencial para lograr un futuro energético sostenible. Que la energía renovable es un eje fundamental para abordar los desafíos impuestos por el cambio climático. Y que también es un fundamento esencial para satisfacer las necesidades de la población rural en situación de pobreza.

Según Romo (2009) para alcanzar el desarrollo sustentable, se requiere que los gobiernos locales promuevan el desarrollo del capital humano, para que los habitantes rurales sean actores de su propio desarrollo, incentiven el desarrollo del capital social para tener en las comunidades rurales mayor capacidad de organización y de participación democrática en la toma de decisiones que afectan a la comunidad, garantizar la construcción de infraestructura física que posibilite su comunicación, educación, salud, acceso a la información y los mercados y

garantizando y estimulando el desarrollo económico para la generación de bienes y servicios así como para la agregación de valor a la producción primaria derivada de la actividad agropecuaria y de pesca, además de promover y estimular la creación de fuentes de empleo e ingreso no agropecuario y el manejo racional y sustentable de los recursos naturales utilizados en la producción primaria.

Para Martínez y Arellano (2007), el desarrollo sustentable debe alcanzar metas de aprovechamiento de los recursos disponibles, que conlleven a un crecimiento económico y de manejo de los mismo, con el fin de preservarlos, conservarlos o protegerlos, alcanzando una sustentabilidad ambiental, a través de sistemas participativos y democráticos. El propone que cada persona percibe y construye la realidad de manera diferente, según sus vivencias, conocimientos, experiencias, valores y creencias, debido a esto las prácticas que desarrollan estos actores son de suma importancia.

Al igual que Romo (2007), Martínez y Arellano (2007) coinciden en que; para que el desarrollo sustentable se manifieste, es necesario que las comunidades rurales, tengan acceso real a las decisiones de su comunidad. Para que esto sea viable es necesario un proceso en el cual las comunidades desarrollen su capacidad de autogestión, que se informen, aprendan, se capaciten, adquieran y desarrollen nuevas habilidades individuales y colectivas. Y así se pueda llegar a un nuevo esquema compartido dentro de la comunidad del manejo del agua y de los recursos naturales, surgen así entonces derechos, responsabilidades, roles, compromisos e interacciones entre los pobladores de la comunidad.

## **III. FUNDAMENTOS TEORICOS.**

### **III.1. Introducción.**

En esta parte de la tesis se presentan los conceptos fundamentales, necesarios para desarrollar este proyecto. Como primer tema se describe la energía solar como fuente de generación de energía, el sol y algunas características, así mismo se incluye la radiación solar, además como se calcula y como se mide. Como segundo tema se aborda la tecnología solar para el secado, un método de conservación de alimentos, se describen también los tipos de secadores solares, como funcionan estos equipos y las ventajas del uso del secado solar. Como cuarto tema se presenta la teoría de secado para alimentos, se mencionan los mecanismos de deshidratación, se describe el proceso de secado así como los cambios esperados en el producto, principalmente la pérdida de humedad, así como la conservación de vitaminas, a su vez se explican los diferentes periodos de velocidades de secado y la teoría de la difusión que rige el proceso de secado de diversos productos. Como último se trata información referente al producto de esta tesis el queso crema Chiapaneco fresco y seco, como se produce y como se deshidrata por diversos métodos tradicionales en el estado de Chiapas.

### **III.2. La Energía Solar.**

#### **III.2.1. Naturaleza de la energía solar.**

El Sol es una esfera de gases de alta temperatura, con un diámetro de  $1.39 \times 10^9 \text{m}$ , situado a una distancia media de  $1.5 \times 10^{11} \text{m}$  respecto de la tierra. Esta distancia se llama unidad astronómica. Se estima que la temperatura en el interior del sol debe ser del orden de  $10^7 \text{K}$ , pero en la fotosfera, es decir en la superficie externa del sol,

### CAPITULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

la temperatura “efectiva de cuerpo negro” es entre 5762 y 6300 °K. El sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión en las cuales dos átomos de hidrogeno producen helio, o un átomo de helio y uno de hidrogeno producen litio.

Se llama flujo de materia o energía a la cantidad de esta que pasa a través de una superficie, por unidad de área y por unidad de tiempo. Por tanto la unidades físicas de este flujo son unidades de energía por unidad de área por unidad de tiempo, J/s.m<sup>2</sup> equivalente a W/m<sup>2</sup>. Para fines prácticos la emisión de energía solar puede considerarse constante. Es importante considerar que la disponibilidad del recurso energético solar está mucho más ligado a las variaciones meteorológicas en la superficie terrestre, que a solares.

La constante solar  $G_{sc}$ , es el flujo de energía proveniente del sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmosfera.

$$G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$$

$$G_{sc} = 1.940 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{min}} = 428 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \text{hr}} = 4871 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{hr}}$$

Debido a la órbita cuasi elíptica y al perihelio y afelio durante el año. La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año se presenta a continuación, en donde  $G_{on}$  es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación, y  $n$  es el número de día del año:

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (3.1)$$

**Tabla 3.1.** Ecuaciones para convertir el día del mes, en el número de día del año.

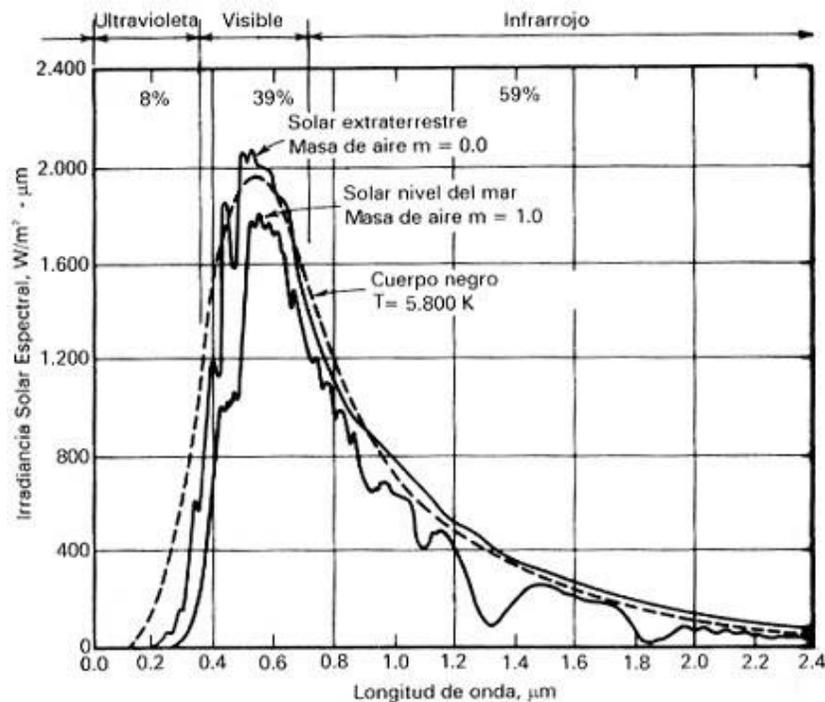
Mes	“n” para el i-ésimo día del mes
Enero	I

### CAPITULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Febrero	31 + i
Marzo	59 + i
Abril	90 + i
Mayo	120 + i
Junio	151 + i
Julio	181 + i
Agosto	212 + i
Septiembre	243 + i
Octubre	273 + i
Noviembre	304 + i
Diciembre	334 l

Todos los cuerpos emiten cierta cantidad de radiación en virtud de su temperatura. A mayor temperatura, la intensidad de la emisión es mayor, el tipo de radiación cambia hacia el IR al VIS y al UV, a medida que aumenta la temperatura.

La Figura 3.1. muestra la irradiancia espectral (energía por unidad de tiempo, en la unidad de área, por unidad de longitud de onda) en función de la longitud de onda. La línea continua pero irregular corresponde a la irradiancia observada, medida desde la Tierra. La curva punteada representa la irradiancia espectral que tendría un cuerpo negro (radiador ideal), que se encontrara a la temperatura de 5762 K.



**Figura 3.1.** Irradiancia espectral del Sol y de un cuerpo negro a 5763 K.

### III.2.2. Radiación solar.

Se conoce como *radiación directa*, la que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La radiación extraterrestre es, por tanto, radiación directa. Generalmente usa el subíndice "**b**" para indicar radiación directa, por el término que se utiliza en inglés: beam (haz, rayo).

La *radiación difusa* es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. Suele utilizarse el subíndice "**d**" para la radiación difusa.

Por otro lado, se conoce como *radiación terrestre* la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.

Se conoce como *radiación total*, la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie. Por tanto, la radiación global es la suma de la directa más la difusa.

Para expresar la potencia solar y en general, de cualquier radiación, se utiliza el término irradiancia. La *irradiancia*,  $W/m^2$ , es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Generalmente se usa el símbolo  $G$  para la irradiancia, junto con los subíndices adecuados:  $G_o$ ,  $G_b$ ,  $G_d$ , para la irradiancia extraterrestre, directa, difusa, etc. Es energía que incide instantáneamente sobre una superficie.

La cantidad de energía, por unidad de área, que incide durante un período de tiempo dado, recibe el nombre de *irradiación*,  $J/m^2$ , y no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante el período en cuestión. Generalmente se usa el símbolo "**I**" para la insolación por hora, mientras que "**H**" se usa para la insolación en el período de un día. Se aplican los mismos subíndices, por ejemplo:  $H_o$  simboliza la irradiación extraterrestre en un día;  $I_d$  simboliza la irradiación difusa en una hora, etc.

De acuerdo con lo anterior, la relación entre la irradiación y la irradiancia está dada por la expresión:

$$I = \int_{t_2}^{t_1} G(t)dt \quad (3.2)$$

En donde la irradiación se está calculando desde el tiempo  $t_1$  hasta el tiempo  $t_2$  y la irradiancia se considera función del tiempo.

El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no sólo de la irradiancia que exista, sino también de la orientación que tenga la superficie en cuestión respecto de la dirección de propagación de la radiación. La irradiancia será máxima sobre un plano que esté en posición normal a la dirección de propagación de la radiación. La intensidad de radiación sobre la superficie dependerá pues, del ángulo  $\theta$  que forme la normal de la superficie, respecto de la dirección de propagación de la radiación. Este ángulo  $\theta$  se conoce con el nombre de *ángulo de incidencia*. Entonces, la irradiancia incidente sobre la superficie será:

$$G_T = G_n \cos\theta \quad (3.3)$$

En donde  $G_T$  se refiere a la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación y  $G_n$  se refiere a la irradiancia medida sobre un plano normal a la dirección de propagación de la radiación.

### III.2.3. Estimación y medición de la radiación solar.

Para el cálculo de la radiación directa (irradiancia e irradiación), es el que se refiere a una superficie horizontal. Combinando algunas de las ecuaciones anteriores (3.1 y 3.3), tendremos que la irradiancia directa, sobre un plano horizontal es:

$$G_0 = G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (3.4)$$

Donde  $G_{sc}$  es la constante solar,  $n$  es el número de día del año y  $\theta_z$  es el ángulo cenital. Combinando esta expresión con la del coseno del ángulo cenital, se obtiene la ecuación para la irradiancia directa sobre un plano horizontal, en cualquier fecha ( $n$ ,  $\delta$ ), cualquier lugar ( $\phi$ ) y cualquier hora ( $\omega$ ):

$$G_0 = G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (3.5)$$

Integrando esta ecuación, desde la salida hasta la puesta del Sol, se obtiene la irradiación a lo largo de un día,  $H_0$ . Sólo es necesario calcular previamente el ángulo horario a la puesta del Sol,  $\omega_s$ .

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (3.6)$$

En esta ecuación, la irradiación  $H_0$  está dada en  $J/m^2$ . Por último, una expresión para calcular la irradiación incidente en un plano horizontal,  $I_0$ , desde un tiempo inicial hasta un tiempo final, con ángulos horarios  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , respectivamente, en  $J/m^2$ , es:

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right] \times \left[ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (3.7)$$

Para muchas aplicaciones prácticas, no basta con calcular la radiación teórica que incide sobre un lugar o sobre un equipo solar determinado. Es necesario hacer las mediciones, para tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector.

Existen varios métodos para medir la radiación solar, ya sea en forma de irradiancia o de irradiación. El método más aceptado común mente, es el uso de un piranómetro.

Un *piranómetro*, es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal.

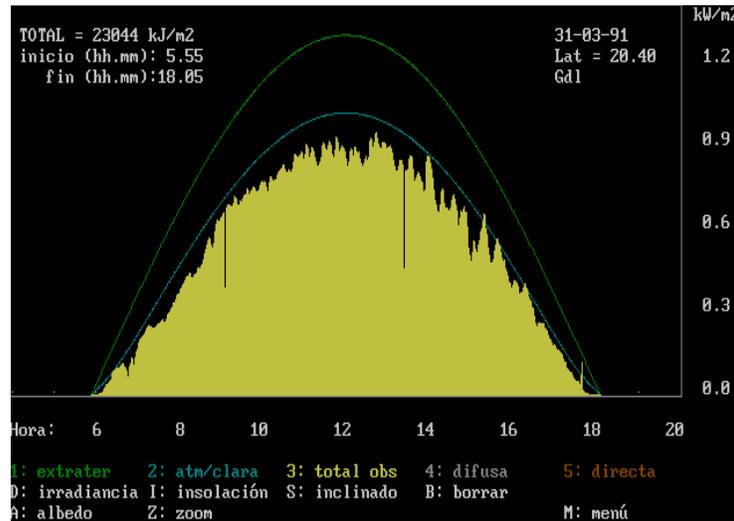
La Figura 3.2. muestra un esquema de un piranómetro, en este se observa la cúpula de vidrio para evitar el enfriamiento de los sensores de temperatura.



**Figura 3.2.** Esquema de un piranómetro.

Otro instrumento para medir radiación solar es el piroheliómetro, es un instrumento que mide la radiación directa. A diferencia del piranómetro, que suele instalarse fijo, el piroheliómetro debe contar con un sistema de movimiento de relojería para seguir el sol con gran precisión.

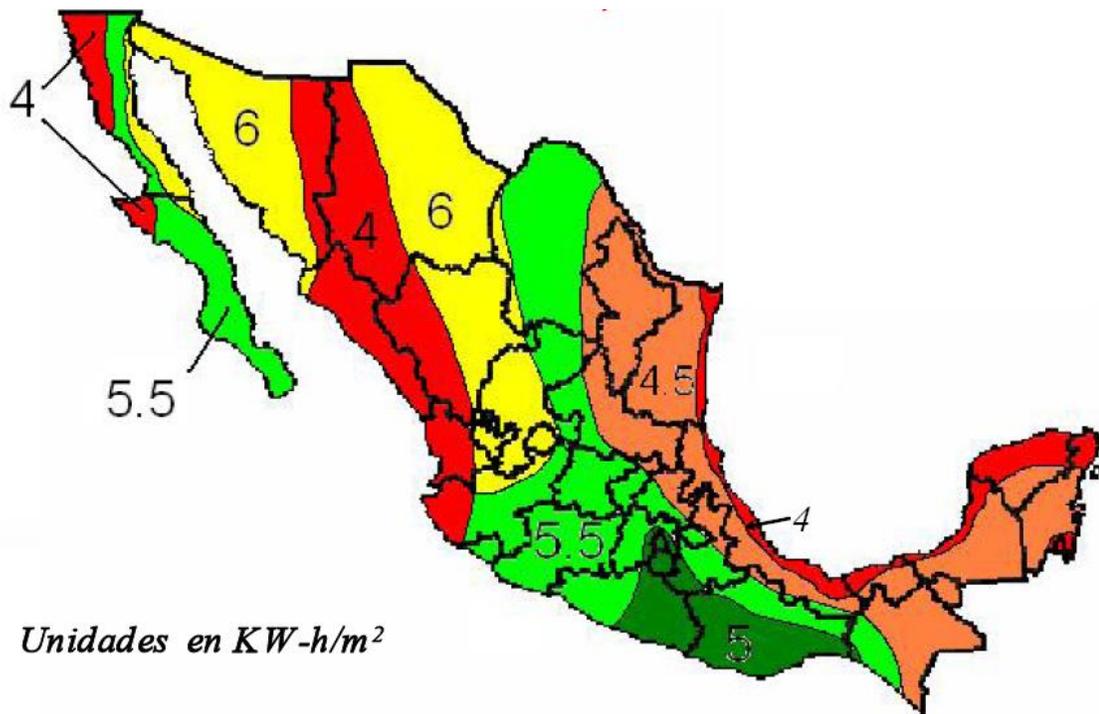
La información generada por un piranómetro debe ser registrada, ya sea por un método gráfico o electrónico. Esto permite entonces integrar las irradiancia en períodos dados, para obtener la irradiación correspondiente. La Figura 3.3 muestra la pantalla de un programa de cómputo, que permite recuperar la lectura del piranómetro, además de permitir el cálculo de la irradiancia en atmósfera clara y extraterrestre.



**Figura 3.3.** Pantalla del programa Datasol, que muestra la radiación medida y calculada.

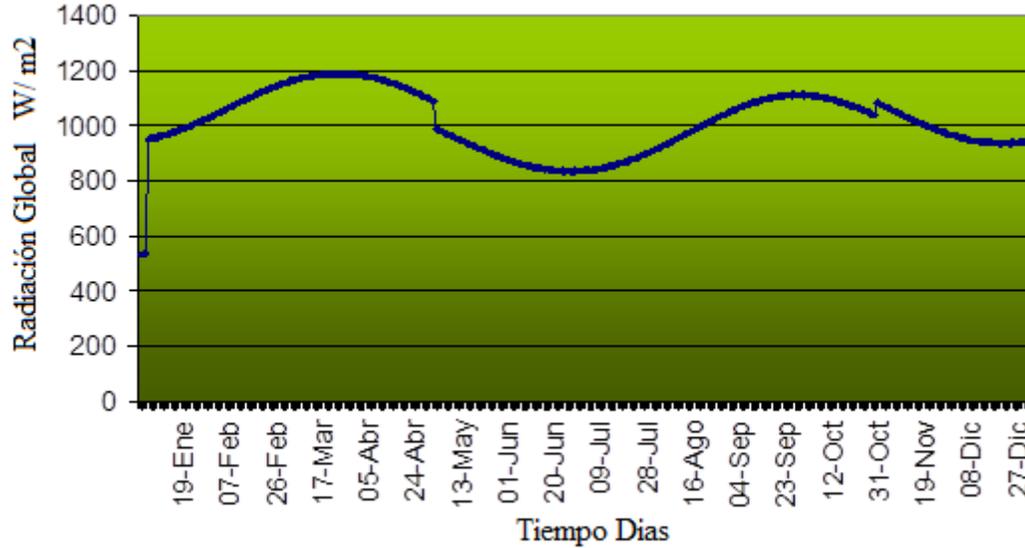
Cuando la irradiancia medida está muy por debajo de la de atmósfera clara, se debe generalmente a la aparición de nublados que efectivamente haya una mayor irradiancia que la calculada, b) porque las nubes que rodean al Sol (aparentemente) produzcan un efecto de concentración de la radiación, exagerando la lectura y c) por defecto del instrumento, que no responda adecuadamente a ciertas condiciones meteorológicas.

En la Figura 3.4 se presenta un mapa con valores de Irradiancia promedio diario mensual para la república mexicana, como se puede observar en Chiapas, se presenta irradiancia de entre 4.5 y 5.5 KW-h/ m<sup>2</sup> en su territorio.



**Figura 3.4.** . Mapa de Irradiancia Solar en México, Valores diarios promedio anual  
Martínez R. 2007.

La radiación global de Tuxtla, fue calculada para un año, con ecuaciones de la literatura conocida y graficada, en esta se muestra una estimación de cómo se distribuye la energía radiante a lo largo del año. En la Figura 3.6 se presentan los valores de radiación solar diaria. El promedio corresponde de 1010 W/m<sup>2</sup>.



*Figura 3.5. Radiación Global incidente calculada para Tuxtla Gutiérrez Chiapas, (Hernández-Jarquín, 2010).*

### III.3. Tecnología de secado Solar.

#### III.3.1. El secado solar como método de conservación de alimentos

Secar significa remover cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. El término se emplea también al extraer líquidos orgánicos de materiales sólidos. El secado es un proceso en el que se intercambia calor y masa. Implica la transferencia de un líquido procedente de un sólido húmedo a una fase gaseosa no saturada. El secado o deshidratación de alimentos se usa como técnica de conservación, pues los microorganismos que provocan la descomposición.

El proceso de secado puede ser aplicado a todo tipo de alimentos, desde vegetales y hortalizas hasta carnes y pescados, pasando por frutas, especias, hierbas aromáticas, setas.

En el proceso de secado, las propiedades naturales de aroma, sabor y una buena presencia del producto seco se deben mantener, tanto como sea posible. Asimismo, deben minimizarse las pérdidas de las propiedades nutritivas y asegurar las medidas higiénicas y sanitarias que hagan el producto apto para el consumo humano.

Para lograr estas características, por lo general los alimentos son sometidos a un proceso de selección y preparación del material antes de la deshidratación para proceder al empacado y finalmente el etiquetado antes del almacenamiento.

### III.3.2. Secadores solares.

Un secador solar es un equipo que transforma la energía radiante del sol, a través de sus componentes, en energía térmica, capaz de proporcionar la energía necesaria para elevar la temperatura del producto y evaporar la humedad contenida en este.

La aplicación de técnicas de deshidratación por secado solar está actualmente muy difundida, ya que permite conservar alimentos después de cosechas productivas o los excedentes del consumo fresco de alimentos y plantas útiles que se producen solamente en determinadas estaciones del año.

El secado solar presenta ventajas sobre el simple secado natural o tradicional, ya que se logran temperaturas más altas con menor grado de humedad, por lo que se facilita y acelera el secado; además se protegen los productos contra la lluvia, el polvo, así como de insectos o animales indeseables. En contraste el secado solar presenta un inconveniente: el carácter periódico de la radiación solar que repercute en el secado efectivo del producto.

#### III.3.2.1. Partes que componen a los secadores solares.

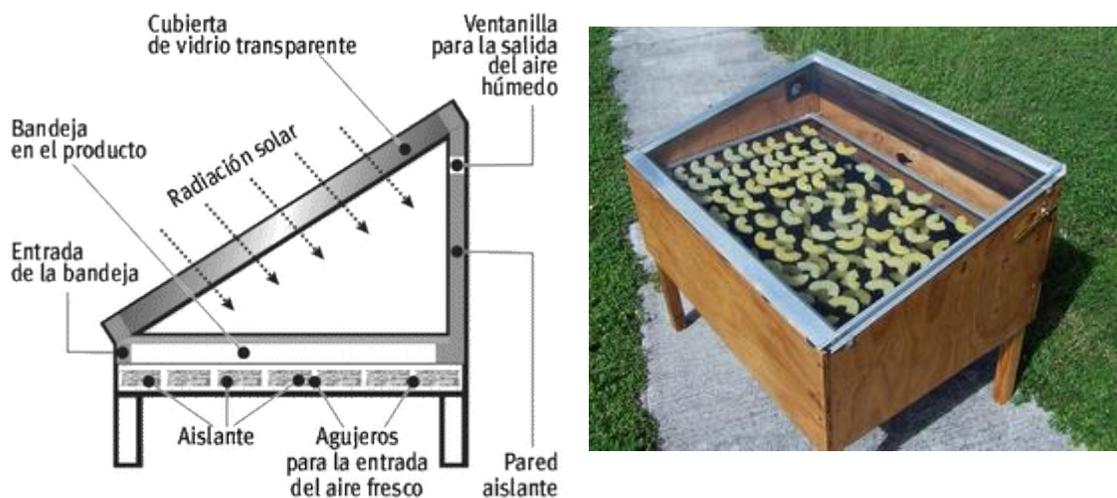
Los dos elementos básicos de un secador solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire

que pasa, estos pueden diseñarse de diversas formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar.

### III.3.2.2. Tipos de secadores solares.

#### A. Secador solar directo.

Son aquellos secadores donde el producto a deshidratarse, se coloca en charolas dentro de cámaras que tienen cubiertas o paneles laterales transparentes Figura 4.6. El calor es generado por la adsorción de radiación solar sobre el producto mismo así como las superficies internas de la cámara de secado. Este calor evapora la humedad del producto que ha de secar. Además sirve para calentar el aire en el recinto, provocando así la eliminación de la humedad por la circulación del aire. Una cubierta de plástico estabilizado impide la filtración de los rayos ultravioletas y la disipación de los rayos infrarrojos, la cual evita el daño y pérdidas en cuanto a sus propiedades nutritivas del producto, generalmente son usados para: futas, legumbres, hortalizas y otros.



**Figura 3.6.** Secador solar directo (a) Esquema del secador, (b) secador comercial.

En los secadores solares directos la radiación solar es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua. Esto se debe a que la presión de vapor entre producto y aire se hace mayor y se acelera el secado.

La combinación de colector y cámara en una sola unidad puede ser más económica en muchos casos, especialmente en los secadores de menor tamaño. Este tipo de secadores es casi siempre con circulación de aire por convección natural.

B. Secador solar indirecto.

Son aquellos secadores en el que la radiación no incide directamente sobre el producto, logrando secar en sombra o en obscuridad, (Figura 3.7) El aire es calentado en colectores solares y conducido hacia la cámara de secado, es esencialmente un secador convectivo.

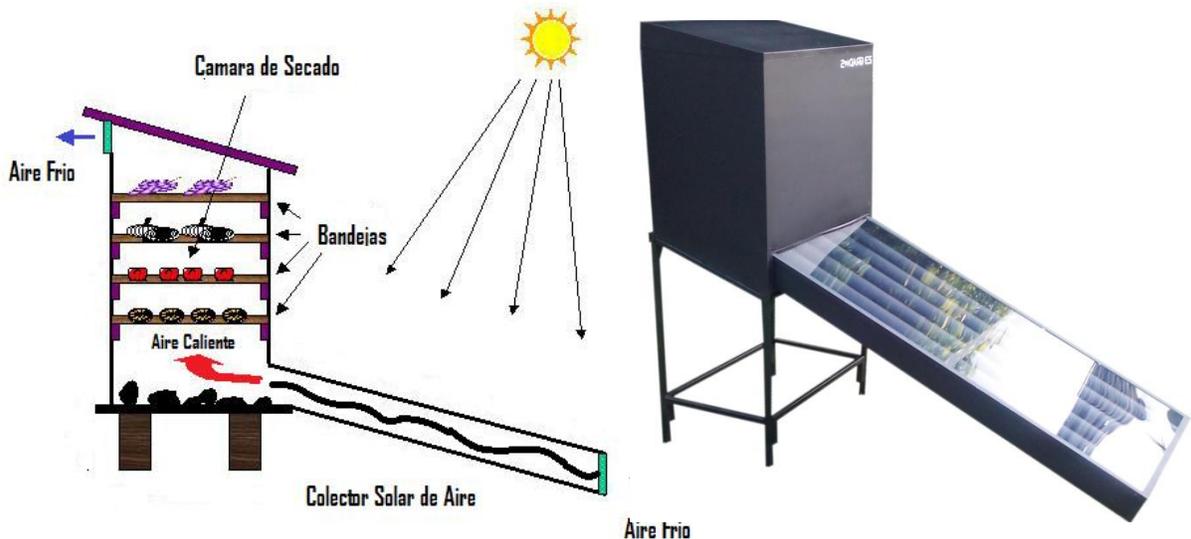


Figura 3.7. Secador solar indirecto, (a) esquema secador solar (b) secador solar comercial.

El secador solar indirecto representa varias ventajas. En primer lugar el control del proceso es más simple en el caso de secadores con circulación forzada de aire, además es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder calidad de aspecto por exposición directa al sol. Una desventaja de este tipo de secadores es el hecho de que al separar la función colección de energía solar, el tamaño del equipo y sus costos aumentan. Una segunda desventaja es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita remover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores solares directos o mixtos

### A. Secador solar mixto.

Finalmente puede darse el caso en que la colección de la radiación solar se realice tanto en un colector solar previo a la cámara como en la misma cámara (Figura 3.8)



**Figura 3.8.** Secador solar mixto.

### III.2.2.3. Circulación del aire dentro de secadores solares.

El aire circula dentro del secador solar con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por diversos métodos:

Circulación forzada: el aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica.

Circulación por convección natural: el aire es removido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. No se necesita energía externa.

El uso de chimeneas constituye un caso particular de convección natural. La circulación por convección natural permite el funcionamiento del equipo en zonas remotas sin suministro local de energía eléctrica. Este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar cuando el equipo crece de tamaño. Para equipos pequeños o medianos se puede lograr velocidades de aire de 0.4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0.1 a 0.3 m/s.

La circulación forzada facilita el diseño en el caso de los equipos de mayor tamaño. Este tipo de circulación también facilita el control del proceso de secado. La circulación forzada permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo. Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0.5 a 1 m/s y no hay problemas de circulación para equipos de tamaño mayor. La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica.

### III.3.2.4. Forma de operación de secadores solares

La forma de operar un secador solar da lugar a dos alternativas:

Secado en tandas: el producto es cargado en una sola tanda y la misma no se retira hasta que esté completamente seca. Todo el producto dentro del secador va

pasando de un estado húmedo a un estado seco en forma paulatina. Permite un diseño más sencillo del proceso de carga y movimiento del producto dentro del equipo, por lo que resulta apropiado en secadores pequeños y medianos.

Secado continuo: el producto se ve cargado y descargado en tandas parciales. Dentro del mismo secador se encuentra una parte del producto húmedo y otra casi seca. El periodo entre cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño. En algunos casos la carga y descarga se realiza una vez por día. En otros casos se puede llevar a cabo varias veces en el mismo día.

### **III.2.2.5. Condiciones para la construcción de secadores solares.**

A partir de un pre- diseño adecuado para el producto que ha de ser deshidratado, es necesario conocer ciertas características, como la humedad relativa y temperatura en la cámara de secado así como la humedad del producto, entonces tomamos las siguientes condiciones necesarias, para la construcción del secador solar:

a. Meteorológicas. Para esto debemos conocer el lugar donde será instalado el secador solar, o por lo menos tener referencias de la zona como: la velocidad del viento, altitud con respecto al mar, humedad relativa ambiental, radiación solar, etc., entonces conociendo todos aspectos se toma en cuenta la resistencia del secador para ser construido.

b. Operabilidad. Esta condición es bastante importante conocer las vías de comunicación y distancia de la zona a las poblaciones urbanas, entonces para zonas alejadas, el secador debe ser desmontable, para así facilitar el transporte y la instalación, para zonas poco alejadas, los secadores serán parcialmente desmontables y por ultimo para zonas cercanas los secadores pueden ser totalmente fijos.

1. Secadores desmontables. Son aquellos que en su totalidad de sus piezas de son desarmables y atornillables entre sí. Estos secadores son diseñados más

## CAPITULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

propiamente para equipos en los cuales no es fácil el traslado, montaje y desmontaje. Una desventaja de estos equipos es que llevan mucho tiempo para la instalación más de 10 horas de trabajo continuo.

2. Secadores solares semi-desmontables. Son aquellos secadores que tienen arcos fijos y que simplemente, están separados por travesaños asegurados por pernos, en estos secadores las bandejas pueden ser fijas o móviles. Se pueden tener piezas fundamentales, como la cámara de secado, el techo del secador solar y las bandejas. Estos secadores solares pueden ser de gran tamaño pues sus piezas individuales pueden ser ensamblables.

3. Secadores solares fijos. En estos toda su estructura esta soldada entre si, pueden ser hechos de mediano tamaño para que no pesen demasiados y facilitar su transporte.

4. Tipos de bandejas. Existen tres tipos de bandejas que están dadas por las características del producto y el diseño del secador:

A. Bandejas fijas. Son bandejas que están fijadas a la estructura del secador solar y que además ayudan a dar rigidez al equipo de secado, se utiliza para productos pesados, ejemplos: duraznos, higos, arroz, etc.

B. Bandejas móviles. Son bandejas portátiles o deslizantes a través de rieles, la cual permite el fácil manejo del producto junto con la bandeja, dentro y fuera del secador, facilita la limpieza. Son utilizados para productos livianos, frutas en rodajas y plantas medicinales y aromáticas.

C. Bandejas combinadas. Estas bandejas se emplean en grandes secadores solares, en los que varias bandejas forman torres o carritos, que son desplazados dentro de la cámara de secado. Son utilizados en productos ligeramente pesados, ejemplos: alfalfa, piña, carnes.

### III.3.3. Ventajas del uso del secado solar.

La conservación de alimentos por procedimientos artesanales, es una práctica muy utilizada, tanto para el autoconsumo familiar como para la comercialización en los mercados locales y también para la exportación. En países del Tercer Mundo como la India, Sri Lanka, Bangladesh, Tailandia y otros, se producen grandes cantidades de alimentos y condimentos deshidratados artesanalmente haciendo uso del secado solar.

- Los procedimientos son sencillos, naturales y económicos, ya que no se utilizan equipos costosos ni se requiere energía fósil en su elaboración.
- Representa una alternativa renovable no contaminante para aprovechar la energía solar en beneficio del medio ambiente.
- Posibilita la conservación de los alimentos y plantas útiles cuando se producen excedentes, en especial en los picos de cosecha de los cultivos estacionales.
- Se logra la conservación por largos períodos de tiempo, de cosecha en cosecha, manteniendo disponible los productos todo el año.
- Facilita la conservación de los alimentos más perecederos que se descomponen rápidamente.
- Aumenta el valor agregado de la materia prima, sobre todo cuando los productos se producen o adquieren a bajos precios en los picos de las cosechas, lo que actúa proporcionando seguridad alimentaria y regulando el mercado en los períodos de sobreproducción.
- Permite aprovechar residuos de cosecha de alimentos que por diferentes razones no son aptos para el consumo directo.
- Diversifica el consumo de alimentos y condimentos al tener disponible gran variedad de productos fuera de la época de su cosecha.

- Disminuye el peso y el volumen de los alimentos frescos, por lo que facilita el almacenaje y la transportación.
- Resulta una buena opción cuando existen dificultades para la transportación de los productos frescos, en especial cuando los centros de consumo y comercialización están alejados de los lugares de producción.
- Los procedimientos pueden ser introducidos a cualquier escala de producción: doméstica, en granjas, cooperativas, huertos comunitarios o familiares de pequeña producción.

### **III.3. Teoría de secado.**

#### **III.3.1. Mecanismos de deshidratación.**

A continuación se describen los mecanismos simultáneos de transferencia de materia y calor y las teorías de migración de humedad asociadas con los procesos del secador. El secado se define como la eliminación de la humedad de un producto, y en la mayoría de las situaciones prácticas la etapa principal durante el secado es la transferencia interna de materia. Es necesario comprender el mecanismo real del proceso para un diseño correcto del equipo y una mejor calidad de los productos deshidratados.

En el proceso de secado, los mecanismos de transferencia de agua en el producto que se está secando se pueden resumir en los siguientes.

- Movimiento de agua bajo fuerzas capilares.
- Difusión del líquido por gradientes de concentración.
- Difusión superficial

### CAPITULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- Difusión de vapor de agua en los poros llenos de aire.
- Flujo debido a gradientes de presión.
- Flujo debido a la vaporización condensación del vapor de agua.

Las fuerzas capilares son responsables de la retención de agua en los polos de los sólidos de construcción rígida, mientras que en sólidos formados por agregados de polvos finos es la presión osmótica la responsable de esta retención, así como en la superficie del sólido. El tipo de material que se desea secar es un factor muy importante en todos los procesos de secado, ya que sus propiedades físicas y químicas juegan un papel muy importante durante el secado debido a los posibles cambios que puedan ocurrir y al efecto de estos cambios en la eliminación del agua del producto. Un material higroscópico es aquel que contiene agua ligada que ejerce una presión de vapor menor que el agua líquida a la misma temperatura. En productos en los que la base principal son carbohidratos, es de suponer que se comporten de forma higroscópica, pues los grupos hidroxilos alrededor de las moléculas de azúcar permite que se creen puentes de hidrogeno con el agua. La interacción entre las moléculas de agua y los grupos hidroxilo conlleva la solvatación o subutilización de los azúcares.

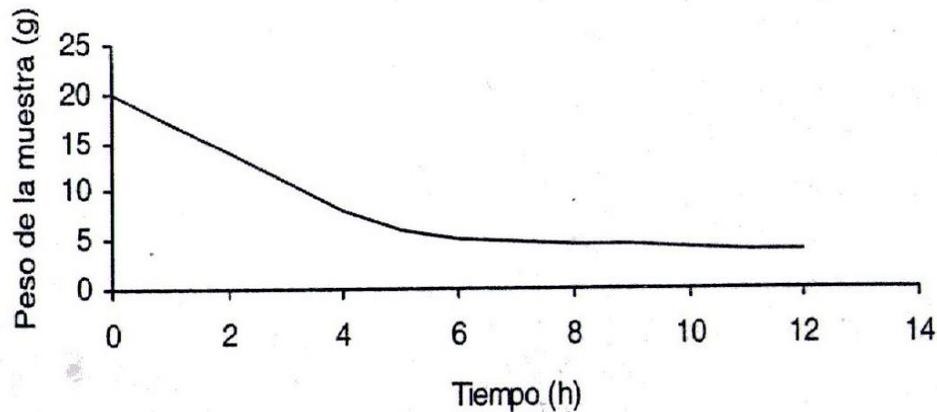
**Tabla 3.2.** *Carácter higroscópico de azúcares (según Whistler y Daniels, 1985)*

Azúcar	60% HR – 1 h	% de agua absorbida a	
		20° 60% HR – 9 días	100% HR – 25 días
D-Glucosa	0.07	0.07	14.5
D-Fructosa	0.28	0.63	73.4
Sacarosa	0.04	0.03	18.4
Maltosa	0.80	7.00	18.4
Lactosa	0.54	1.20	1.40

En proteínas solubles en agua, tal como la mayoría de las proteínas globulares, los aminoácidos polares están distribuidos uniformemente en la superficie. Mientras que en los grupos hidrófobos tienden a localizarse en el interior de la molécula. Esta disposición ocasiona la formación de puentes de hidrogeno con el agua, lo que explica la solubilidad de este tipo de proteínas.

### III.3.2. El proceso de secado.

En los procesos de secado, los datos suelen expresarse como la variación que experimenta el peso del producto que se está secando con el tiempo. Aunque a veces, los datos de secado pueden expresarse en términos de velocidad de secado.



*Figura 3.9. Cambio de peso durante el proceso de secado*

El contenido de humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua del alimento y la cantidad de sólidos secos, y se expresa:

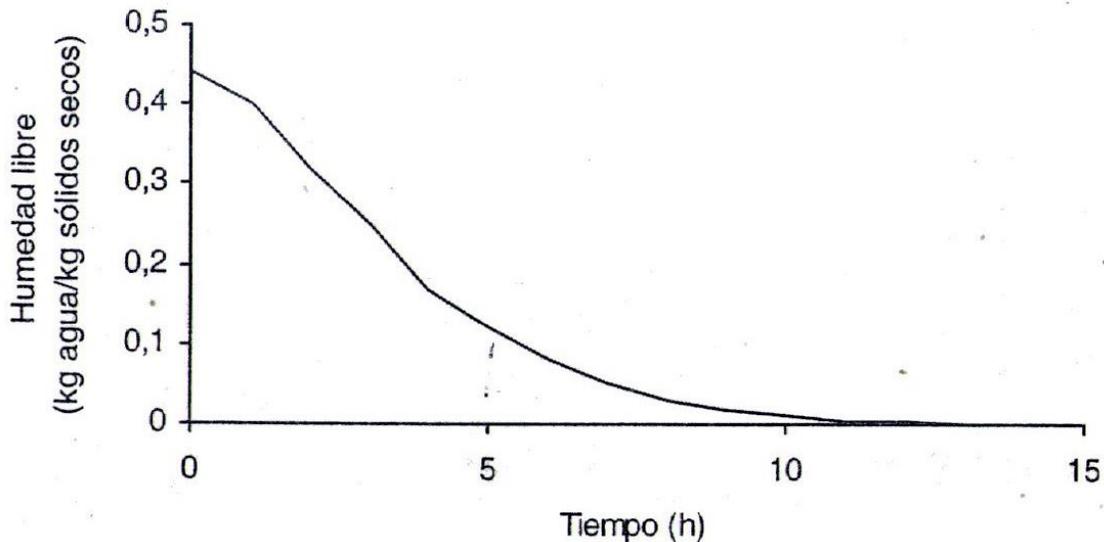
$$X_t = (W_t - F_s) / F_s \quad (3.8)$$

En la que  $W_t$  es el peso total de material en un tiempo determinado, siendo  $F_s$  el peso de los sólidos secos, y  $X_t$  es la humedad expresada como peso de agua/peso de solido seco. En los procesos de secado una variable muy importante es la denominada contenido de humedad libre,  $X$ . el contenido de humedad libre se puede evaluar si se considera el contenido de humedad de equilibrio:

$$X = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} \quad (3.9)$$

En la que  $X_e$  es el contenido de humedad cuando se alcanza el equilibrio. Una típica curva de secado se obtiene al representar este contenido de humedad libre  $X$  frente al tiempo de secado  $t$ /figura 4.2) la velocidad de secado,  $R$ , es proporcional al cambio del contenido de humedad en función del tiempo ( $t$ ):

$$R \propto dX/dt \quad (3,10)$$



**Figura 3.10.** Curva de rapidez de secado.

Considerando la curva presentada en la Figura 3.10 los valores individuales de  $dX/dt$  en función del tipo, se pueden obtener a partir de la tangente trazada en la curva de  $X$  frente a  $t$ . sustituyendo la condición de proporcionalidad en la ecuación (3.10) por  $F_s/A$ , la velocidad de secado se puede expresar como: (Geankoplis, 1983).

$$R = -(F_s/A)(dX/dt) \quad (3.11)$$

Donde  $R$  es la velocidad de secado y  $A$  es el área de la superficie donde tiene lugar el secado. Al representar  $R$  frente a  $t$  se obtiene una curva similar a la que se muestra en la Figura 3.11.

El proceso de secado de un material puede describirse por una serie de etapas en las que la velocidad de secado juega un papel determinante. La Figura 3.11 muestra una típica curva de velocidad de secado, en la que los puntos  $A$  y  $A'$  representan el inicio de secado para un material frío y caliente, respectivamente. El punto  $B$  representa la condición de temperatura de equilibrio de la superficie del producto. El tiempo transcurrido para pasar de  $A$  o  $A'$  a  $B$  suele ser bajo y a menudo se desprecia en los cálculos de tiempo de secado.

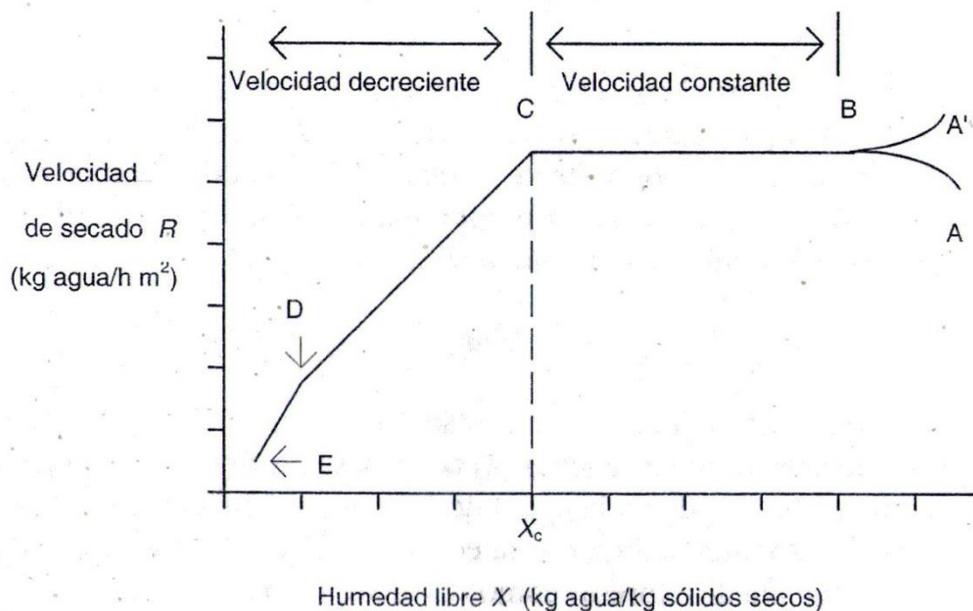


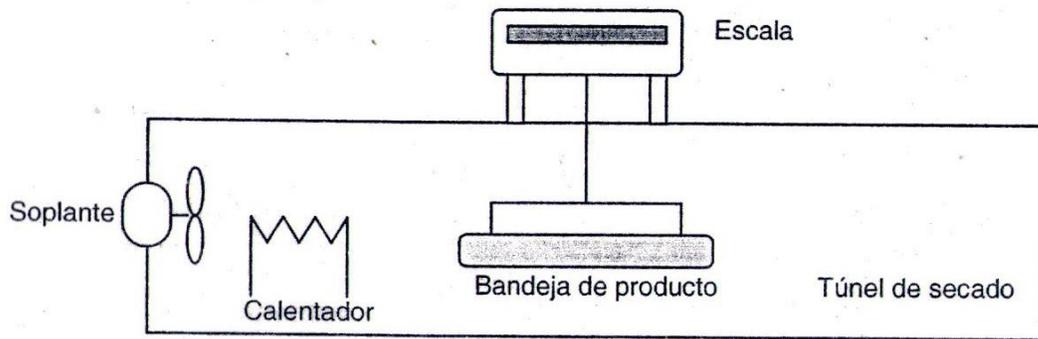
Figura 3.11. Curva de Velocidad de Secado.

### CAPITULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El tramo de la curva B-C es conocido como periodo de velocidad constante de secado y está asociado a la eliminación del agua no ligada del producto, en el que el agua se comporta como si el sólido no estuviera presente. Al inicio la superficie del producto se encuentra muy húmeda, presentando una actividad de agua cercana a la unidad. En los sólidos porosos el agua eliminada en la superficie es compensada por el flujo de agua desde el interior del sólido. El periodo de velocidad constante continúa mientras que el agua evaporada en la superficie pueda ser compensada por la que se encuentra en el interior. La temperatura en la superficie se corresponde aproximadamente a la de bulbo húmedo (Geankoplis, 1983; Okos et al., 1992). En general, la velocidad de secado se determina por condiciones externas de temperatura, humedad y velocidad de aire (Chen y Johnson, 1969).

El periodo de velocidad decreciente se da cuando la velocidad de secado ya no se mantiene constante y empieza a disminuir, además, la actividad de agua en la superficie se hace menor que la unidad. En este caso, la velocidad de secado está gobernada por el flujo interno del agua y vapor. El punto C de la Figura 3.11 representa el inicio del periodo de velocidad decreciente. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener el valor uno de actividad de agua. El periodo de velocidad decreciente se puede dividir en dos etapas. La primera de ellas se da cuando los puntos húmedos en la superficie disminuyen continuamente hasta que la superficie está seca completamente (punto D), mientras que la segunda etapa del periodo de velocidad de secado decreciente se inicia en el punto D, cuando la superficie está completamente seca, y el plano de evaporación se traslada al interior del sólido. El calor requerido para eliminar la humedad es transferido a través del sólido hasta la superficie de evaporación y el vapor de agua producido se mueve a través del sólido en la corriente de aire que va hacia la superficie. A veces no existen diferencias remarcables entre el primer y segundo periodo de velocidad decreciente (Geankoplis, 1983). La cantidad del agua eliminada en este periodo puede ser baja, mientras que el tiempo requerido puede ser elevado, ya que la velocidad de secado es baja.

La determinación experimental de la velocidad de secado se basa en un principio simple: medida del cambio del contenido de humedad durante el secado. El material que se desea secar se introduce en una bandeja y es expuesto a una corriente de aire. La bandeja se suspende de una balanza colocada en un armario o conducto por el que fluye aire. El peso del material se va anotando en función del tiempo de secado. La Figura 3.12 muestra un esquema típico utilizado en la determinación de la velocidad de secado.



**Figura 3.12.** Sistema típico para pruebas cinéticas de secado.

Mientras se está realizando un experimento discontinuo de secado deben considerarse las siguientes precauciones:

- La muestra no debe ser demasiado pequeña.
- La bandeja de secado debe ser similar a la utilizada en una operación regular de secado.
- La temperatura, velocidad, humedad y dirección del aire deben ser constantes.

### III.3.2.1. Periodo de velocidad constante.

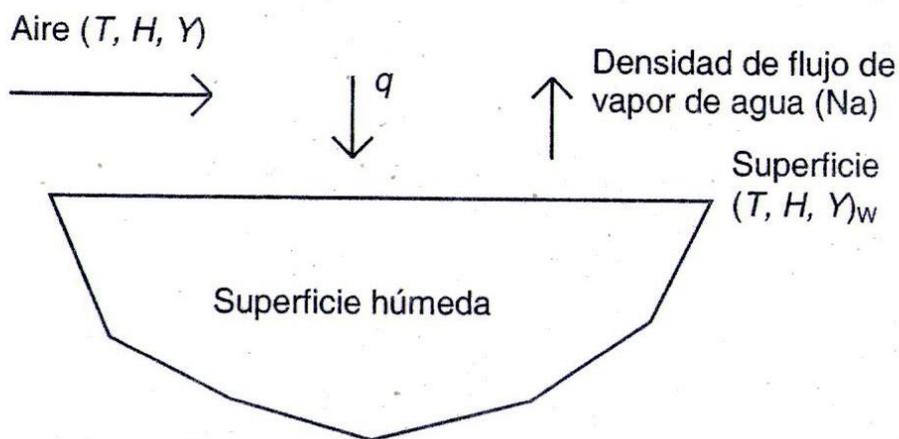
Durante el periodo de secado de velocidad constante, los fenómenos de transporte que tienen lugar son la transferencia de materia de vapor de agua hacia el medio ambiente, desde la superficie del producto a través de una película de aire que rodea

el material y la transferencia de calor a través del sólido. Mientras dura el proceso de secado, la superficie del material permanece saturada de agua, ya que la velocidad de movimiento del agua desde el interior del sólido es suficiente para compensar el agua evaporada en la superficie. Si se supone que solo existe transferencia de calor hacia la superficie del sólido por convección desde el aire caliente y transferencia de materia desde la superficie hacia el aire caliente (Figura 3.13), los balances de materia y calor se podrán expresar como (Geankoplis, 1983):

$$q = hA(T - T_w) \quad (3.12)$$

$$N_a = K_y(Y_w - Y) \quad (3.13)$$

En las que  $h$  es el coeficiente de transmisión de calor,  $A$  es el área que se está secando,  $T_w$  es la temperatura de bulbo húmedo,  $T$  es la temperatura de secado,  $N_a$  es la densidad de flujo de vapor de agua,  $Y_w$  el contenido de humedad del aire en la superficie del sólido,  $Y$  el contenido de humedad del aire en el seno de la corriente de secado, y  $K_y$  el coeficiente de transferencia de materia.



**Figura 3.13.** Transferencia de calor y de materia durante el secado.

El calor necesario para vaporizar el agua en la superficie del producto se puede expresar como:

$$q = N_a M_a \lambda_w A \quad (3.14)$$

En la que  $M_a$  es la masa molecular del agua,  $\lambda_w$  el calor latente de vaporización a la temperatura  $T_w$ , y la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante se expresa como (Okos et al., 1992):

$$R_c = k_y M_b (H_w - H) \quad (3.15)$$

O

$$R_c = h(T - T_w) / \lambda_w = q / \lambda_w A \quad (3.16)$$

En la que  $M_b$  es la masa molecular del aire,  $H_w$  la humedad correspondiente a la temperatura del bulbo húmedo, y  $H$  es la humedad del aire en el seno de la corriente gaseosa. Si no existe transferencia de calor por conducción y radiación, la temperatura del sólido a la temperatura de bulbo húmedo es la del aire durante el periodo de velocidad constante de secado.

En los cálculos de secado es imprescindible conocer el coeficiente de transferencia de materia ( $K_y$ ), que puede evaluarse mediante la expresión (Okos et al, 1992):

$$\frac{K_y l}{D_{AB}} = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/2} \quad (3.17)$$

Ecuación válida para flujo laminar paralelo a un plato plano, siendo  $l$  la longitud del plano en la dirección del flujo, y en la que los módulos de Reynolds y Schmidt están definidos por las expresiones:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad Re = \frac{dv\rho}{\mu} \quad (3.18)$$

Siendo  $D_{AB}$  la difusividad molecular de la mezcla aire-agua,  $d$  es la longitud característica o el diámetro,  $v$  la velocidad del fluido,  $\rho$  la densidad, y  $\mu$  la viscosidad.

El coeficiente de transmisión de calor puede obtenerse mediante la ecuación (Geankoplis, 1983).

$$h = 0.0204G^{0.8} \quad (3.19)$$

En la que  $G$  es la densidad de flujo másica del aire expresada en  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$ , obteniéndose el coeficiente de transmisión de calor en  $\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$ . El coeficiente de transmisión de calor en una lámina se puede expresar en función del módulo de Nusselt, según una expresión del tipo (Chirife, 1983):

$$Nu = \frac{hd}{k} = 2 + \alpha Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (3.20)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.21)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica,  $\alpha$  es una constante,  $Re$  es el módulo de Reynolds,  $Pr$  es el módulo de Prandtl y  $C_p$  es el calor específico.

### III.3.2.2. Periodo de velocidad decreciente.

Este periodo sigue al de velocidad de secado contante y, como su nombre indica, la velocidad de secado  $R$  decrece cuando el contenido de humedad sobrepasa el contenido de humedad crítico  $X_c$ . Para resolver este tipo de problemas, la Ecuación (3.11) debe resolverse por integración y el término integral se calcula mediante una integración grafica al representar  $1/R$  frente a  $X$ .

El movimiento del agua en el sólido puede explicarse por distintos mecanismos, como son: difusión del líquido debido a gradientes de mecanismos, difusión del vapor

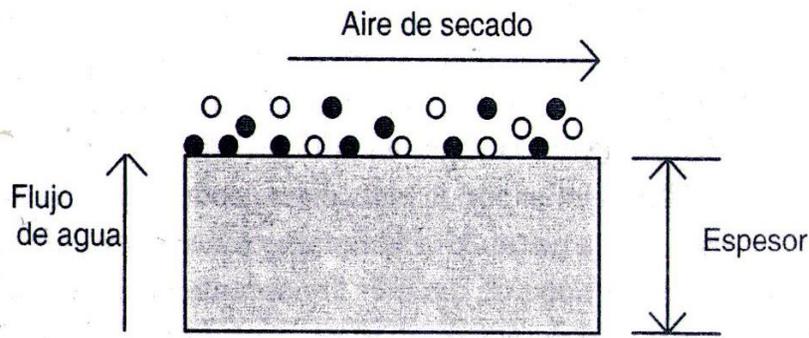
debido a la presión parcial de vapor, movimiento del líquido por fuerzas capilares, Flujo de Knudsen, movimiento del líquido por fuerzas de gravedad, y difusión superficial.

III.3.2.2.1. Teoría de la difusión.

Varios autores han propuesto que el principal mecanismo en el secado de solidos es la difusión del agua (Van Arsdel y Copley, 1963; Fortes y Okos, 1980; Geankoplis, 1983). La difusión se da en solidos de estructura fina y en los capilares, poros y pequeños huecos llenos con vapor. El vapor difunde hacia afuera hasta que alcanza la superficie donde pasa a la corriente global del aire. Desgraciadamente, la teoría de la difusión no tiene en cuenta el encogimiento, casos de endurecimiento o isothermas de adsorción (Van Arsdel y Copley), 1963). El significado físico del coeficiente de difusión no se tiene en cuenta o es interpretado como un efecto simultaneo, siendo además dependiente de la concentración y de la temperatura. La ley de Fick aplicada a un sistema unidimensional como el mostrado en la Figura 3.14 se puede expresar como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3.22)$$

Donde X es el contenido de humedad libre, t es el tiempo, x es la dimensión espacial, y  $D_{ef}$  es el coeficiente de difusión.



**Figura 3.14.** Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua.

La solución de la ley de Fick modificada para diferentes geometrías es como sigue:

A. Esfera

$$\Gamma = \frac{X-X_s}{X_0-X_s} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{n^2 D_{eff} t}{r^2}} \quad (3.23)$$

Donde X es el contenido de humedad al tiempo t, X<sub>0</sub> es el contenido de humedad inicial, X<sub>s</sub> es el contenido de humedad en la superficie, y r es el radio de la esfera.

B. Lámina

$$\Gamma = \frac{X-X_s}{X_0-X_s} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_n^2} e^{-\frac{h_n^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}} \quad (3.24)$$

Donde L es el espesor de la lámina.

C. Cilindro

$$\Gamma = \frac{X-X_s}{X_0-X_s} = \frac{4}{r_a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} e^{-\beta_n^2 D_{eff} t} \quad (3.25)$$

En la que r<sub>a</sub> es el radio del cilindro y β<sub>n</sub> son las raíces de la función de Bessel de primera clase y orden cero.

El coeficiente de difusión efectivo se determina experimentalmente a partir de datos de secado, al representar gráficamente el termino ln(X) frente al tiempo, la pendiente del tramo lineal da el valor de D<sub>ef</sub> (Okos et al., 1992).

La dependencia del coeficiente de difusión, D<sub>ef</sub>, con la temperatura puede describirse por la ecuación de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp(-E_a/R_g T) \quad (3.26)$$

En la que  $E_a$  es la energía de activación,  $T$  es la temperatura absoluta,  $D_0$  es el coeficiente de difusión de referencia y  $R_g$  es la constante universal de gases. La energía de activación se puede determinar al representar  $\ln D_{ef}$  frente a  $1/T$ . Okos et al. (1992) han dado una lista de valores de  $D_{ef}$  encontrados en la literatura para un conjunto de productos alimentarios, presentándose en la Tabla 3.3. El coeficiente de difusión se puede expresar en función de la humedad como sigue (Okos et al., 1992):

$$D_{ef} = D_0 \exp(-E_a/R_g T) \frac{K_{12} \exp(-E_b/R_g T)}{1 + K_{12} \exp(-E_b/R_g T)} \quad (3.27)$$

$$K_{12} = k_1/k_2 \quad (3.28)$$

Donde  $k_1$  y  $k_2$  son las constantes de difusión a los niveles 1 y 2 de humedad, respectivamente,  $-E_b$  es la diferencia en la energía de activación entre los niveles de humedad 1 y 2 o la energía enlazante, y  $E_a$  es la energía de activación al nivel más alto de humedad.

**Tabla 3.3.** Difusividad efectiva de algunos productos alimenticios.

Alimentos	T(°C)	$D_{ef}(m^2/s)$
Leche entera espuma	50	$2.0 \times 10^{-9}$
	40	$1.4 \times 10^{-9}$
	35	$8.5 \times 10^{-10}$
Manzana	66	$6.4 \times 10^{-9}$
Manzanas liofilizadas	25	$2.43 \times 10^{-10}$
Pasas	25	$4.17 \times 10^{-11}$
Papa	54	$2.58 \times 10^{-11}$

	60	$3.94 \times 10^{-11}$
	65.5	$4.37 \times 10^{-11}$
	68.8	$6.36 \times 10^{-11}$
Peras en laminas	66	$9.63 \times 10^{-10}$
Ternera polvo liofilizada	25	$3.07 \times 10^{-11}$
Zanahoria en cubos	40	$6.75 \times 10^{-11}$
	60	$12.1 \times 10^{-11}$
	80	$17.9 \times 10^{-11}$
	100	$24.1 \times 10^{-11}$

Fuente: Barbosa (2010).

Fortes y Okos (1980) establecieron que las ecuaciones de difusión podrían ser aplicadas al secado de:

- Arcillas, almidones, harinas, textiles, papel y madera que están a un contenido de humedad de equilibrio por debajo del punto de saturación atmosférica.
- Jabones, colas, y pastas (sólidos en fase simple) en los que agua y los sólidos son mutuamente solubles.

#### **III.4. El queso crema chiapaneco.**

El queso crema de Chiapas, es un queso genuino, de pasta acida y tajable, se elabora con leche cruda de ganado manejado extensivamente, este queso no es elaborado a gran escala, pero representa un producto distinguido de la quesería tradicional chiapaneca (Figura 15.).

Además de ser un alimento delicioso que contribuye con variedad y atractivo a los platillos gastronómicos regionales, el queso crema Chiapas forma parte de la dieta básica de los habitantes de este estado y han constituido una fuente importante de nutrientes.



**Figura 3.15.** Queso crema fresco chiapaneco, producido en la comunidad UNESCO.

A su vez representa una actividad económica que da sustento a miles de familias chiapanecas. Su sabor, textura y calidad han logrado que el queso crema sea reconocido como parte la identidad cultural de sus habitantes (Figura 3.16).



**Figura 3.16.** Queso crema chiapaneco, Montes et al (2010).

### CAPITULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El queso se elabora a base de cuajada de leche de vaca u otros mamíferos. La cuajada se obtiene por medio de la coagulación de una proteína de la leche llamada caseína; para ello se emplean enzimas, ácidos y, dependiendo del tipo de queso, se somete a un proceso que implica el uso de calor, presión, sal y maduración.

A nivel artesanal se elaboran quesos a partir de la leche cruda, pero en la elaboración semi industrial e industrial se somete la leche de la quesería a un tratamiento de calor a temperaturas relativamente bajas. Este proceso se llama terminación.

Ortiz *et al* (2010), reportan que este queso puede tener sus orígenes en la región norte del estado, en el municipio de Bochil hacia el año 1890, posteriormente se difundió hacia San Cristóbal y la frailesca, y finalmente hacia el segundo tercio del siglo XX en la región costa, Pijijapan y Tonalá.

Actualmente, en el estado de Chiapas se producen cerca de un millón de litros de leche por día, la mayor parte con base en el sistema de lechería extensivo o libre pastoreo, cerca del 70 % de esa leche se emplea para la elaboración de quesos artesanales. Durante 2009 se tenía un registro de 576 queserías artesanales, que procesaban cerca de 2,000 litros diarios de leche, para la producción de queso crema.

Este queso genuino mexicano constituye uno de los quesos mexicanos distinguidos con potencial para obtener una marca colectiva (MC) con referencia geográfica y eventualmente una denominación de origen (DO). Esto permitirá garantizar la autenticidad del producto entre los consumidores, ampliar su mercado, prestigiar a las comunidades chiapanecas, que lo elaboran, robustecer a las cadenas agroindustriales que lo producen, preservarlo como un bien cultural inmueble y para contribuir al desarrollo local en el estado de Chiapas. Hernández-Montes *et al* (2010).

III.4.1. Producción y secado de queso fresco chiapaneco.

III.4.1.1. Producción de queso fresco chiapaneco.

A continuación se describe el proceso de producción, del queso crema chiapaneco, en la Figura 3.17, se presenta el diagrama para la elaboración del queso, seguido se presenta la descripción del proceso de producción de la comunidad UNESCO en el 2009.



**Figura 3.17.** Diagrama general para elaborar el queso crema de Chiapas. Villegas et al (2009).

En la Comunidad Unesco, temprano en la mañana los hombres ordeñan a las vacas en el establo mientras son alimentadas, se obtienen aproximadamente 65 litros de leche diariamente. Mientras tanto a las 6 de la mañana en el cuarto de producción de quesos, las mujeres sacan la cuajada del día anterior de la vasija y la colocan dentro de un costal fino, para ser colgada de un gancho, con el objeto de escurrir la cuajada y retirar el suero, posteriormente la vasija es lavada (Figura 3.18.).



**Figura 3.18.** (a) Ordeña de la leche, (b) cuajada puesta en un costal, (c) costal colgado para retirar suero.

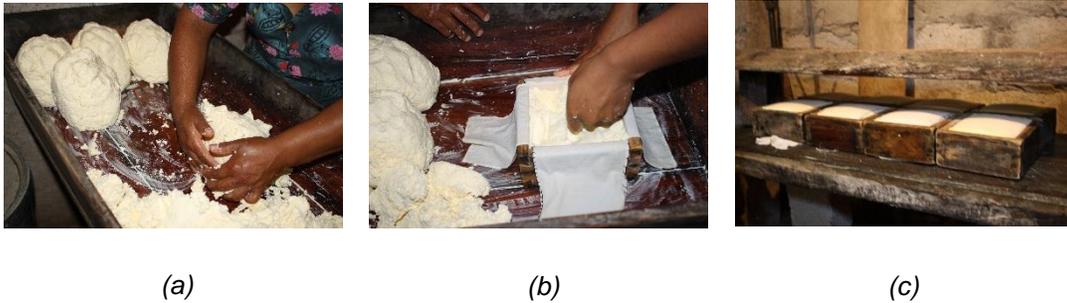
Después se sacan los quesos que están en los moldes y se meten al refrigerador, son lavados los moldes, y las mantas para el prensado del queso que se hará ese día. El costal con la cuajada es puesto en la prensa de los quesos para retirar la mayor cantidad de suero. En la vasija se cuela la leche que fue ordeñan esa mañana, y se le agrega el cuajo, que consiste en unas gotas de una enzima coagulante de leche bovina comercial, se tapa con una manta y se deja reposar. (Figura 3.18. a y b).



**Figura 3.19.** (a) La leche cruda de la garrafa se vierte en una cubeta, (b) filtración de la leche mediante una manta para retirar sólidos, (c) a la cuajada del día anterior ya prensada se le agrega sal.

Al medio día, la cuajada en el costal es retirada de la prensa y es colocada en una batea de madera en la que se amasa y se le agrega sal, posteriormente se forman bolas de masa de queso y una a una es colocadas en los moldes para ser puestos en la prensa (Figura 3.118.c y 3.19). En la tarde la cuajada de ese día, es cortada

con un cuchillo, para al otro día repetir el proceso de producción de queso crema, por lo tanto la cuajada se deja coagular por la noche.



**Figura 3.20.** (a) Amasado de la cuajada, (b) cuajada puesta en los moldes, (c) prensado de los quesos frescos.

#### III.4.1.2. Secado de queso fresco chiapaneco.

Cuando dejamos secar y madurar el queso fresco chiapaneco podemos molerlo y obtener un tipo de queso seco añejo para espolvorear, el queso seco tiene una buena aceptación (Figura 3.21).



**Figura 3.21.** (a) Queso seco entero, quesería de Cintalapa.

En los mercados de Chiapas se comercializa en dos formas; en quesos de 500 a 600 gr, estos quesos secos se obtienen de quesos frescos enteros de 1000 a 1200 gr, los quesos pierden cerca del 50 % de su masa y volumen, debido a que evaporan el agua presente en ellos, además de la crema del queso que se elimina en el proceso de secado tradicional, al retirar continuamente una capa de grasa que se forma en el exterior del queso. Haciendo del proceso de secado, difícil y laborioso. La otra forma en que se vende es ya rayado y en polvo (Figura 3.22).



(a)



(b)

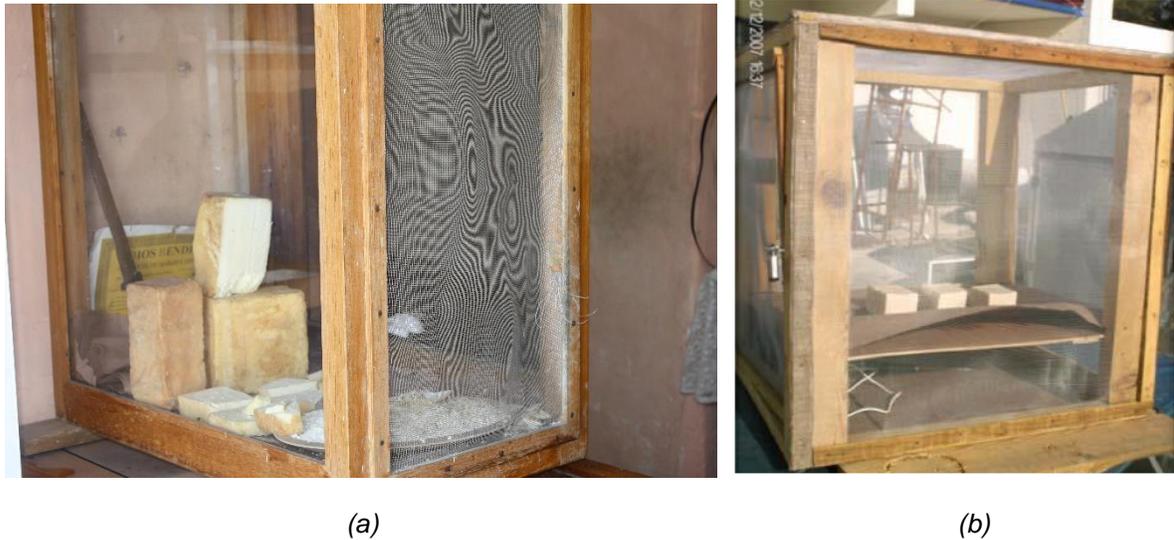
**Figura 3.22.** (a) Queso seco entero y (b) queso seco rayado, quesería de Cintalapa.

El método tradicional para el secado de queso consiste en exponer el queso, al ambiente, permitiendo que este se deshidrate, es el más económico y extendido existen diversas variantes de este método. A continuación se describen dos formas.

*En el techo.* Los quesos son puestos en platos o bandejas y tapados con una manta, para después ser colocados en los techos de las casas durante el día. Durante la noche los quesos son puestos debajo de los techos, para evitar que ganen humedad del ambiente. En la primera semana de secado el queso tiene que ser volteado de 3 a 4 veces al día y ser raspado de una capa de grasa que se va formando y acumulando en el exterior del queso, el tiempo de secado depende vitalmente de las condiciones del ambiente, radiación solar, humedad del aire, temperatura ambiente.

*Gabinetes.* Para el secado de queso se utilizan gabinetes que están en sus paredes cubiertos de mallas, estas evitan que insectos y roedores estén en contacto con el

producto pero a la vez que una corriente de aire pueda circular y entrar en contacto con la superficie del queso a secar, los gabinetes son colocados a la sombra y en lugares con buenas corrientes de aire (Figura 3.23).



**Figura 3.23.** (a) Gabinete de secado, quesería de Cintalapa, (b) gabinete de secado usado por Berrones et al (2010.)

En el proceso de secado tradicional solo una cara a la vez de los quesos son colocadas en mantas, estas absorben el suero contenido en el queso, y propiciaban el secado de los quesos, las mantas tenían que ser remplazadas diario además de ser lavadas con jabón durante el primer mes de secado, el último mes el queso era raspado, cuando empezaba a enmohecerse, y cuando la humedad del ambiente es muy alta en la temporada de lluvias el tiempo de secado se alarga de dos meses a más.

Berrones *et al* (2010), consideran que pesar de que en la entidad, el queso seco goza de gran aceptación por los consumidores, el proceso de elaboración presenta algunos inconvenientes, los cuales se mencionan a continuación:

- No existe un proceso conocido en la región de estandarización durante la elaboración de queso deshidratado.

### CAPITULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- No se han evaluado los cambios en las propiedades durante el proceso de maduración o al menos no existe información publicada o no es muy accesible.
- Por lo tanto, no se cuenta con una base de datos que aporte valores de los parámetros de control de la humedad ni de la temperatura.
- No hay suficiente producto para comercializarlo, existe una demanda alta del producto.
- No se encuentra disponible en sitios de venta importantes, como supermercados o tiendas de autoservicio, y se vende sin empaques ni etiquetas.

Sin embargo, es importante señalar que existen algunas ventajas sobre el queso en seco como son:

- Se presenta una gran demanda por parte del consumidor, a pesar de no contar con canales de distribución adecuados.
- Tiene una multitud de aplicaciones en la industria alimentaria, como repostería, antojería y gran variedad de alimentos caseros.
- En el estado existe una buena producción de materia prima y gran parte de esta se destina a la producción de quesos.
- Su precio es bastante competitivo, pudiendo llegar a aumentar de dos a tres veces su valor inicial en fresco.

Debido a las problemáticas mencionadas anteriormente sobre el queso seco, es necesario desarrollar equipos de secado que aceleren el proceso de secado y que además proporcionen mayor inocuidad del producto, calidad y estabilidad del queso seco.

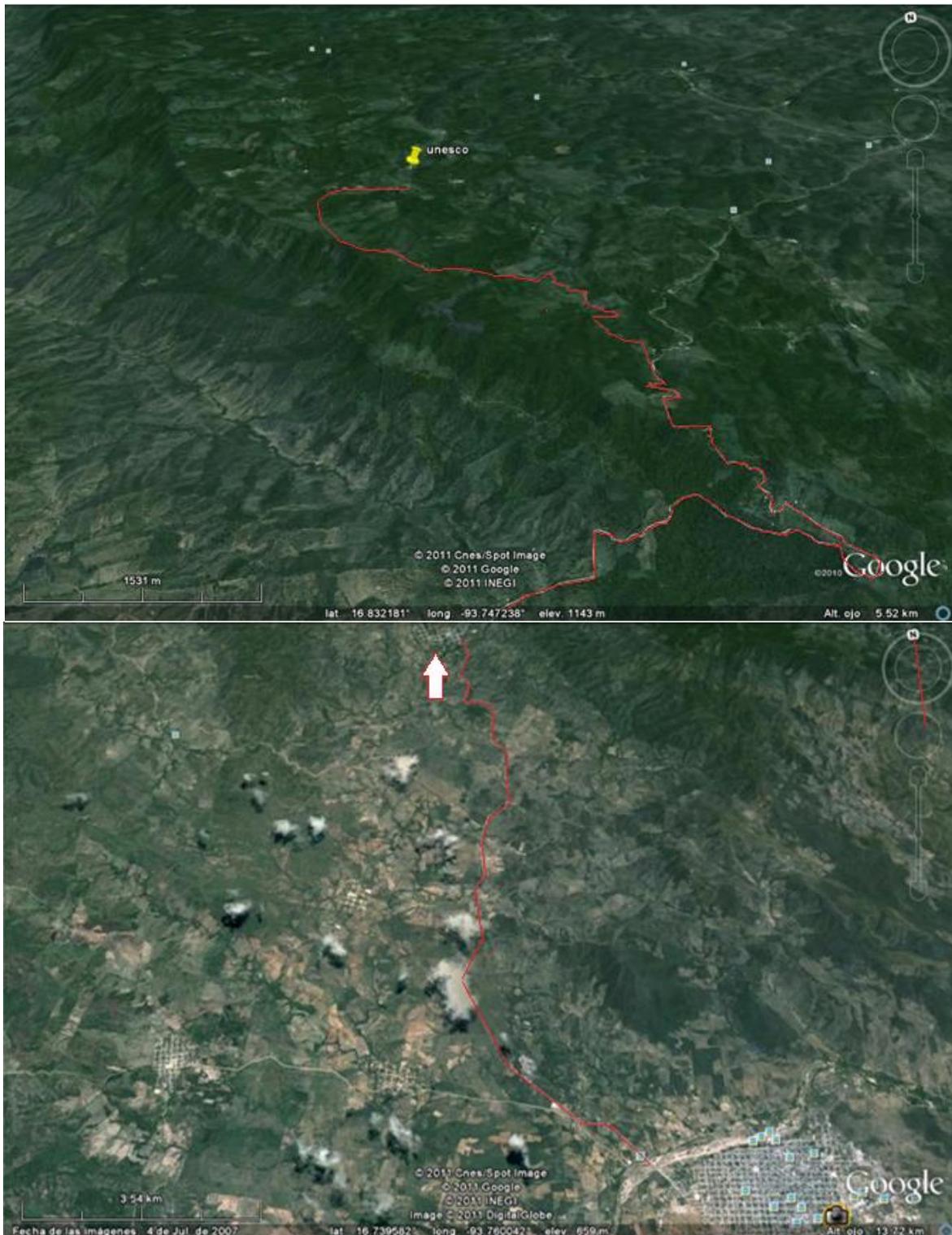
### **IV. MÉTODOLOGIA.**

#### **IV.1. Introducción.**

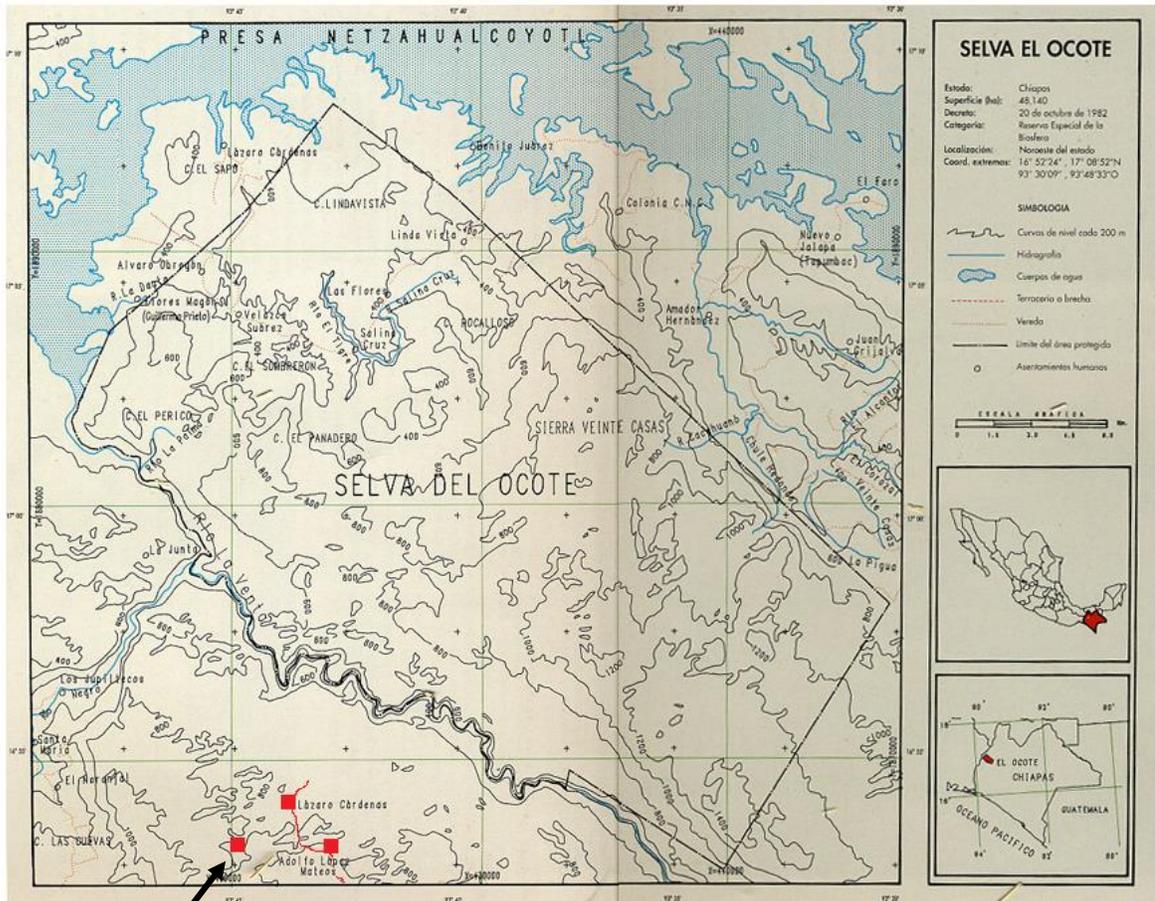
A continuación se presenta la metodología, esta será presentada en dos partes, el trabajo con el secador solar y el trabajo con el producto. Para el caso del secador solar se presentan los pasos para su construcción, las partes que forman el equipo y diagramas de las partes del secador solar, además de la descripción de su traslado, instalación y evaluación térmica *in situ* con carga. Para el producto, queso fresco chiapaneco, se realizaron pruebas de secado solar y pruebas de secado bajo condiciones controladas, también se registraron ciertos parámetros dentro de los equipos de secado.

#### **IV.2. Lugar de instalación del secador solar para queso fresco chiapaneco.**

El secado solar se encuentra instalado en la Ranchería “El Nuevo Mundo” de la comunidad UNESCO, del municipio de Cintalapa, sus coordenadas están dadas por 16.85912 latitud Norte, y 93.75098 Longitud Oeste, se encuentra a una altitud de 817 m.s.n.m. (Figura 4.1.). Las localidades más cercanas son, Lázaro Cárdenas y Adolfo López Mateos, estas comunidades se encuentran en la Zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote (Figura 4.2.). UNESCO por kilómetros ya no forma parte de la zona de amortiguamiento, sus terrenos son de uso agrícola y en ellos se practican actividades productivas, no existe ninguna restricción de tipo ambiental.



**Figura 4.1.** Imagen satelital, forma de llegar a la comunidad, desde Cintalapa, la línea roja señala el camino y el pin amarillo la comunidad UNESCO.



Comunidad  
UNESCO

**Figura 4.2.** Mapa de la selva el ocote, en este se puede observar la ubicación de la comunidad UNESCO con respecto a la reserva, en Chiapas y en México.

### IV.3. Secador solar.

El secador solar fue construido, con financiamiento de la fundación padre Adolfo Kolping y de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, de las siguientes características (Figura 4.3. y 4.4.).

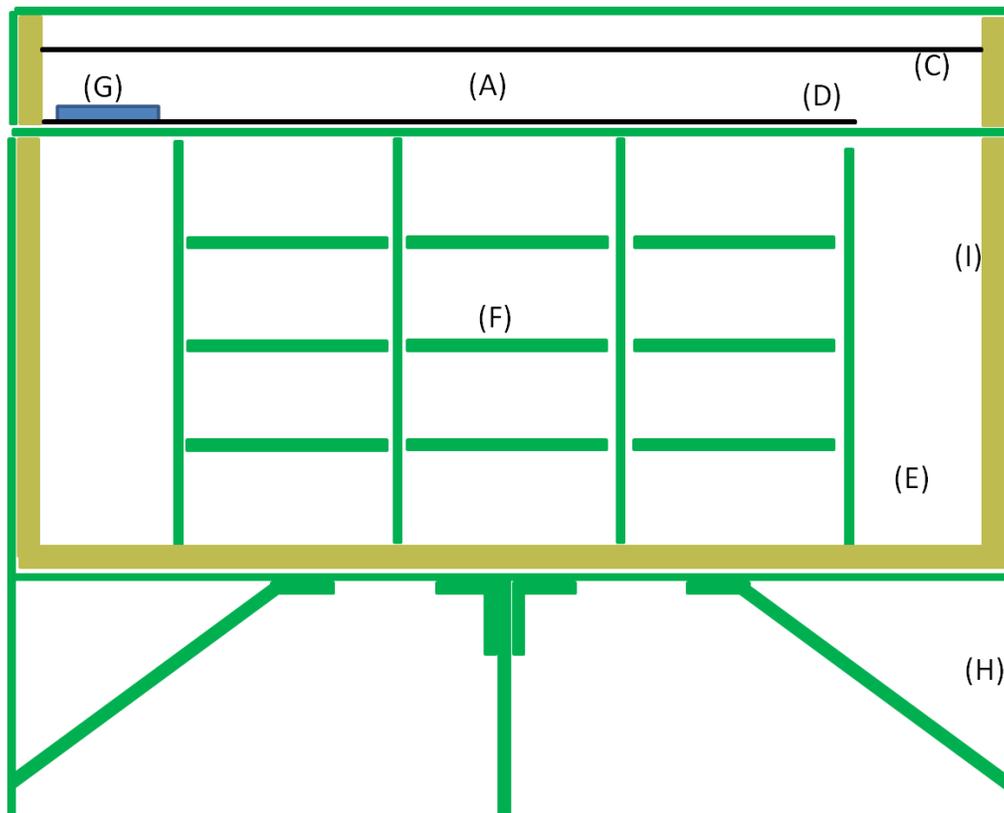
El secador solar es de tipo gabinete con circulación forzada, y es usado para la deshidratación de queso fresco. El sistema de captación (A), está formado por un colector solar de aire, este está colocado en la parte superior del secador solar y tiene un área de  $6 \text{ m}^2$ , El colector capta la radiación del sol, a través una cámara triangular, en ella está suspendida a 10 cm de las cubiertas de vidrio(B), dos laminas corrugadas a dos aguas (C), que funcionan como placa absorbedora, la otra placa (D) también es una lámina pero lisa que forma el techo de la cámara de secado.

La cámara de secado (E) tiene un volumen de  $3.5 \times 1.5 \times 1 \text{ m}^3$ , en su interior se encuentran 9 bandejas (F) de  $0.7 \times 0.9 \text{ m}^2$  lo que representa un área de secado de  $8 \text{ m}^2$  para colocar el producto a secar. La circulación del aire se logra mediante un ventilador del tipo extractor (G) colocado en la parte superior izquierda del equipo, entre el sistema de captación y la cámara de secado. Además cuenta con una ventila (I) para controlar la humedad de la cámara de secado.

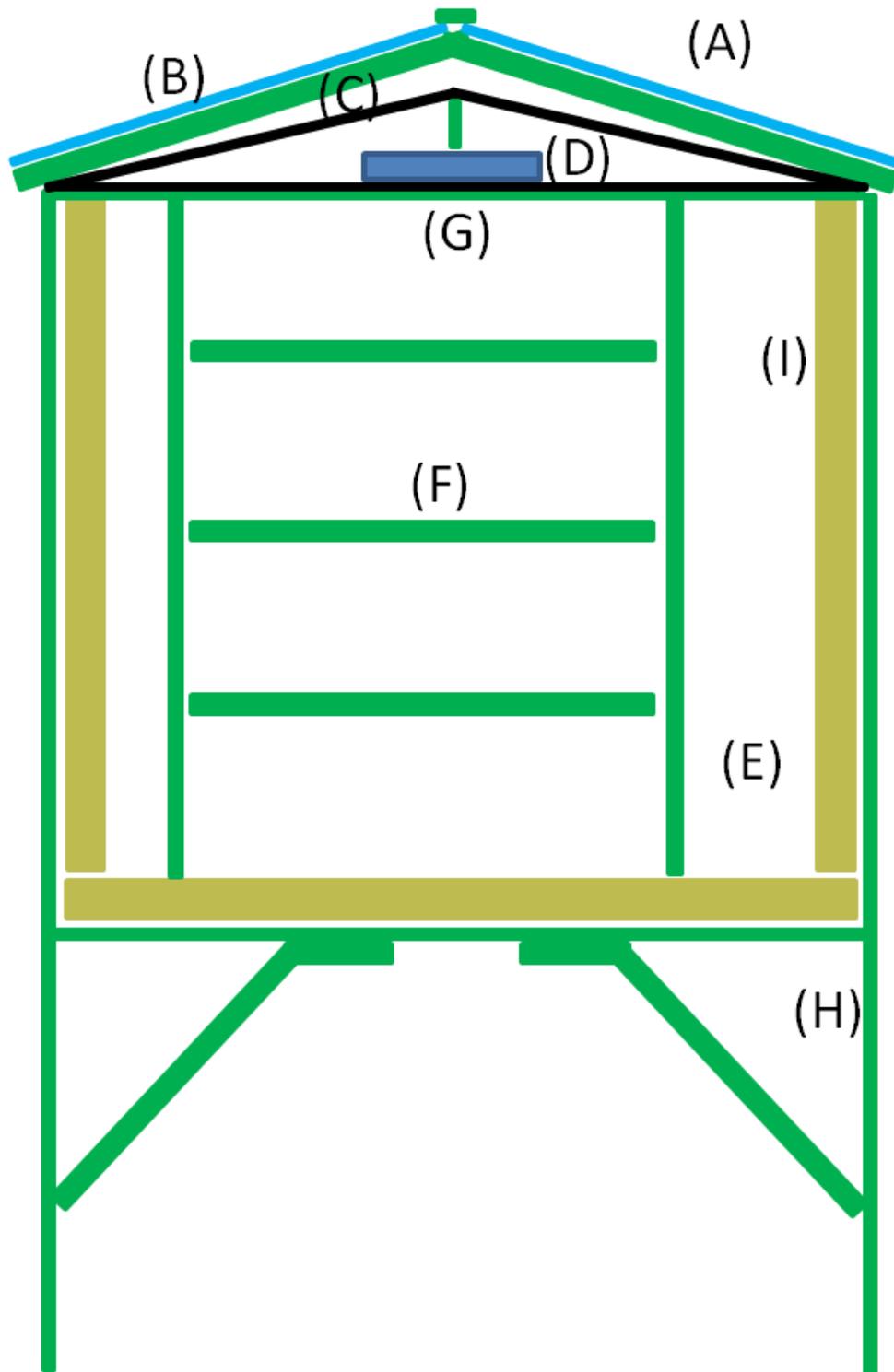
El secador solar se sostiene a partir de un esqueleto de tubular zintroalum, semi soldado en partes, y atornillables entre sí, completamente desarmable (H). Para las paredes y el piso del secador se utilizaron placas vaciadas de espuma de poliuretano de  $1 \frac{1}{2}$  “.

IV.3.1 Partes del secador solar.

- A. Sistema de captación
- B. Cubiertas de vidrio
- C. Láminas corrugadas (placa absorbadora principal)
- D. Lámina lisa (placa absorbadora secundaria)
- E. Cámara de secado
- F. Bandejas
- G. Ventilador
- H. Esqueleto del secador
- I. Ventila



**Figura 4.3.** Esquema del secador solar de queso desarmable, instalado en la comunidad Unesco, vista frontal.



**Figura 4.4.** Esquema del secador solar de queso desarmable, instalado en la comunidad Unesco, vista lateral.

### IV.3.2 Implementación del secador solar para queso en la comunidad UNESCO.

El secador solar para queso fresco fue instalado en la comunidad Unesco, en marzo del 2009, este fue trasladado desde la universidad con ayuda de dos camionetas y un remolque, proporcionado por la fundación Kolping. También fue necesaria otra visita para sellar la cámara del secador y la cámara del colector solar de aire.

#### IV.3.2.1 Traslado del secador solar.

El secador solar se desarmo por completo en la universidad y fue colocado parte por parte en un remolque para ser trasladado a la comunidad. El transporte partió a las 9 de la mañana, en las camionetas iban la herramienta y el personal necesario para la instalación del equipo (Figura 4.5.).



**Figura 4.5.** Camionetas y remolque utilizados para el traslado del secador solar, apoyo de la Fundación Kolping.

### IV.3.2.2. Instalación del secador solar.

La instalación del equipo comenzó a las 12 del día, primero se subieron al techo de la casa donde sería instalado el equipo, todas las piezas del secador solar (Figura 4.6.), después de armo la estructura de la base del secador solar de zintroalum, esta se unió atornillándola. A la estructura de soporte se le colocaron diversos soportes y travesaños que la hacen más estable y rígida (Figura 4.7.).



**Figura 4.6.** Techo la vivienda para la instalación del secador.



**Figura 4.7.** Estructura de soporte del secador solar desarmable.

Posteriormente se colocaron las paredes aislantes traseras y laterales, así como el fondo del secador, el tipo de material utilizado fue multimuro que consiste en un ensamble de dos láminas metálicas y en medio aislante de espuma de poliuretano (Figura 4.8. y 4.9.).



**Figura 4.8.** Paredes del secador solar.



**Figura 4.9.** Fondo del secador solar.

## CAPITULO IV. METODOLOGÍA

Seguido se colocaron las puertas del secador solar y se remacharon para fijarlas en su lugar (Figura 4.10.), consecuentemente se pusieron los rieles por los que corren las bandejas donde se deshidrata el producto (Figura 4.11.).

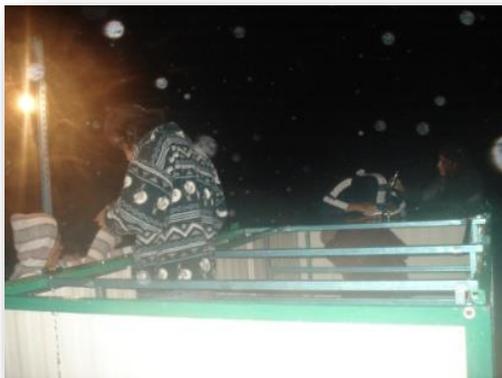


**Figura 4.10.** Puertas del secador.



**Figura 4.11.** Rieles para las bandejas.

La estructura superior de la cámara del secador solar es la base de la cámara del colector solar, esta se colocó y se armó con tornillos (Figura 4.12.), en ella se instaló y así mismo se atornilló el extractor del secador solar para posteriormente colocar las láminas que representarían una de las dos chapas del colector solar de aire (Figura 4.13.).



**Figura 4.12.** Estructuras para poner la lámina secundaria como techo del secador.



**Figura 4.13.** Colocación de extractor entre cámara de secado y cámara del colector.

## CAPITULO IV. METODOLOGÍA

Se colocó la estructura metálica para soportar las láminas de la chapa primaria del colector solar mencionadas (Figura 4.14.), posteriormente se colocaron los vidrios para formar la cubierta transparente del colector solar que evitara la pérdida del calor, del colector de aire al medio y finalmente una canaleta en la unión de los vidrios que forman las dos aguas del techo del secador solar (Figura 4.15.).



**Figura 4.14.** Estructuras metálicas para la chapa principal.



**Figura 4.15.** Cámara de secado y colectores solares de aire instalados.

En otra visita a la comunidad, se selló la cámara del colector solar mediante piezas de madera (Figura 4.16. a) y canaletas de metal para cubrir las maderas y evitar su deterioro (Figura 4.16.b), además se aplicó silicón en todas las uniones de las canaletas y alrededor de los vidrios, esto con el objeto de evitar pérdidas de calor del colector solar e impedir la filtración de agua al interior del secador solar y de la cámara de secado (Figura 4.16.c).



(a)



(b)



(c)

**Figura 4.16.** (a) Sellado de la cámara del colector de aire con madera, (b) canal liso para cubrir la cámara del colector, (c) cubiertas de vidrio del colector solar de aire.

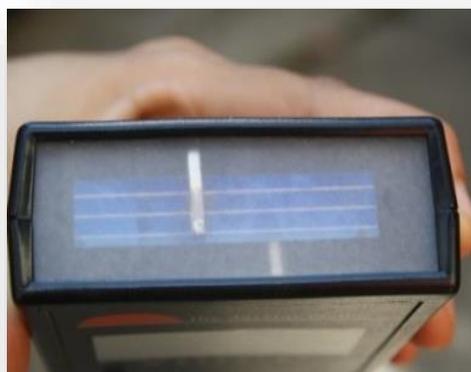
### IV.3.3. Evaluación del secador solar para queso de la comunidad UNESCO.

Se evaluó el proceso de secado del queso fresco, en la comunidad de estudio. Experimentalmente se midieron y monitorearon parámetros atmosféricos, como la radiación solar y la temperatura y humedad relativa ambiental, y parámetros de operación del secador solar tales como la humedad y temperatura dentro de la cámara del secador, la temperatura en las dos chapas colectoras y la temperatura de la cámara del colector solar (Figura 4.21.).

Las mediciones se realizaron en intervalos de 30 minutos cada una, iniciando a las 7 de la mañana y concluyéndolas a las 6 de la tarde, los instrumentos de medición utilizados fueron, para la humedad y temperatura ambiental se determinó mediante un termómetro de bulbo seco y húmedo (Figura 4.17.), para la radiación solar un Solarímetro de la marca Daystar (Figura 4.18.). La humedad y temperatura de la cámara de secado se determinó mediante un termo higrómetro de la marca Haana (Figura 4.19.). Finalmente la temperatura de las chapas se determinó mediante termopares del tipo K (Figura 4.20.) y un multímetro de la marca Steren (Figura 4.19.).



**Figura 4.17.** Termómetro de bulbo seco y de bulbo húmedo.



**Figura 4.18.** Solarímetro para determinar la radiación solar *in situ*.

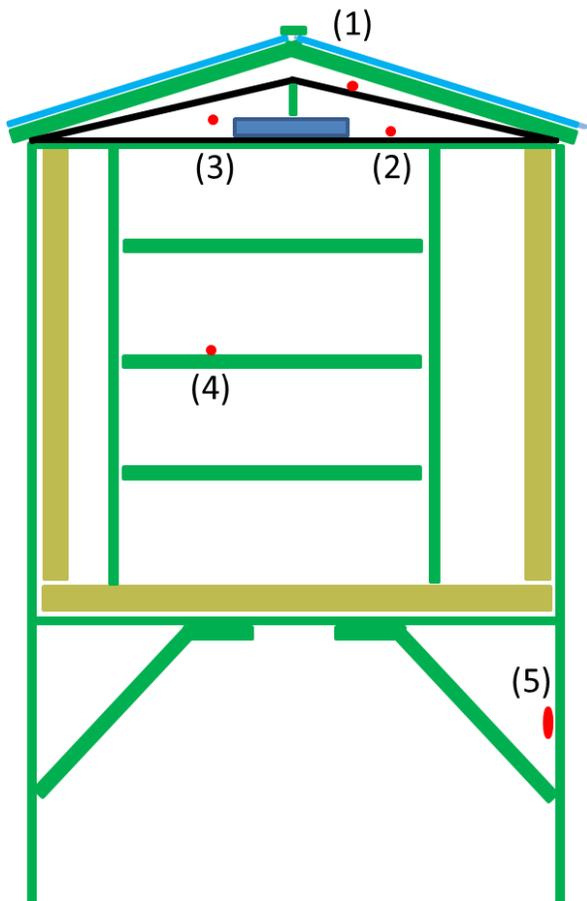
## CAPITULO IV. METODOLOGÍA



**Figura 4.19.** Termo higrómetro, y multímetro usados.



**Figura 4.20.** Sensores de temperatura y humedad.



**Figura 4.21.** Esquema del secador solar donde muestra, los puntos dentro del equipo donde se midieron la temperatura, (1) placa absorbente principal, (2) placa absorbente secundaria, (3) cámara del calentador solar de aire. (4) cámara del secador solar, temperatura y humedad. (5) termómetro de bulbo seco y bulbo húmedo.

## IV.4. Queso fresco chiapaneco.

### IV.4.1 Pruebas de secado de queso fresco chiapaneco.

Se realizaron dos pruebas de secado con el queso fresco chiapaneco; La primera prueba consistió en el secado del producto bajo condiciones controladas en una estufa eléctrica (Figura 4.22.), en ellas se analizó el efecto de la temperatura (40, 55 y 70 °C) en el tiempo de secado y en la calidad del producto. La segunda prueba residió en deshidratar el queso fresco con un secador solar multipropósito existente en la UNICACH (Figura 4.23.), esto con el fin de evaluar el efecto del tamaño de las muestras de queso, en el tiempo de secado. En ambos casos se analizó la pérdida de humedad del producto en el tiempo obteniéndose así la cinética de secado del queso fresco para las dos pruebas.



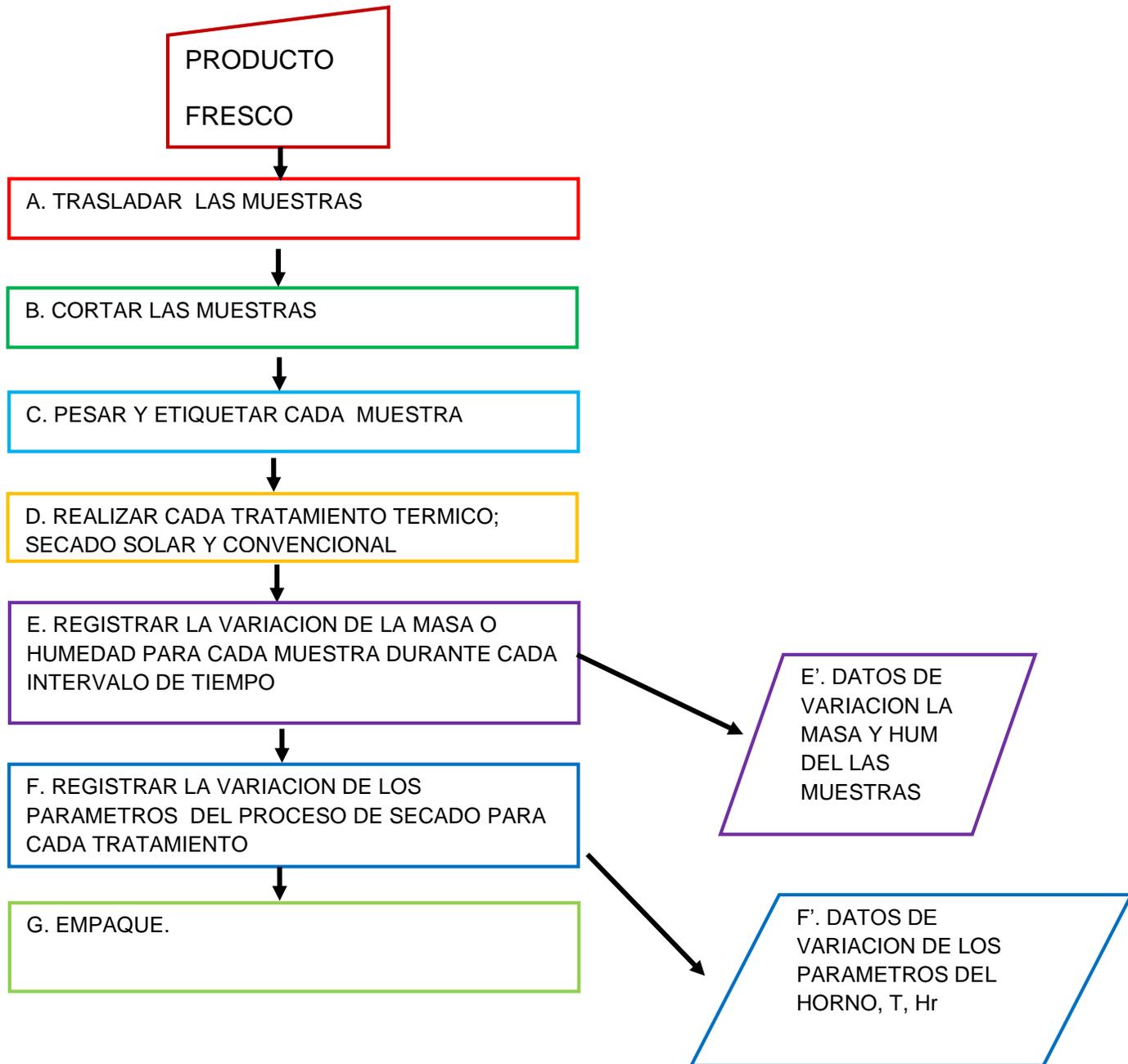
**Figura 4.22.** Estufa eléctrica de laboratorio, dispositivo de secado para las pruebas bajo condiciones constantes.



**Figura 4.23.** Secado solar multipropósitos, en la plataforma del CIDTER de la UNICACH.

IV.4.2. Diagrama de flujo.

A continuación se presenta un diagrama de flujo de las pruebas de secado referentes al queso de la comunidad.



### IV.4.3. Etapas de las pruebas de secado de queso fresco.

A continuación se describen las etapas necesarias para las pruebas de secado de queso fresco. Para las pruebas de secado bajo condiciones controladas y para las pruebas de secado solar, para los dos procesos las etapas son las mismas, excepto en la etapa del tratamiento térmico.

#### A. Trasladar las muestras.

Es necesario el traslado de los quesos frescos desde la comunidad, para esto los quesos fueron colocados en hieleras plásticas para evitar el crecimiento microbiano durante el viaje, para la toma de muestra se hizo referencia a la norma NOM-109-SSA-1-1994. PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA, MANEJO Y TRANSPORTE DE MUESTRAS DE ALIMENTOS PARA SU ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.

B. Cortar los quesos.

B.I. Secado controlado.

Fueron cortados 36 cubos de queso de aproximadamente 2.5 cm de ancho, 12 cubos para cada temperatura (Figura 4.24.). Estos fueron colocados en una charola para poder manejarlos y trasladarlos dentro del laboratorio (Figura 4.25.).



**Figura 4.24.** Muestras de queso en cubos.



**Figura 4.25.** Manejo de los cubos mediante una charola.

B.II. Secado solar

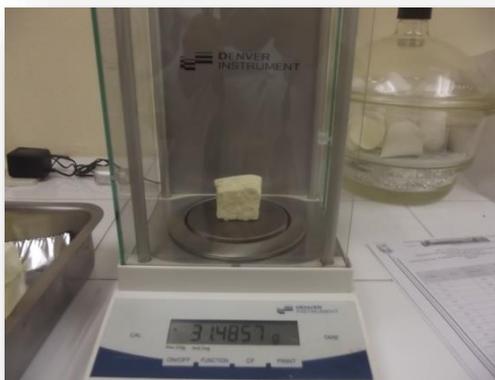
Se cortaron quesos por la mitad y cuartos de queso, en total fueron dos quesos enteros, cuatro medios quesos y cuatro cuartos de queso. Igualmente fueron puestos en charolas (Figura 4.26.).



**Figura 4.26.** Quesos cortados, para el secado solar.

### C. Pesar y etiquetar cada muestra.

Después las muestras de queso fueron pesadas y se registró la masa inicial de cada una de ellas en la tabla de variación de la masa, además se etiquetaron las muestras con banderitas y números. Esto se realiza para ambos tratamientos, secado controlado (Figuras 4.27. y 4.28.) y secado solar (Figuras 4.29. y 4.30.).



**Figura 4.27.** Balanza analítica, pesado de las muestras de queso.



**Figura 4.28.** Etiquetado de las muestras.



**Figura 4.29.** Pesado de quesos enteros, medios quesos y cuartos de queso para el secado solar.

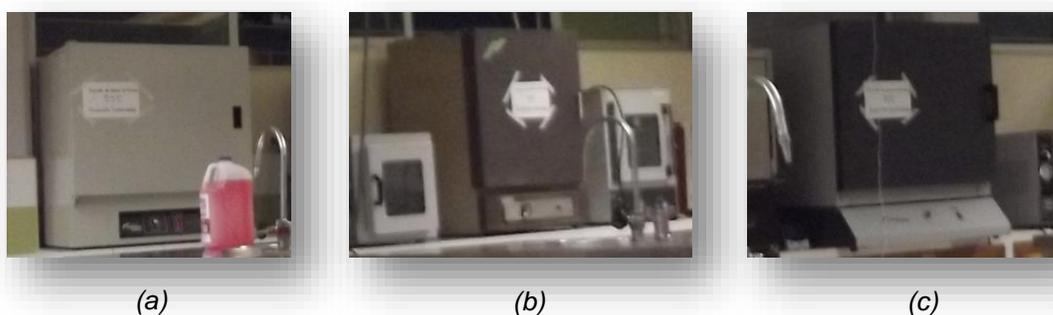


**Figura 4.30.** Etiquetar las muestras para llevar el control de la variación de la masa en el cuadro de registro.

D. Realizar cada tratamiento para las pruebas de queso.

D.I. Secado controlado de queso fresco chiapaneco.

Las pruebas de secado fueron realizadas en los laboratorios, de análisis de alimentos y microbiología de la UNICACH y consistieron en someter las muestras de queso a diferentes tratamientos, esto con el fin de evaluar el efecto de la temperatura, en el tiempo de secado. Para las pruebas los quesos fueron traídos desde la comunidad UNESCO, y se usaron tres hornos de vacío, para cada temperatura, 40, 55 y 70 °C (Figura 4.31.).



**Figura 4.31.** Estufas eléctricas de laboratorio, usadas en las pruebas (a) 40 °C, (b) 55°C y (C) 70 °C.

En cada una se colocaron en una única bandeja 12 cubos de queso de aproximadamente 2.5 cm. de ancho (Figura 4.32.). Durante el secado, cada hora las muestras fueron retiradas de las estufas eléctricas para determinar la humedad de una de las 12 muestra de queso a la vez, con una termobalanza (Figura 4.33.), con estos datos se trazó la curva de perdida de humedad en el tiempo.



**Figura 4.32.** Cubos de queso dentro de la estufa eléctrica.



**Figura 4.33.** Termo balanza.

### D.2. Secado solar de queso fresco chiapaneco.

Las pruebas de secado se realizaron en un laboratorio y en el área de evaluación de dispositivos energéticos del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER) de la UNICACH, para esto las muestras de queso se sometieron a la deshidratación a través de un secador solar de tipo cabina, multipropósito, con circulación forzada, similar al secador solar de la comunidad Unesco (Figura 4.34.).



**Figura 4.34.** Secadores solares en la plataforma del CIDTER, UNICACH.

Esto con el objeto de evaluar la influencia del tamaño de partícula, en el tiempo de secado y calidad del producto. Para el estudio se varió el tamaño de partícula de la muestra en tres niveles; queso entero, queso partido a la mitad y cuarterones de queso, un queso entero, dos mitades y dos cuartos de queso. A continuación se propone un procedimiento para el secado solar de queso. En estantes de secado el queso se atempera con el objeto de orearlo y producir una corteza en él, para las pruebas de secado el tiempo que transcurre desde su manufactura más el tiempo de traslado es suficiente para permitir una deshidratación natural previa, además si los quesos fueron extraídos de un refrigerador se espera hasta que estos alcancen la temperatura del medio ambiente.

## CAPITULO IV. METODOLOGÍA

Seguido de esto se retiran las charolas del secador solar y se procede a limpiarlas y lavarlas quitándoles los residuos del secado anterior (Figura 4.35.), las charolas se cargan con los quesos y estos se disponen de forma intercalada de modo que permitan un libre flujo de aire caliente entre las charolas del secador(Figura 3.36.).



**Figura 4.35.** Limpieza de charolas.



**Figura 4.36.** Muestras de queso dentro del secador solar.

E. Registrar la variación de la masa o humedad para cada muestra durante cada intervalo de tiempo.

### E.I. Secado controlado.

Durante el secado, las muestras fueron retiradas del horno de laboratorio, para determinar su humedad mediante una termobalanza a intervalos de 30 minutos hasta obtener peso constante. El procedimiento fue realizado de igual forma en cada tratamiento. Fue necesario contar con una charola y guantes de látex para manipular la muestra dentro del laboratorio cuando fue transportada de las estufas eléctricas al cuarto donde se determinó la humedad de cada muestra de queso (Figura 4.37. y 4.38.).



**Figura 4.37.** Muestra de queso en cubos, para determinar humedad.



**Figura 4.38.** Termo balanza usada para determinar la humedad de las muestras.

### E.II. secado solar.

Durante el sacado solar las muestras de queso fresco fueron retiradas del secador diariamente, para medir y registrar la pérdida de masa de las mismas. Mediante una balanza de la marca CAMRY modelo EK3252 (Figura 4.39.).



**Figura 4.39.** Balanza digital, con esta se determinó y registro la variación de la masa de las muestras de queso.

F. Registrar la variación de los parámetros del equipo de secado.

F.I. Secado controlado.

Se registraron ciertos parámetros dentro de la estufa eléctrica estos fueron, la temperatura y la humedad relativa dentro del horno de laboratorio mediante un termo higrómetro de la marca Avaly (Figura 4.40. y 4.41.).



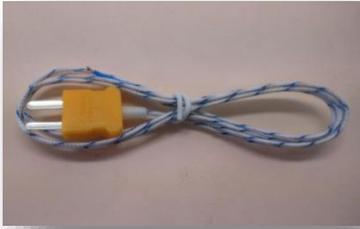
**Figura 4.40.** Sensor de temperatura y humedad.



**Figura 4.41.** Termo higrómetro.

F.II. Secado solar.

Se midieron cuatro parámetros dentro del secador solar, temperatura en la cámara de secado, temperatura en las chapas del colector solar y humedad relativa, además de tres parámetros ambientales, radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa ambiental. Para medir la temperatura y humedad relativa ambiental dentro y fuera del secador se utilizó el termo higrómetro (Figura 4.41.), para determinar la temperatura de algunas partes del secador se usaron termopares del tipo k (Figura 4.42.), y un multímetro de la marca Steren (Figura 4.44). Para la radiación solar se usó un Solarímetro de la marca, Tes 1333, Solar Power Meter (Figura 4.43.).



**Figura 4.42.** Sensores de temperatura.



**Figura 4.43.** Solarímetro usado para medir la radiación solar.



**Figura 4.44.** Solarímetro usado para medir la radiación solar.

#### G. Empaque.

Una vez que las muestras fueron secadas estas fueron almacenadas, en bolsas plásticas de cierre herméticas y además etiquetadas (Figura 4.45.).



**Figura 4.45.** Muestras de queso deshidratadas, pruebas de secado controlado.

IV.4.4 Construcción de las curvas de secado.

Para la elaboración de las curvas rapidez de secado y curvas de velocidad de secado, para el secado solar y secado controlado del queso fresco chiapaneco, se utilizó el método descrito por Geankoplis, 1995 y Carranza, 2002. El cual se describe a continuación, primero se determina el contenido de humedad en base seca en cada instante ( $X_t$ ), este se expresa como peso total del sólido húmedo ( $M_t$ , sólido seco más humedad), a diferentes tiempos, y el peso del producto seco ( $F_s$ ).

$$X_t = \frac{M_t - F_s}{F_s} \frac{\text{kg totales de agua}}{\text{kg de solido seco}} \quad (4.1)$$

Una vez fijado el contenido de humedad de equilibrio del producto ( $X_{eq}$ ) en kg humedad de equilibrio/ kg de sólido seco. Con esto se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre o adimensional ( $X$ ) en kg de agua libre/kg de solido seco para cada valor de  $X_t$ .

$$X = \frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (4.2)$$

Usando los datos calculados en la Ecuación (4.2), se traza una gráfica del contenido de humedad libre  $X$  en función del tiempo “t” en horas, esta grafica representa a la curva de secado del producto deshidratado. Finalmente para calcular la velocidad de secado se determina según la siguiente ecuación (4.3), donde (A) representa el área de la superficie donde tiene lugar el secado en  $m^2$ , para representar las curvas de velocidad de secado, se grafica la velocidad de secado en función de la humedal libre.

$$R = \frac{Fs}{A} \frac{dX}{dT} \quad (4.3)$$

#### VI.4.5 Modelado de la cinética de secado.

Para determinar el modelo matemático que mejor describe el comportamiento cinético de secado, los datos experimentales fueron ajustados a diversos modelos; Newton, Page, Henderson y Logarítmico (Montes 2002), mediante el programa Matlab serán determinados los coeficientes para cada modelo.

$$Xa(t) = \exp(-k t) \quad (4.4)$$

$$Xb(t) = \exp(-k t^n) \quad (4.5)$$

$$Xc(t) = a * \exp(-k t^n) \quad (4.6)$$

$$Xd(t) = a * \exp(-k t) + C \quad (4.7)$$

##### VI.4.5.1. Modelo difusional de Fick.

Para modelar el periodo de velocidad decreciente en el secado de queso chiapaneco, también será usado el modelo difusional, mediante la ecuación integrada de la segunda ley de Fick para geometría plana en una dirección.

$$X = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{h_n^2} e^{\left(\frac{-h_n^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right)} \quad h_{n=2n-1} \quad (4.8)$$

## CAPITULO IV. METODOLOGÍA

Donde (X) es la humedad libre, (Xt) la humedad en cada instante, determinado mediante una termo balanza, (Xe) es la humedad de equilibrio, y (X<sub>0</sub>) la humedad inicial, (Kg agua/Kg s.s. o % de humedad), t esa el tiempo en horas, L es el semiespesor de la lámina (m), (D<sub>ef</sub>) es el coeficiente difusional expresado en m<sup>2</sup>/s.

Se han considerado simplificaciones, la primera es suponer que el primer término de la sumatoria es el único que tiene significación, así que para n=0, la ecuación resultante se muestra a continuación (4.9), otros autores como Jason-Mulet usaron la ecuación simplificada para cubos de zanahoria la cual se presenta con el número (4.10)

$$X = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right)} \quad (4.9)$$

$$X = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = e^{\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right)} \quad (4.10)$$

Mediante la regresión lineal, serán obtenidos, los valores de los parámetros asociados con la mejor curva de ajuste, para nuestros datos experimentales de humedad libre (X). Considerando las variables multidimensionales X y t donde  $f$  es una función no lineal de la siguiente forma

$$X = f(t, \theta) + \varepsilon \quad (4.11)$$

Para la regresión exponencial, La función  $f$  es no lineal en función de X pero lineal en función de los parámetros desconocidos a y k. Cuando las variables X y

## CAPITULO IV. METODOLOGÍA

t presentan una dependencia de forma exponencial, es necesario ajustar a la nube de puntos una función como la que se presenta a continuación.

$$X = a \exp(-kt) \quad (4.12)$$

Nótese que esta ecuación es muy parecida al modelo de Newton y al modelo logarítmico.

Mediante una transformación lineal, aplicando logaritmos neperianos, se convierte el problema en una cuestión de regresión lineal.

$$\ln(X) = \ln(a) + (-kt) \quad (4.13)$$

$$y = A + Bx \quad (4.14)$$

$$y = \ln(X), \quad A = \ln(a), \quad Bx = -kt, \quad B = -k \quad y \quad x = t \quad (4.15)$$

$$a = \frac{8}{\pi^2} \quad (4.16)$$

$$k = -\frac{\pi^2}{4L^2} Def \quad (4.17)$$

Para el caso de la Ecuación 4.4 que representa el modelo de Newton, al considerar el valor de k como se presenta en la ecuación 4.16. La Ecuación 4.4 se asemeja a la ecuación 4.9.

Para la Ecuación 4.6 que representa el modelo de Henderson, al considerar el valor de a y k como se presenta en las ecuaciones 4.16 y 4.17. La ecuación 4.6 se asemeja a la ecuación 4.10.

**IV.4.5.2. Coeficiente de difusión (Def)**

De la pendiente de estas rectas del  $\ln(X)$  vs  $t$ , será deducida Def para cada temperatura.

$$B = \frac{\pi^2}{4L^2} Def \quad (4.18)$$

A partir de la Ecuación (4.14 y 4.19), será determinada Def, mediante los coeficientes obtenidos para el modelo de Newton y Henderson.

$$Def = \frac{k*4L^2}{\pi^2} \quad (4.19)$$

**IV.4.5.3. Energía de Activación.**

La dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura, puede describirse por la ecuación de Arrhenius.

$$Def = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.20)$$

En la que  $E_a$  es la energía de activación,  $T$  es la temperatura absoluta,  $D_0$  es el factor de Arrhenius y  $R$  es la constante universal de gases (8.314 kJ/mol).

La energía de activación representa la energía requerida para iniciar la difusión de la humedad durante el secado, y da un indicio de la influencia de la temperatura en el proceso (Montes, 2008).

Mediante la regresión exponencial también se puede calcular, la energía de activación al aplicar logaritmos naturales.

$$\ln(Def) = \ln(Do) + \left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad Y = A + Bx \quad (4.21)$$

$$Y = \ln(Def), \quad A = \ln(Do), \quad Bx = \left(\frac{Ea}{RT}\right), \quad B = \frac{Ea}{R}, \quad x = \frac{1}{T} \quad (4.22)$$

$$Do = \exp(A) \quad y \quad Ea = -B * R \quad (4.23)$$

Donde A representa el intercepto y B la pendiente de la ecuación  $Y= A + BX$

#### IV.4.6. Criterios para determinar el modelo de mejor ajuste.

Los criterios usados para escoger el modelo de mejor ajuste fueron el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), error medio estimado (EME) Ecuación 4.24 y desvío medio relativo (DMR) Ecuación 4.25.

$$EME = \sqrt{\frac{\sum(v_{exp}-v_m)}{n-1}} \quad (4.24)$$

$$DMR = \frac{100}{n} \sum \frac{|v_{exp}-v_m|}{v_{exp}} \quad (4.25)$$

## CAPITULO IV. METODOLOGÍA

Donde EME es el error medio estimado, EME es el desvío medio relativo (%),  $V_{exp}$  es el valor obtenido experimentalmente,  $V_p$  es el valor obtenido por el modelo, n es el número de datos experimentales.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### V.1. Introducción.

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron en esta tesis, en primer lugar se presenta, el trabajo realizado con el secador solar, los resultados de la construcción del equipo, así como de las recomendaciones técnicas y las observaciones de las características del secador solar en función del producto deshidratado, en este caso Queso Chiapaneco, además la evaluación del secador solar de la comunidad con carga en la que se grafican las condiciones de operación del secador solar y las condiciones ambientales.

Seguido se presentan los resultados de las pruebas de secado de queso fresco chiapaneco, bajo condiciones controladas, las condiciones de operación de las estufas de laboratorio utilizadas en las pruebas, además se determina la cinética de secado de queso fresco chiapaneco para condiciones controladas, las curvas de rapidez de secado y velocidad de secado son presentadas, también se determinan el coeficiente de difusión ( $D_{ef}$ ) y la energía de activación ( $E_a$ ). Así mismo se presentan las pruebas de secado solar de queso fresco chiapaneco.

### V.2. Equipos de secado.

#### V.2.1. Evaluación del secador solar de queso fresco chiapaneco.

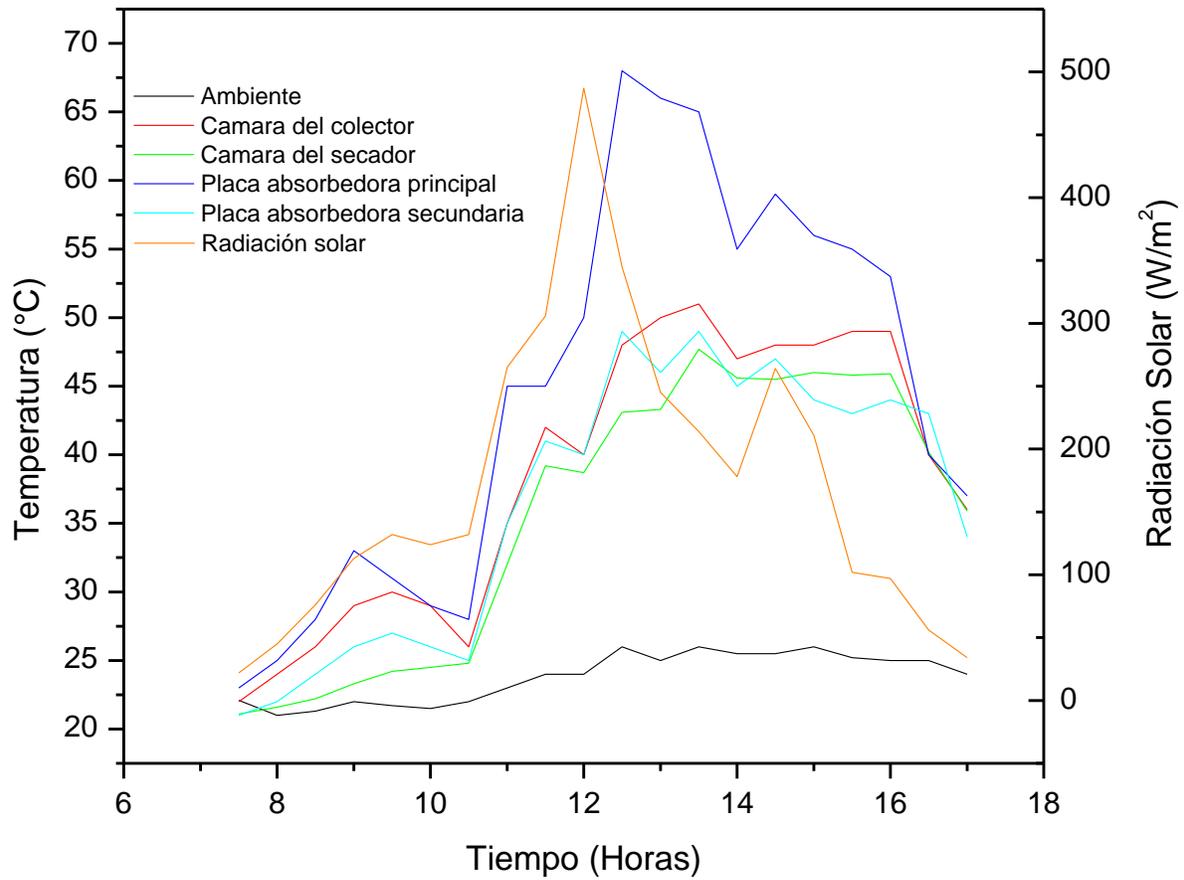
La temperatura fue medida en diversos puntos del secador solar, temperatura en la cámara del secador, temperatura en las placas absorbedoras además de la temperatura dentro del colector solar (Figura 4.20.). También se midió la temperatura ambiente y la radiación solar incidente. En la (Figura 5.1.) se puede observar que las

temperaturas alcanzadas dentro del secador solar dependen directamente de la cantidad de radiación solar incidente en el secador, es claro que esta dependencia es más evidente para las temperaturas alcanzadas por la placa absorbadora principal. Esta representa la placa primaria del colector solar de aire, la cual está formada por dos láminas corrugadas que penden a la mitad del colector solar de aire, estas reciben toda la radiación incidente.

También se observa que las temperaturas alcanzadas por la placa absorbadora principal son superiores, alcanzando los 68 °C a medio día, a las temperaturas alcanzadas por las demás partes del secador solar, esto se debe a que esta placa absorbadora junto con el colector solar de aire, se encargan de recibir y trasforma de manera directa toda la energía solar captada en energía calórica para después ser distribuida mediante el extractor de aire hacia la cámara de secado. Consecuente mente la temperatura en la cámara del colector solar de aire es menor que en la placa absorbadora principal, y que las temperaturas de la placa absorbadora secundaria, la cámara del colector y la cámara del secador que se encuentran en rangos de temperatura parecidos.

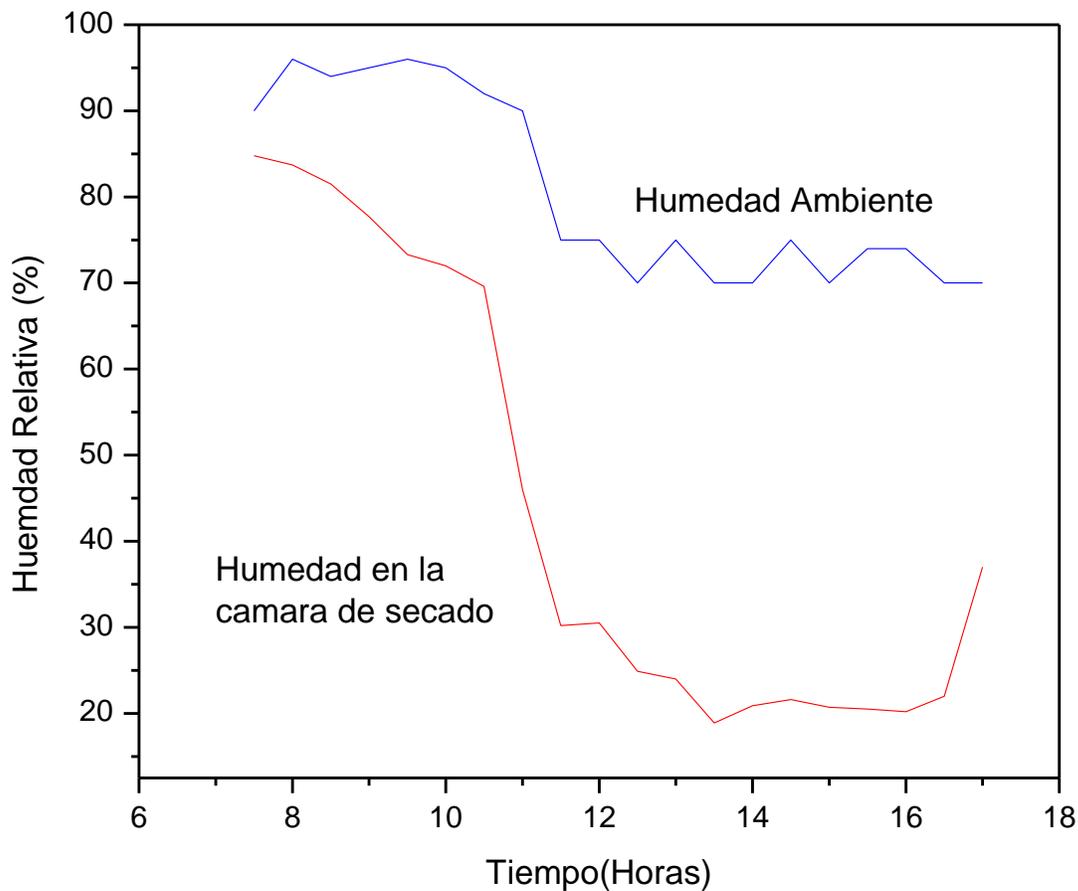
Dentro de la cámara de secado se alcanzaron temperaturas entre los 20 °C como mínima registrada a las 7 de la mañana y 47 °C como máxima registrada entre la una y dos de la tarde. De las 10 de la mañana a las 5 de la tarde la cámara del secador solar, presentó un rango de temperaturas entre 37 y 45 °C.

En las mañanas debido a la alta humedad, a la baja temperatura y a nublados parciales en el cielo el proceso de calentamiento es lento, estabilizándose hacia el mediodía. Por las tardes de nuevo se presentan nublados parciales, por lo que las horas de sol que recibe el secador solar son pocas. Es un hecho que las características del clima pueden ser adversas en la época de lluvias produciendo una disminución de las temperaturas dentro de la cámara de secado alargando el tiempo de secado, pero también se presenta un periodo de días soleados importante en el año aumentando la velocidad del proceso de secado solar de queso fresco chiapaneco.



**Figura 5.1.** Variación de las temperaturas alcanzadas en diversas partes del secador solar y del ambiente y radiación solar incidente en el tiempo. Evaluación del secador solar de queso con carga mínima y baja radiación solar, de la comunidad UNESCO, 30 de julio de 2010.

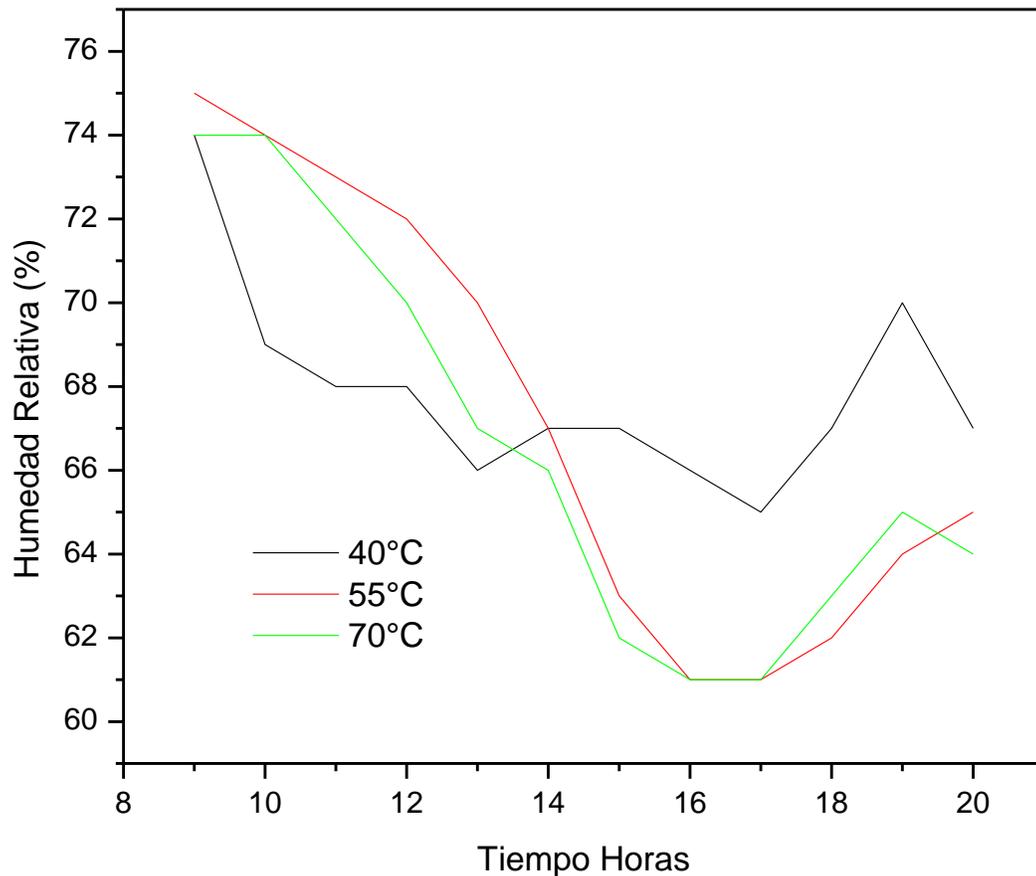
También se registraron la humedad relativa dentro del secador solar de queso y la del ambiente, se puede observar como la humedad relativa dentro de la cámara del secador solar es menor que la humedad presente en el ambiente. Después de las 10 de la mañana la humedad relativa de la cámara de secado desciende abruptamente en dos horas, para después mantenerse estable por un lapso de tiempo de 6 horas aproximadamente y para el final del día la humedad dentro de la cámara de secado aumenta debido a las condiciones ambientales y a la perdida de calor dentro del secador solar (Figura 5.2.).



**Figura 5.2.** Variación de la humedad relativa en el ambiente y dentro de la cámara de secado. Evaluación del secador solar de queso con carga mínima, de la comunidad UNESCO, 30 de Julio de 2010.

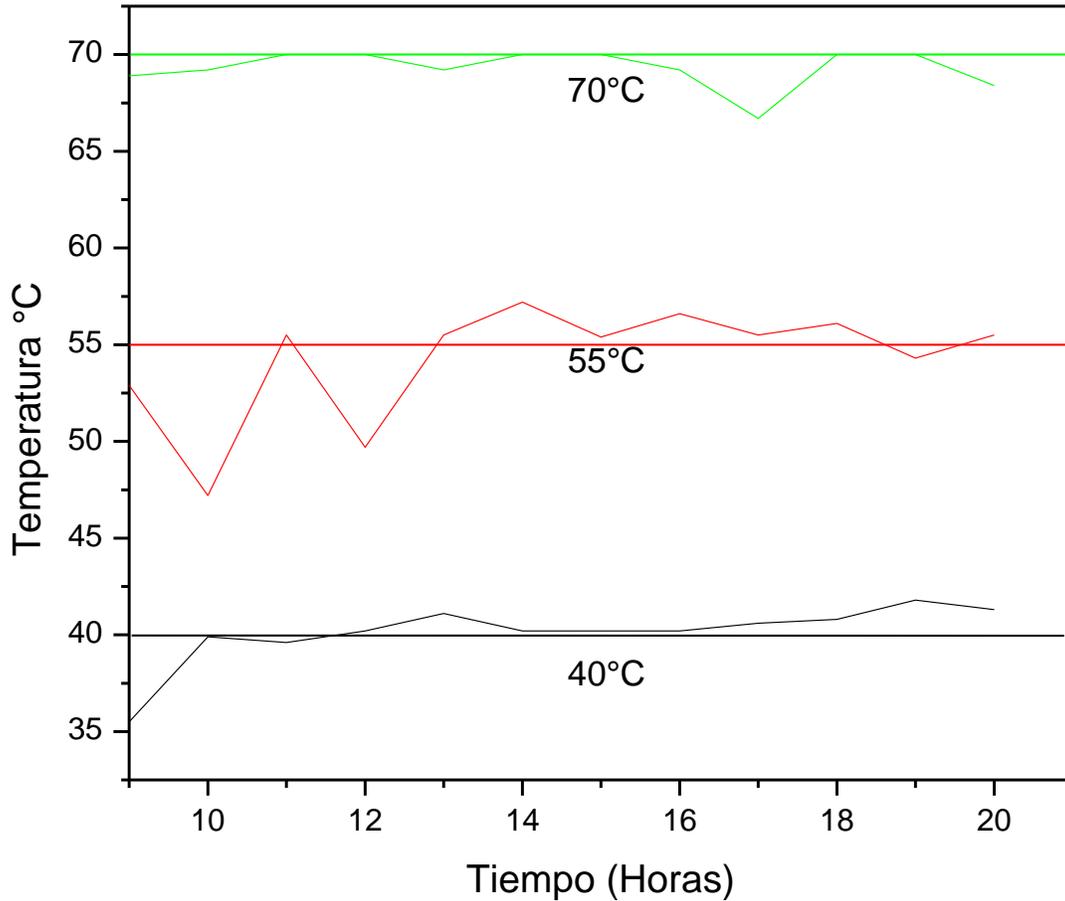
V.2.2. Evaluación de los hornos de laboratorio usados para el secado controlado.

En las (Figuras 5.3. y 5.4.) se presentan la variación de los parámetros de las estufas de laboratorio, la temperatura y humedad interior, en dependencia del tiempo. Es necesario mencionar que es posible en teoría regular y mantener constante la temperatura de las estufas de laboratorio utilizadas, pero en la práctica la temperatura se ve afectada por diversos factores, uno de ellos es el tipo de estufa, pues se utilizaron tres tipos de estufa de características parecidas pero de modelos y marcas diferentes, lo cual conllevó a que la temperatura permaneciera más constante en la estufa usada para realizar las pruebas a 40 °C que en las otras (Figura 5.4.), se calculó el error medio estimado y el desvío medio relativo entre la temperatura medida dentro de la cámara de secado y la temperatura constante



**Figura 5.3.** Variación de la humedad dentro de la estufa, Pruebas de secado controlado de queso fresco chiapaneco, 22 de junio de 2012.

esperada 40,55 y 70 °C, (Tabla 5.1). Otro factor se debe a que al sacar cada hora la muestra del horno, para determinar la humedad, se presentan pequeñas pérdidas de calor.



**Figura 5.4.** Variación de la temperatura dentro de la estufa, Pruebas de secado controlado de queso fresco chiapaneco, 22 de junio de 2012.

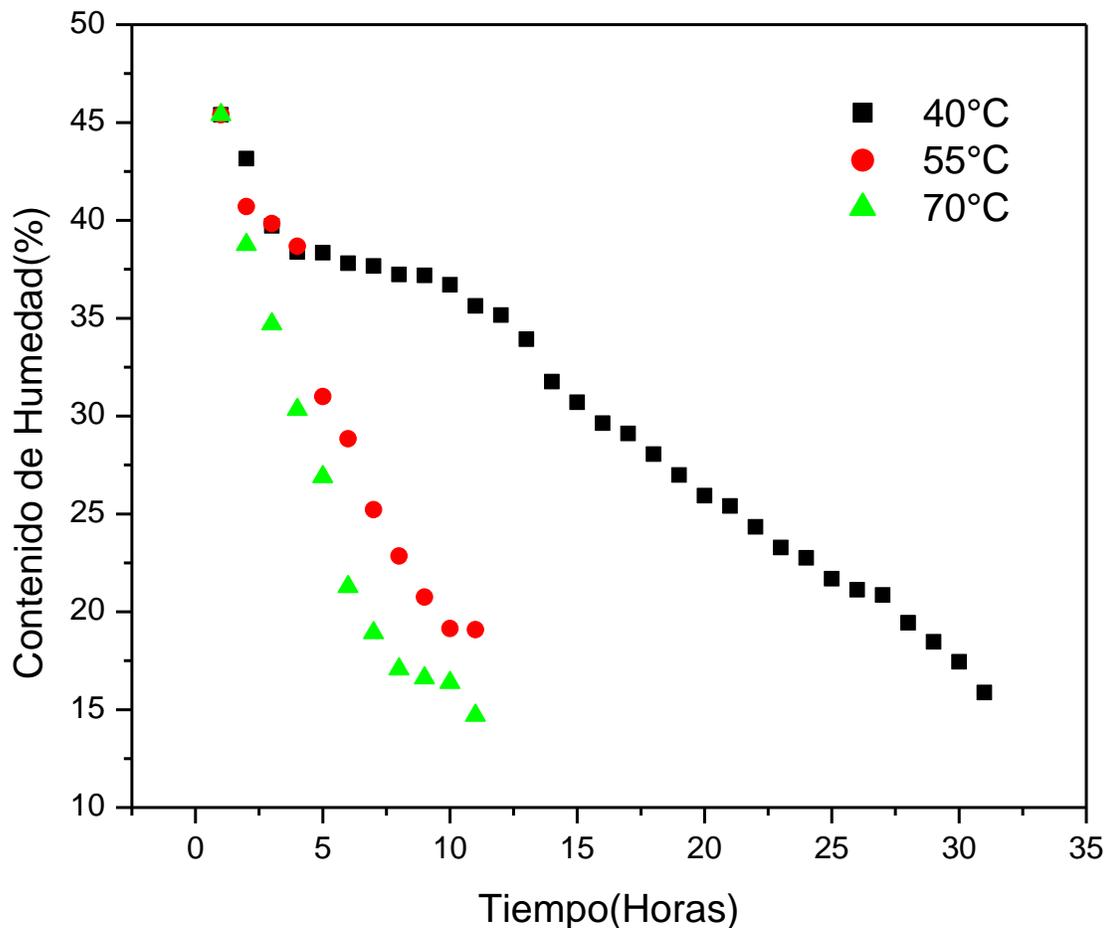
**Tabla 5.1.** Desvío Medio Relativo y Error Medio Estimado (ecuaciones 4.25 y 4.25), entre la temperatura registrada para cada estufa y la temperatura de control para cada tratamiento 40, 55 y 70 °C.

	40 °C	55 °C	70 °C
<b>DMR</b>	2.45798078	3.78397624	3.38542046
<b>EME</b>	0.35675303	0.88420483	1.4585173

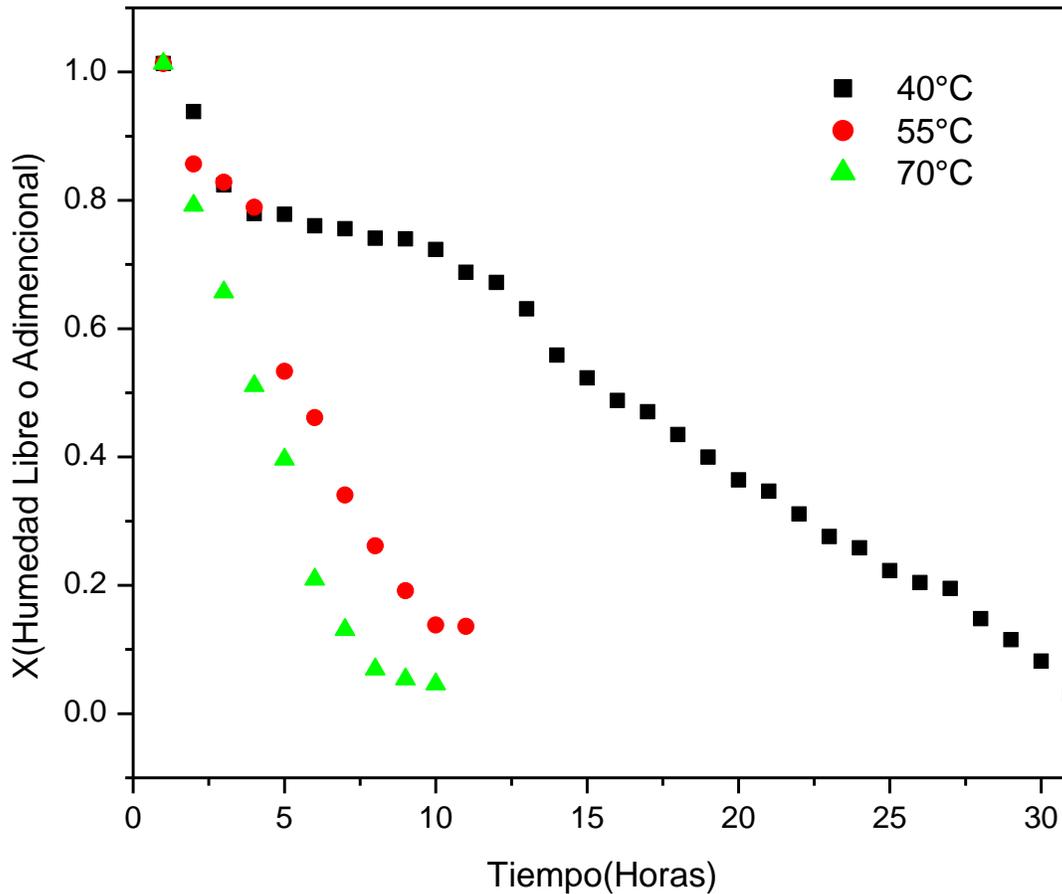
### V.3. Producto.

#### V.3.1. Cinética de secado de queso fresco chiapaneco bajo condiciones controladas de temperatura.

Con los datos de pérdida de humedad del producto en el tiempo (Figura 5.5.) se construyeron las curvas de rapidez de secado (Figura 5.6.), en estas se muestra la variación del contenido de humedad libre en función del tiempo de secado, para las tres temperaturas ensayadas, 40, 55 y 70 °C, esta se determinó mediante el método propuesto por Genkopolis (1983).



**Figura 5.5.** Variación del contenido de humedad de las muestras de queso fresco, para los tres tratamientos térmicos en el tiempo, Datos Experimentales, determinación de humedad por medio de termobalanza.



**Figura 5.6.** Curva de Rapidez de Secado para Queso Fresco Chiapaneco, Variación de la Humedad Libre en el tiempo.

Analizando las curvas de rapidez de secado, se observa que la cinética de secado fue fuertemente influenciada por la temperatura, y que el empleo de temperaturas más elevadas redujo significativamente el tiempo necesario para deshidratar las muestras de queso, cuanto mayor sea la temperatura mayor será la velocidad de secado.

Se puede observar también que la pérdida de humedad a 40° decrece linealmente, y la pérdida de humedad a 55 y 70 °C decrece exponencialmente, siendo más evidente para 70°C. Esto apunta que a bajas temperaturas el proceso de secado del queso ocurre en el periodo de velocidad constante y a medida que aumenta la temperatura el periodo de velocidad decreciente domina el proceso de secado.

## CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de queso fresco presentaron una humedad inicial del 45%, dato que coincide con lo registrado por Berrones et al. Este autor propone una humedad final del producto del 15%, en las pruebas ensayadas para reducir la humedad hasta este valor fueron necesarias 31 horas para el tratamiento a 40 °C, mientras que para 55 y 70 °C fueron necesaria 18 y 13 horas respectivamente, esto es claro debido que a mayor temperatura mayor será la evaporación del agua contenida en el producto.

### V.3.2. Modelado de la cinética de secado.

Para determinar el modelo matemático que mejor describe el comportamiento cinético de secado, los datos experimentales fueron ajustados a cuatro modelos; Newton, Page, Henderson y Logarítmico para cada temperatura 40, 55 y 70 °C (Montes 2002).

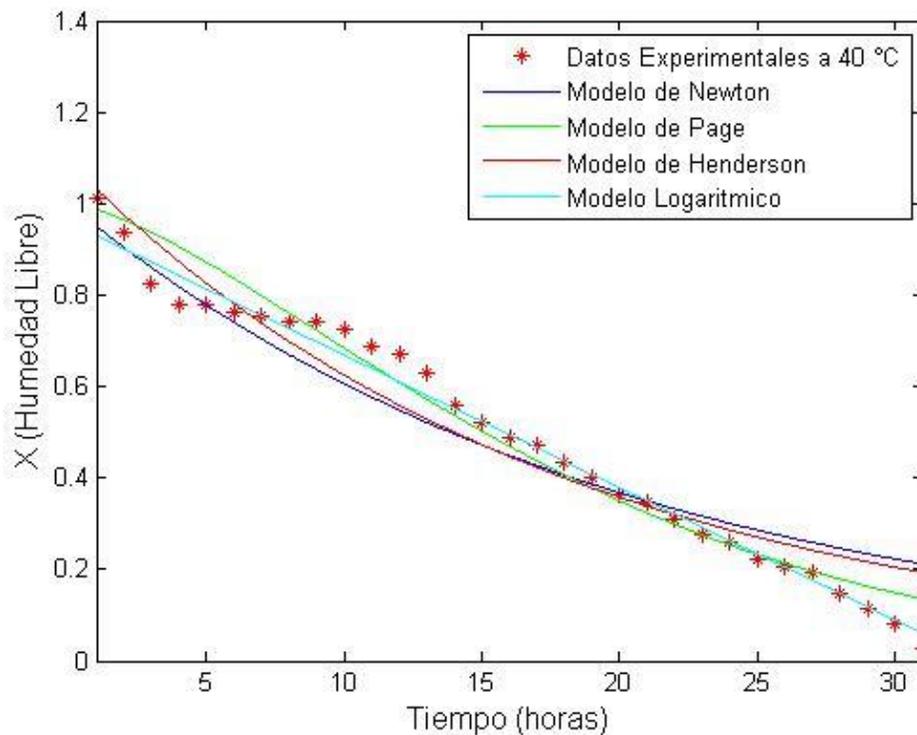
La Tabla 5.2 muestra los diversos modelos de secado, donde X es la razón de humedad o humedad libre, t es el tiempo de secado en horas, k es la constante de secado (h-1) y a, b, c, n, los coeficientes de ajuste.

**Tabla 5.2.** Modelos de Secado, contantes de secado y coeficiente de determinación.

Modelos de Secado		Tratamiento a 40 °C		Tratamiento a 55 °C		Tratamiento a 70 °C	
Modelo	Función	Coeficientes	R <sup>2</sup>	Coeficiente s	R <sup>2</sup>	Coeficiente e	R <sup>2</sup>
Newton	$X_a(t) = \exp(-k \cdot t)$	k=0.05	0.9173	k=0.1349	0.8636	k=0.2154	0.8881
Page	$X_b(t) = \exp(-k \cdot t.^n)$	k=0.01286 n=1.469	0.9633	k=0.0254 n=1.895	0.9835	k=0.05 n=1.886	0.9922
Henderson	$X_c(t) = a \cdot (\exp(-k \cdot t))$	k=0.05571 a=1.092	0.9312	k=0.1825 a=1.301	0.9741	k=0.2975 a=1.437	0.9722
Logarítmico	$X_d(t) = a \cdot (\exp(-k \cdot t)) + c$	k=0.0002521 a=155.3 c=-114.4	0.9854	k=0.0735 a=1.972 c=-0.799	0.9741	k=0.2063 a=1.476 c=-0.1719	0.9910

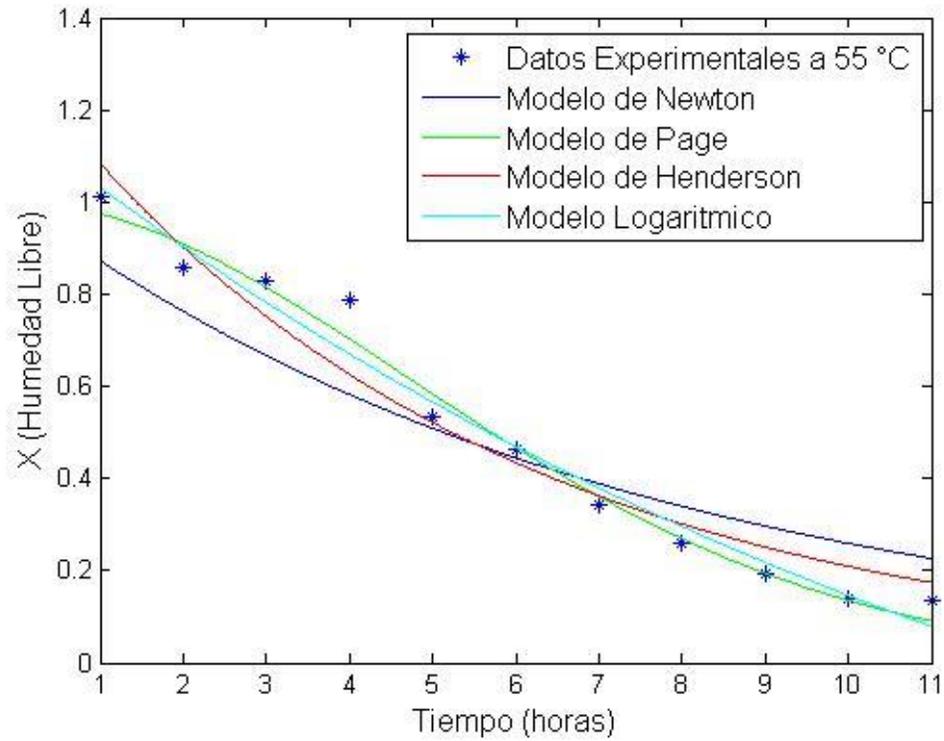
Se utilizó el programa Matlab para estimar las constantes de los modelos, además se graficó el valor experimental de la humedad libre ( $X$ ), esta se determinó para cada hora (Ecuación 4.2), cada valor está representado por un asterisco, de color rojo para el tratamiento a 40°C (Figura 5.7.), de color azul para el tratamiento a 55°C (Figura 5.8.) y de color verde para el tratamiento a 70°C (Figura 5.9.). Las líneas en cada grafica representan los cuatro modelos usados para modelar los datos experimentales (Newton, Page, Henderson y Logarítmico).

Para el tratamiento a 40 °C, todos los modelos describen el proceso de secado con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mayor a 0.91, el modelo logarítmico es el modelo que mejor describe el proceso de secado con un  $R^2$  de 0.98, seguido del modelo de Page con un  $R^2$  de 0.96.



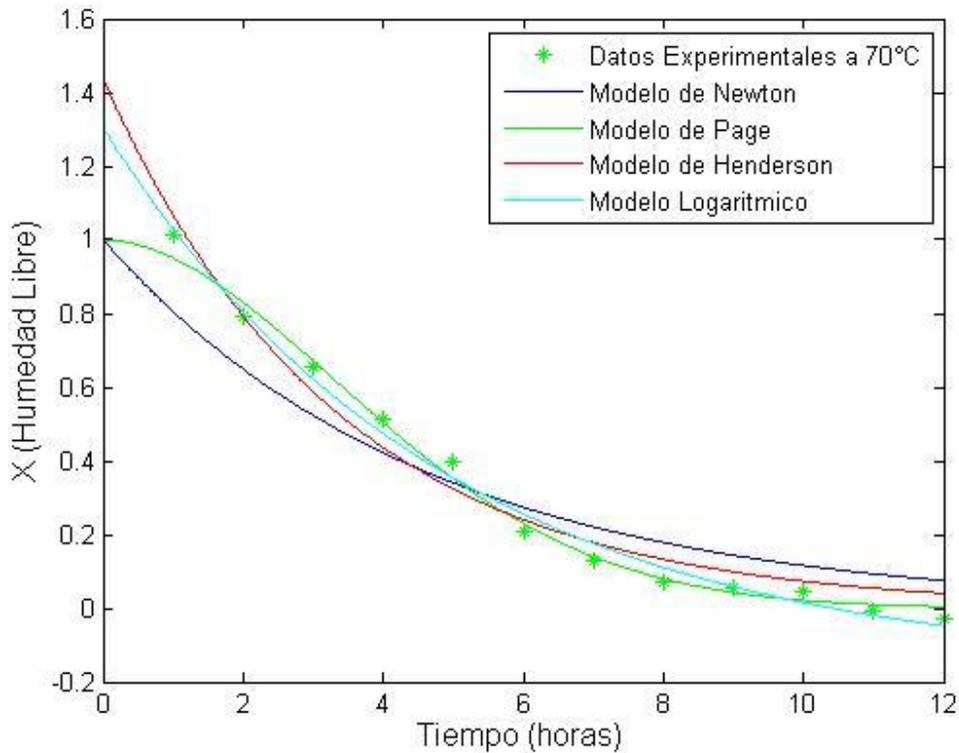
**Figura 5.7.** Modelos usados, para el ajuste de los datos experimentales (Newton, Page, Henderson y Logarítmico), para 40°C.

Para el tratamiento de secado a 55 ° C, el modelo que mejor describe el proceso de secado es el modelo de Page, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.98, seguido del modelo logarítmico y del modelo de Henderson con  $R^2$  de 0.97.



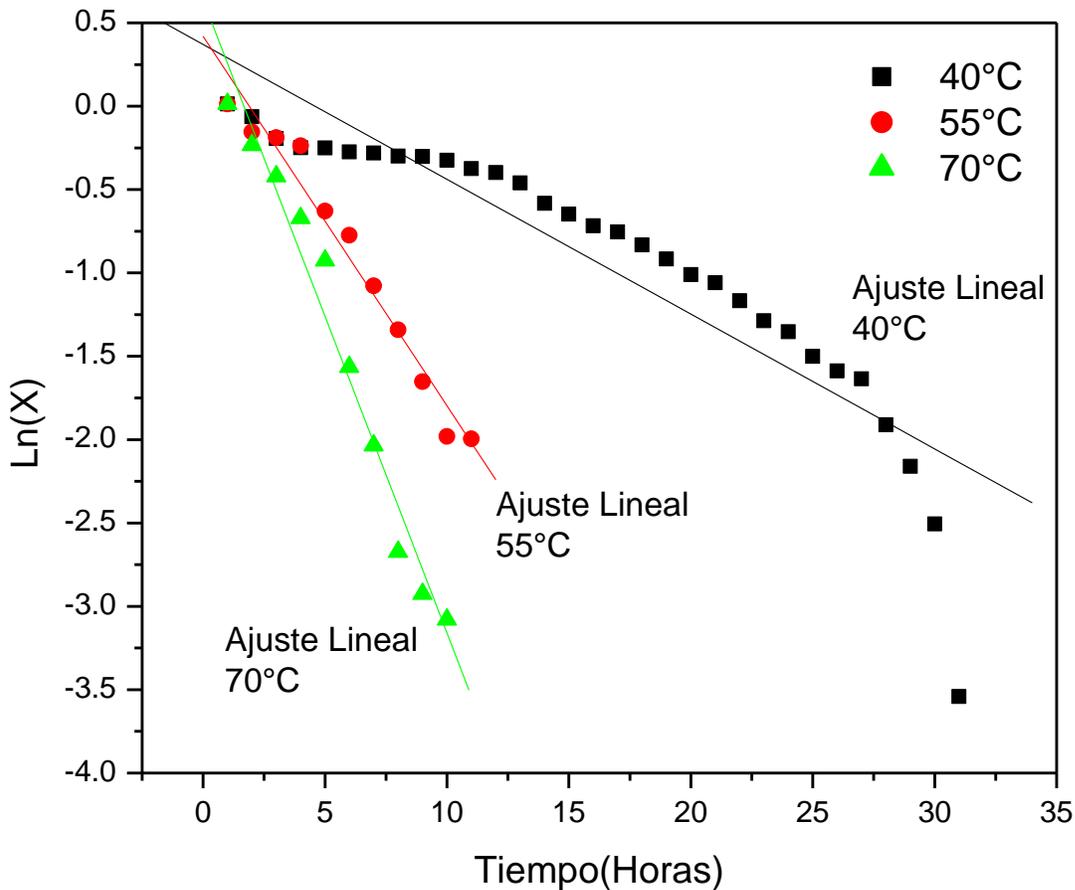
**Figura 5.8.** Modelos usados, para el ajuste de los datos experimentales (Newton, Page, Henderson y Logarítmico), para 55°C.

Para los tratamientos de secado a 70 ° C, el modelo que mejor describe el proceso de secado es el modelo de Page, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) 0.99 para 70 °C, seguido del modelo logarítmico con un  $R^2$  de 0.99. En el Anexo 1. Se presenta una tabla similar a la Tabla 5.1 pero además se agrega en la tabla el valor del error cuadrático medio (RMSE).



**Figura 5.9.** Modelos usados, para el ajuste de los datos experimentales (Newton, Page, Henderson y Logarítmico), para 70°C.

Otro método para comprobar si las ecuaciones de los diversos modelos de secado, se ajusta a los resultados experimentales consiste en representar gráficamente el valor de  $\ln(X)$  frente al tiempo para cada una de las temperaturas tratadas. Tal como puede observarse en la Figura 5.8, los valores obtenidos se ajustan a una línea recta. Este resultado es coherente con la existencia de un mecanismo de difusión de agua en el sólido (Mulet 2002.)



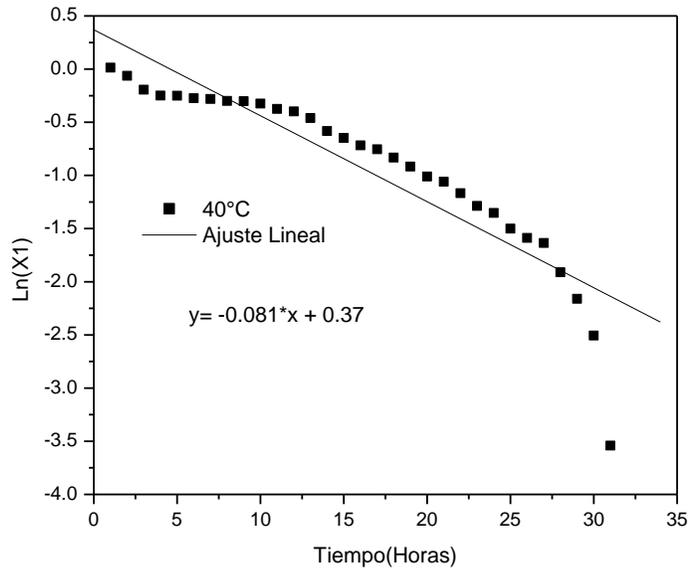
**Figura 5.10.** Correlación logarítmica de la humedad libre para las tres temperaturas tratadas.

$$\ln(X_1) = 0.37 - 0.081 * t \quad (5.15)$$

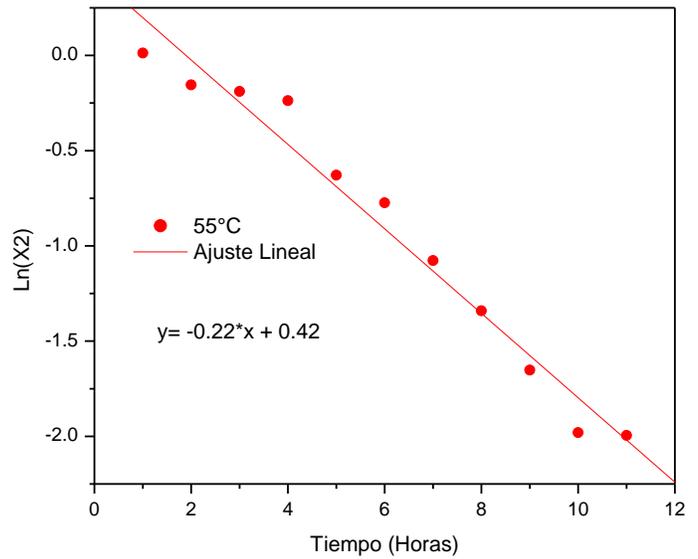
$$\ln(X_2) = 0.42 - 0.22 * t \quad (5.16)$$

$$\ln(X_3) = 0.64 - 0.38 * t \quad (5.17)$$

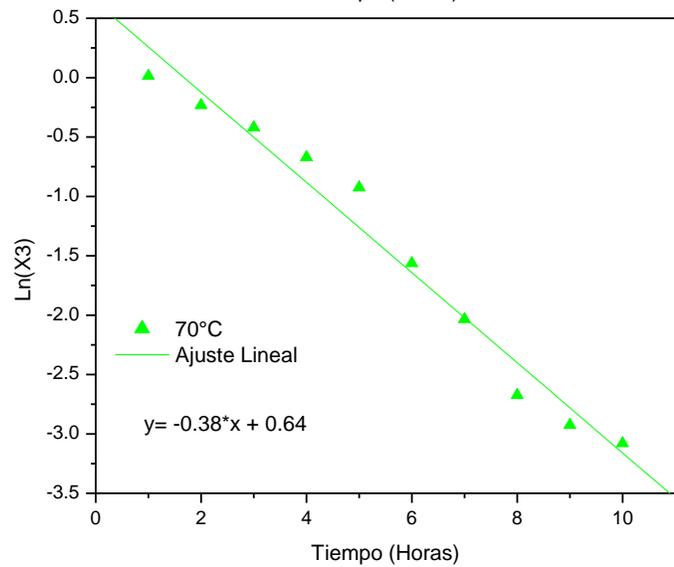
**Figura 5.11.** Correlación logarítmica de la humedad libre para 40 °C.



**Figura 5.12.** Correlación logarítmica de la humedad libre para 55 °C.



**Figura 5.13.** Correlación logarítmica de la humedad libre para 70 °C.



**V.3.2.1. Coeficiente de difusión ( $D_{ef}$ ).**

De la pendiente de estas rectas del  $\ln(X)$  vs  $t$ , cuyo valor se presenta en las ecuaciones (5.15., 5.16. y 5.17.), es posible deducir  $D_{ef}$  para cada temperatura. En la (Figura 5.11 a 5.13) se puede observar el ajuste lineal para cada temperatura, la ecuación lineal que la describe, seguido se presenta la Tabla 5.3 donde se reúnen los valores de los parámetros obtenidos del ajuste, A y B. De estos parámetros se determinan el coeficiente de difusión ( $D_{ef}$ ) mediante la Ecuación 4.19.

**Tabla 5.3.** Valores obtenidos de la correlación logarítmica. Def es calculada a partir de las pendientes.

Temperatura		1/T K <sup>-1</sup>	1000/T	Intercepto(A)	Pendiente(B)	Def
40 °C	313.15 °K	0.003193	3.193358	0.37	-0.081	2.03E-04
55 °C	328.15°K	0.003047	3.047387	0.42	-0.22	5.50E-04
70 °C	343.15°K	0.002914	2.914177	0.64	-0.38	9.50E-04

En la Tabla 5.4, se presentan cuatro modelos, Newton, Page, Henderson y Logarítmico, de los cuales tomamos dos, Newton y Henderson para determina el Coeficiente de Difusión a partir de la ecuación 4.19, se determinó  $D_{ef}$ , mediante los coeficientes obtenidos para cada modelo.

**Tabla 5.4.** Valores de los coeficientes para los modelos de secado, para tres temperaturas.

Modelos de Secado		Tratamiento a 40 °C	Tratamiento a 55 °C	Tratamiento a 70 °C
Modelo	Función	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes
Newton	$Xa(t) = \exp(-k*t)$	k=0.05	k=0.1349	k=0.2154
Henderson	$Xc(t) = a*(\exp(-k*t))$	k=0.05571 a=1.092	k=0.1825 a=1.301	k=0.2975 a=1.437

## CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

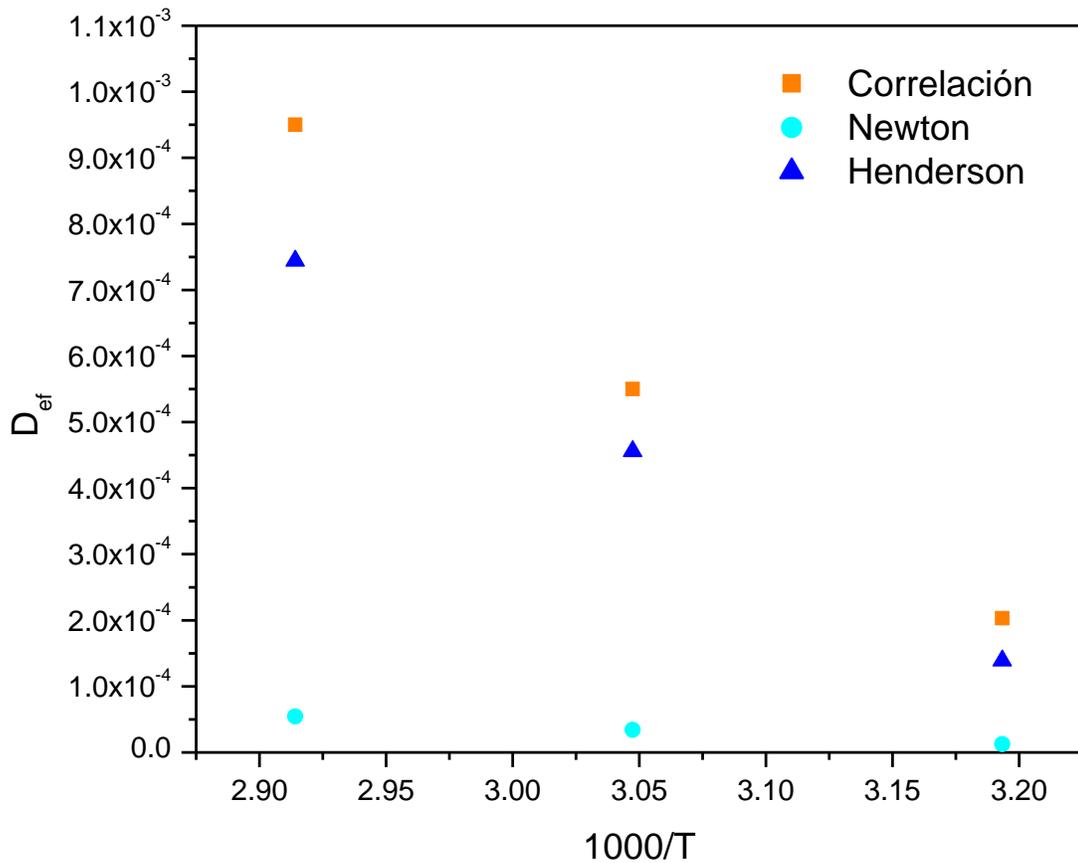
A continuación se presenta una tabla donde se concentran los valores para el coeficiente de difusión obtenido por tres métodos, a través de la correlación logarítmica de los datos experimentales, y mediante los coeficientes obtenidos de los modelos de Newton y de Henderson. Como puede ser observado los valores del coeficiente de difusión del modelo de Henderson y los valores del coeficiente de difusión obtenidos mediante la correlación logarítmica, para las tres temperaturas tratadas son parecidos (Figura 5.14). El coeficiente de difusión para leche entera en espuma a diversas temperaturas se presenta en la tabla 5.5, es la única referencia del valor del coeficiente de difusión, no existe en la actualidad algún valor reportado en la literatura para el coeficiente de difusión (Def) de algún tipo de queso.

**Tabla 5.5.** Coeficientes de Difusión obtenidos para cada modelo.

Temp °C	Def		
	Ln(X)	Newton	Henderson
40	2.03E-04	12.665 E-04	1.39E-04
55	5.50E-04	34.170 E.04	4.56E-04
70	9.50E-04	54.561 E-04	7.44E-04

**Tabla 5.6.** Coeficientes de difusión para leche en espuma. Barbosa (2010)

Temperatura °C	Coeficiente de Difusión
50	$2.0 \times 10^{-9}$
40	$1.4 \times 10^{-9}$
35	$8.5 \times 10^{-10}$



**Figura 5.14.** Coeficiente de Difusión, obtenido experimentalmente y a partir de los Modelos de Newton y Henderson.

### V.3.2.2. Energía de activación (E<sub>a</sub>).

La dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura, se describe por la ecuación de Arrhenius (Ecuación 4.20). La energía de activación se determinó al representar  $\ln(D_{ef})$  frente a  $1/T$ . (Okos et al. 1992), con los valores de la Tabla 5.5, se construyó la gráfica de la Figura 5.15, en esta se presentan el  $\ln(D_{ef})$  para cada modelo. Mediante la regresión lineal de la Ecuación 4.20, considerando la Ecuación 4.23 de la pendiente e intercepto de las ecuaciones 5.18 a 5.20, se calculó la energía de activación (E<sub>a</sub>).

La energía de activación (E<sub>a</sub>) determinada mediante la correlación de la humedad libre y mediante los coeficientes de dos modelos, Henderson y Newton varía en un rango de 43.7 y 50.17 KJ/mol para el queso fresco chiapaneco.

**Tabla 5.7.** Correlación Logarítmica para Coeficiente de Difusión.

Temp °C	Ln(Def)			
	1000/T	Ln(X)	Newton	Henderson
40	3.193357816	2.03E-04	12.665 E-04	1.39E-04
55	3.047386866	5.50E-04	34.170 E.04	4.56E-04
70	2.914177473	9.50E-04	54.561 E-04	7.44E-04

**Tabla 5.8.** Energía de activación y factor de Arrhenius para cada modelo.

Modelos	Pendiente	Intercepto	Do= exp (A)	Ea=B*R
	B	A	Do	Ea
Correlación	-5.5575	9.303	10970.88254	46.205055
Newton	-6.0345	10.49	35954.15739	50.170833
Henderson	-5.2563	5.5812	265.3898826	43.7008782

Ajuste lineal Correlación

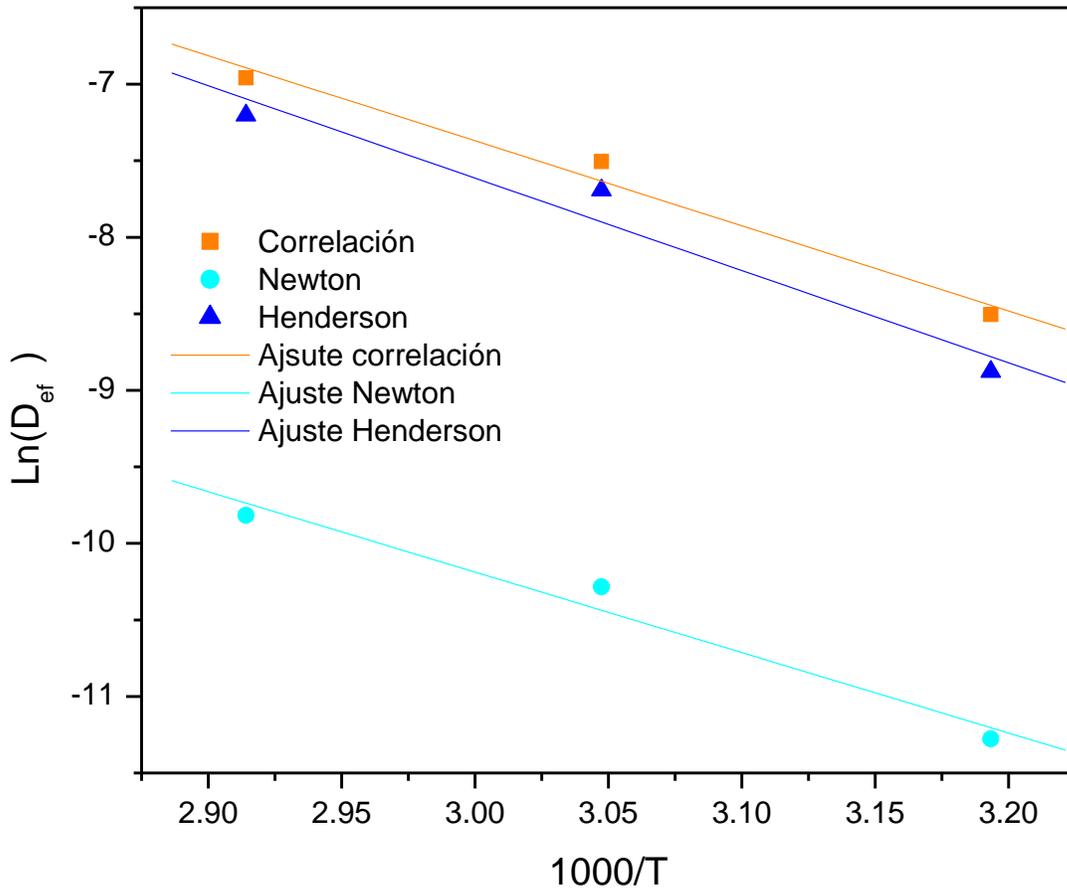
$$y1 = -5.5575x + 9.303 \tag{5.18}$$

Ajuste lineal Newton.

$$y2 = -5.2563x + 5.5812 \tag{5.19}$$

Ajuste lineal Henderson.

$$y3 = -6.0345x + 10.49 \tag{5.20}$$



**Figura 5.15.** Correlación logarítmica de Def, para cada modelo, ajuste lineal para determinar Ea y Do.

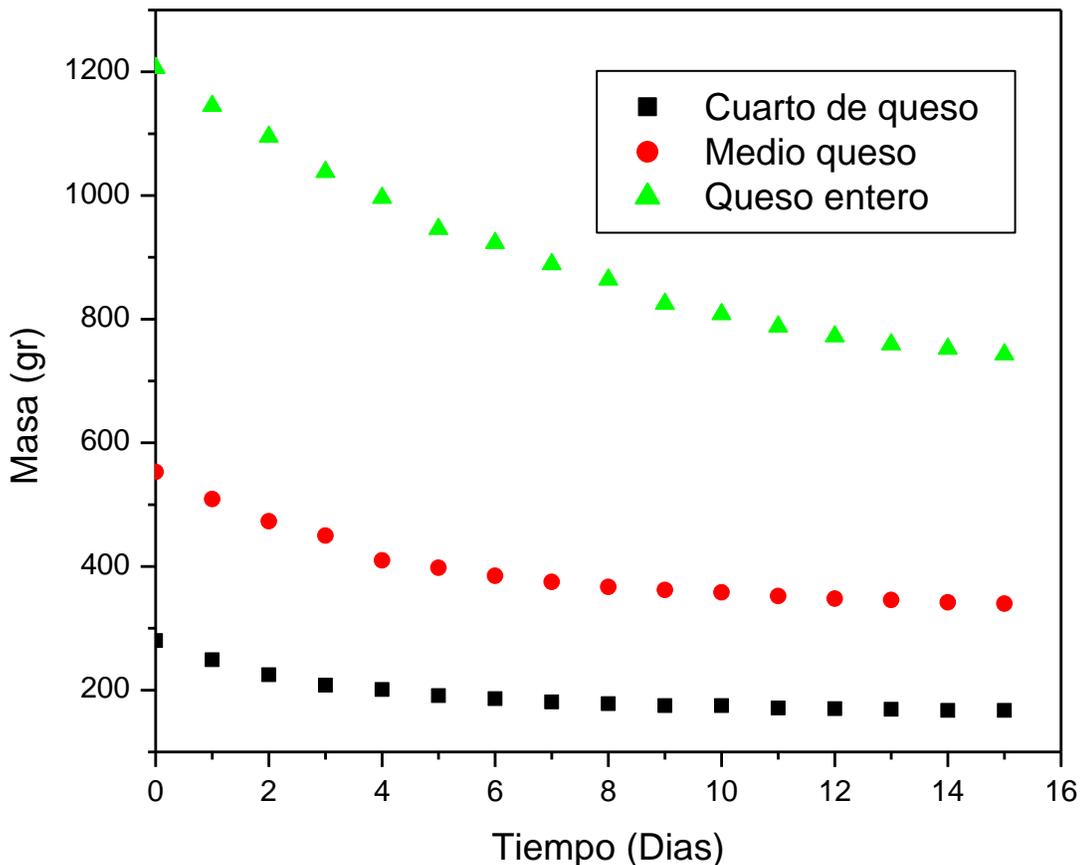
**Tabla 5.9.** Comparación del Coeficiente de Difusión y energía de activación para diversos productos.

Mulet -Zanahoria		Montes-Ñame		Ocampo-Mango		Hernández-Queso	
Tem °C	Def	Tem °C	Def	Tem °C	Def	Tem °C	Def
50	1.69E-05	45	2.67E-06	55	9.31E-06	40 °C	2.03E-04
60	2.38E-05	55	3.91E-06	60	1.18E-05	55 °C	5.50E-04
70	3.33E-05	70	4.91E-06	65	1.54E-05	70 °C	9.50E-04
Ea (KJ/mol)	Do (m2/s)	Ea (KJ/mol)	Do (m2/s)	Ea (KJ/mol)	Do (m2/s)	Ea (KJ/mol)	Do (m2/s)
1.31	x	21.49	9.55E-03	46,459	231.86	46.205055	10970.88254

De la Tabla 5.8 podemos observar que el coeficiente de difusión ( $D_{ef}$ ) para el queso fresco chiapaneco toma valores de  $2.03 \times 10^{-4}$ ,  $5.5 \times 10^{-4}$  y  $9.5 \times 10^{-4}$ , para 40, 55 y 70 °C respectivamente, este aumenta con la temperatura, hecho que concuerda con lo reportado por Montes (2008) y Ocampo (2006). La energía de activación ( $E_a$ ) calculada fue de 46.2 KJ/mol, es similar a valores obtenidos para otros alimentos, 21 KJ/mol para ñame, Montes (2008) y 46.20 KJ/mol para el secado de Mango, Ocampo (2006).

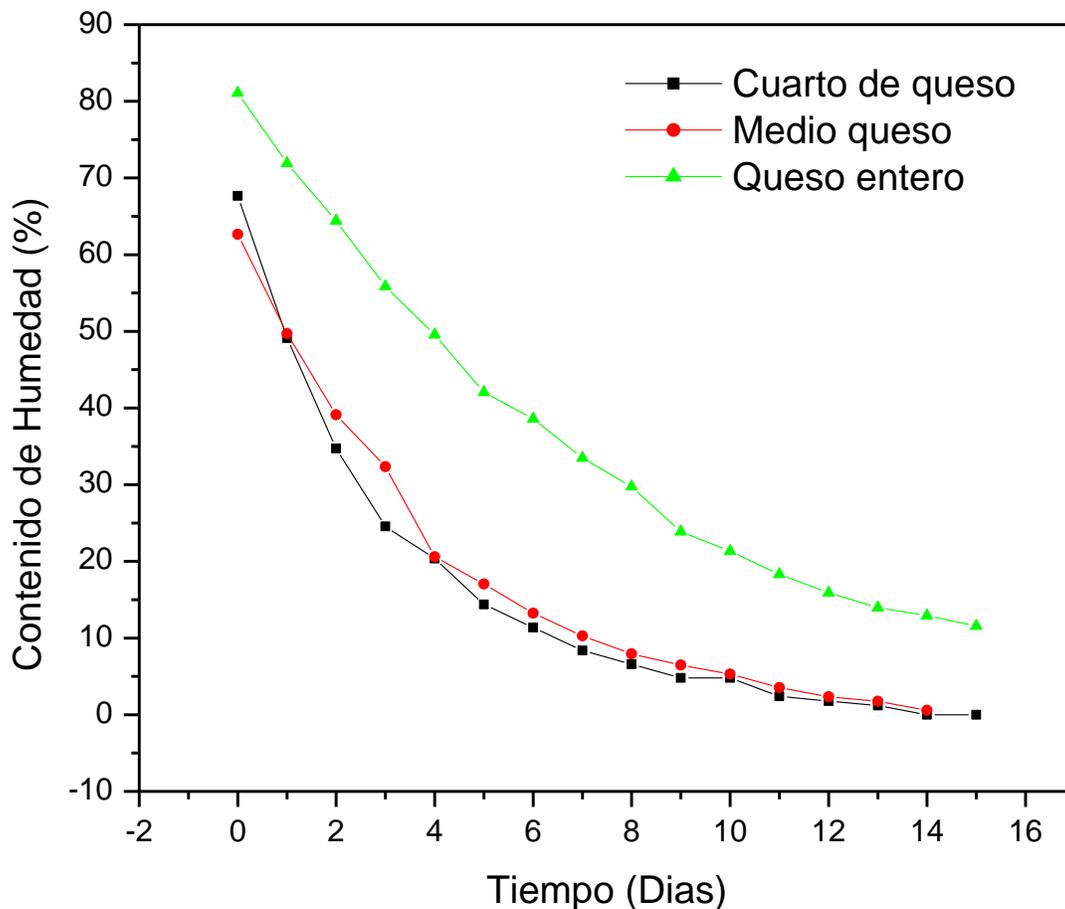
### V.3.3. Cinética de secado solar de queso fresco chiapaneco.

A continuación se presenta la gráfica de pérdida de masa para las muestras de queso, un cuarto, medio y un queso entero (Figura 5.16.).



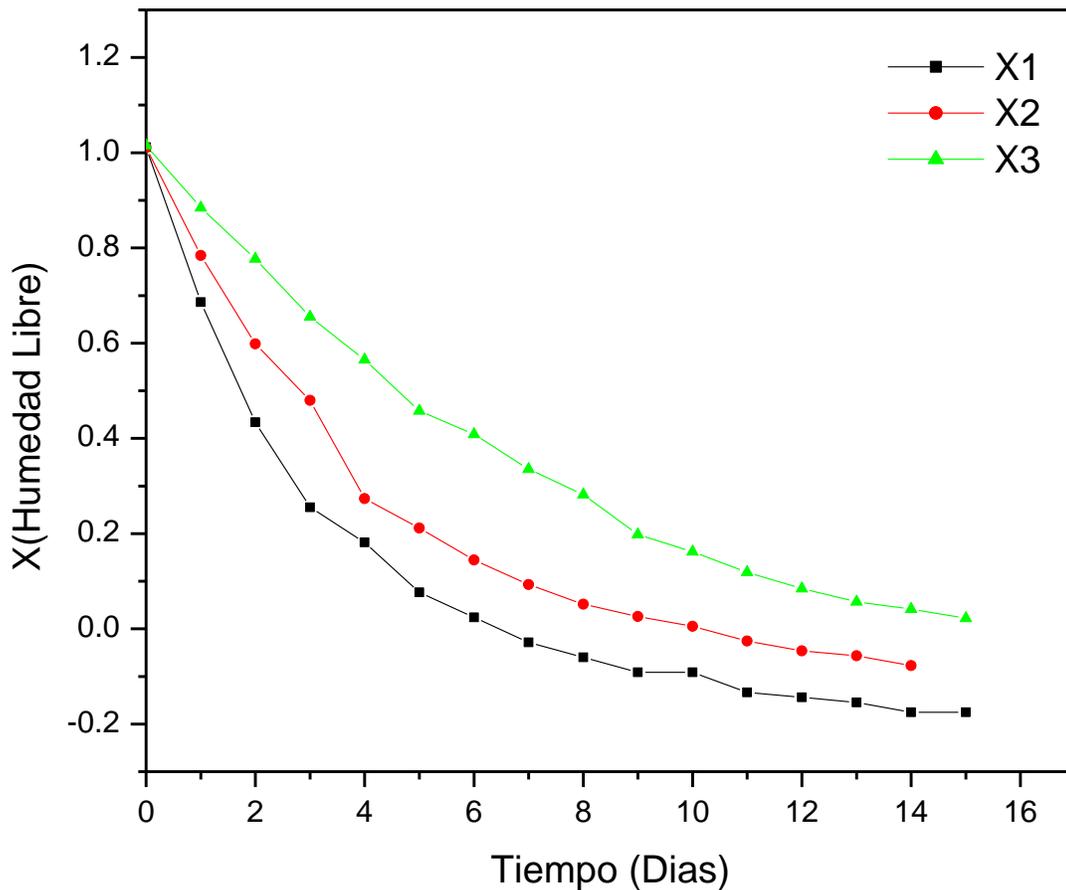
**Figura 5.16.** Variación de la masa de las muestras de queso deshidratadas solarmente para diferentes tamaños.

Como se puede observar para el queso entero el contenido de humedad de este es mayor al contenido de humedad que para las muestras de un cuarto y medio queso, esto se debe a que las muestras de queso al ser pequeñas aumentan el área de transferencia de calor comparada con el área del queso entero y permiten que la energía penetre hacia su interior de una manera uniforme, por lo tanto permite una deshidratación más rápida. Además resulta ser práctico, pues durante el secado de la muestra de queso entero, si no se le da vuelta constantemente, esta puede llegar a fracturarse. Secar muestras de queso pequeñas permite reducir el trabajo necesario para voltear las muestras diariamente además de reducir el tiempo de secado.



**Figura 5.17.** Variación del contenido de humedad de las muestras de queso deshidratadas solarmente para diferentes tamaños.

A continuación se presenta la curva de rapidez de secado solar (Figura 5.18.), en esta se aprecia que a medida del tamaño de la muestra aumenta, aumenta el tiempo de secado solar de queso. La humedad libre determinada para la muestra de queso de un cuarto corresponde a X1, mientras que para la muestra de medio queso corresponde a X2, y finalmente para la muestra de queso entero la humedad libre corresponde a X3.



**Figura 5.18.** Curva de Rapidez de Secado Solar para diferentes tamaños de muestra.

### **V.4. Experiencia de secado solar de queso fresco en la comunidad UNESCO.**

Los quesos destinados para ser deshidratados solarmente, difieren solamente en dos cosas de los quesos destinados para la venta de quesos frescos, en el proceso de su producción, La cuajada se prensa más, y en el momento de amasarla se le agrega más sal. Para producir el queso seco la cuajada es prensada durante más tiempo, para retirar la mayor cantidad de suero posible, la cuajada se amasa seca, y en el llenado de los moldes, tiene que ir con mayor densidad o más compacto. Después de sacar los quesos que son para secar del molde, son metidos inmediatamente al secador solar. Los quesos fácilmente tienden a cuartearse, es necesario manejarlos con mucho cuidado en el momento de voltearlos, e incluso aprovechar el propio peso del queso para resanar las cuarteaduras, al rotar la cara que es expuesta a la malla. En los meses de abril y mayo cuando hace más calor en la comunidad, el tiempo que toma deshidratar los quesos es de 9 a 10 días considerando carga mínima, durante los meses de junio a octubre las condiciones que se presentan son de nublados parciales durante el día, bajo estas condiciones, el tiempo de secado de quesos es de 15 días. Según los productores en el mes de noviembre y diciembre es cuando existe la máxima precipitación, y es necesario saber cómo afecta al proceso de sacado.

Durante la visita para realizar las mediciones de los parámetros de operación del secador solar, en la comunidad no estuvo lloviendo, pero si hubieron nublados parciales todos los días y lluvias ligeras por las noches. Los productores no deshidratan quesos cuanto llueve pero bajo nublados parciales característicos de la región, el equipo si resuelve la problemática de secar solarmente el queso fresco.

Los quesos con cuatro días en el secador ya lucen secos en su superficie, un queso deshidratado 7 días representa un queso oreado o parcialmente seco, apto para una deshidratación más lenta en la que el queso se madurara. Los productores manifestaron que los quesos secados solarmente no diferían en el sabor del queso

secado tradicionalmente, y que además el proceso de secado era sumamente rápido.

En 2009 los productores, afrontaron una situación difícil, porque tuvieron que conseguir otro cliente, pues tenía solo uno, pero este dejó de comprarles queso. El problema de encontrar un mercado puede ser atribuible a que producían pocos quesos frescos y secos. El no tener un cliente seguro limita la capacidad de la producción de queso, la alternativa más viable es que el productor incremente su producción de queso gradualmente y busque clientes seguros.

En 2010 los productores producía 56 quesos frescos la semana de los cuales, 20 se destinaban al secado. Pruebas de secado en la comunidad demostraron, la reducción en el tiempo de secado de 10 a 15 días para carga baja.

En 2012 los productores producían 100 quesos frescos a la semana de los cuales, 40 se destinaban al secado solar. El tiempo de secado para carga completa varía entre 20 a 40 días para carga alta. En la Figura 5.19. se observa la bandeja con 18 quesos al máximo de la capacidad por bandeja.

Actualmente mente aumentaron su producción de quesos tanto de frescos como de quesos secos, los productores llegan a almacenar en gabinetes de maduración hasta 300 quesos secos y en recientes fechas lotes de 1000 quesos secos (Figura 5.20. y 5.21.).



(a)



(b)

**Figura 5.19.** (a) Quesos frescos dentro de la cámara de secado, (b) Queso deshidratado solarmente, quesos enteros, cuartos de queso y octavos de queso.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.20.** Quesos deshidratados solarmente (a), maduración de 300 (b) y 1000 quesos deshidratados mediante el secador solar instalado en la comunidad UNESCO (c).

### **V.5. Descripción de la quesería como proyecto productivo.**

Este proyecto de una quesería a pequeña escala es operado por una familia, de procedencia indígena del municipio de Bochil, llevan más de 23 años viviendo en la comunidad de UNESCO. Los habitantes de la comunidad, casi no consumen queso seco, prefieren el queso fresco, pero si consideran importante secar quesos para venderlos en otros lugares, y hacer negocio a partir de la venta de quesos secos.

La estrategia consiste en comprar leche, en los meses cuando su precio cae y elaborar quesos para deshidratarlos solarmente, aunque no vendan todo el queso fresco tiene la posibilidad de conservarlo a través del secado solar.

Los productores afirman que el secador ha funcionado bien y recomienda su uso. Otro beneficio observado por ellos es que el secador solar le proporciona mayor higiene a los quesos durante el proceso de sacado, lo cual le da una mayor calidad, pues evita la formación de moho, en la superficie del queso, además evita que insectos entren en contacto los quesos para deshidratar, así mismo el proceso de secado se simplifica y el tiempo se reduce considerablemente.

Los productores han recibido asesoría por parte de la Fundación Kolping, para impulsar el proyecto productivo de una quesería a una mayor escala de la actual, el que ellos ya tengan un equipo para secar quesos, representa una gran ventaja para el proyecto. Los productores esperan obtener recursos, si el proyecto es aprobado, los productores crecerán en el negocio de la quesería, a un mayor nivel con un aumento en la producción de quesos tanto frescos como secos, la construcción de instalaciones adecuadas para el proceso de producción, y compra de equipo.

En Cintalapa y en específico en la región de la comunidad pocas personas saben hacer el queso fresco y en esta época del año la leche es muy barata por la sobreproducción de esta, pudiendo producir grandes lotes de quesos secos.

### **V.6. Observaciones y recomendaciones para la optimización del secador solar para queso crema chiapaneco.**

Debido a que el secador solar fue instalado en una comunidad, este fue construido para ser desarmable, presentándose buenos resultados para su transporte, además este pudo ser desarmado, para ser transportado a otra comunidad, de no presentar la característica de ser desarmable transportarlo no hubiese sido posible debido a su gran peso.

Los materiales usados para el esqueleto del secador resultaron cumplir con la durabilidad de la estructura de soporte, recomendando mantenimiento de la estructura cada año mediante la aplicación de pintura para evitar la oxidación. Las placas usadas para el secador solar, también fueron durables, pero se presentaron problemas en la placa del fondo del secador, debido a que los quesos al ser deshidratados pierden suero, con una enorme cantidad de sal, ácido, altamente corrosivo, repercutiendo en la pintura de la placa, que se levantó, aconsejándose, recubrir con láminas de acero inoxidable adicioneles a la placa en el fondo para evitar oxidación y deterioro.

Por su parte las bandejas usadas, en un principio, no fueron duraderas debido a que el suero de los quesos, oxidó y deterioro la malla, también el peso de los bloques de queso hizo que la malla se desprendiera de la bandeja, se aconseja colocar bandejas de aluminio o acero inoxidable.

Los materiales de los rieles de las bandejas, resultaron no ser adecuados para el interior de la cámara, ya que presentaron oxidación y deterioro, es aconsejable en un futuro para secadores solares de queso fresco usar aluminio para los rieles, además de incluir en la estructura del secador un sistema de mangueras y desagüe para lavar el secador después de cada tanda de secado.

## **VI. CONCLUSIONES.**

### **VI.1. Introducción.**

Para la conclusión de este trabajo se presenta una conclusión por cada objetivo específico. Implementación del secador solar, evaluación del secador solar, las pruebas de secado controlado así como los resultados del modelado del proceso de secado, también se presentan las pruebas de secado solar.

### **VI.2. Implementación del secador solar en la comunidad de estudio.**

Un secador solar de gabinete con circulación forzada para la deshidratación de queso fresco chiapaneco, fue desarrollado e instalado exitosamente. El secador tiene la capacidad de secar de 54 quesos por tanda de secado, en un tiempo de 20 a 40 días, dependiendo las condiciones climáticas y la estación del año.

El Secador Solar tiene un área de secado de 8 m<sup>2</sup>, la fuente primaria de calentamiento del aire para el proceso de secado, es un calentador solar de aire en la parte superior de la cámara de secador con un área de captación de 6 m<sup>2</sup>, El equipo presenta la ventaja de ser un secador desarmable con lo que facilita su transporte, este se trasladó desde Tuxtla Gtz. hasta la comunidad UNESCO y se instaló en la vivienda de uno de los productores de queso fresco chiapaneco.

Las condiciones ambientales actuales restringen el empleo de procesos que conlleven a un gasto considerable de energía, tal es el caso de la deshidratación artificial a través de estufas eléctricas y secadores a gas. Mediante el secador solar instalado en la comunidad la energía radiante del sol, es transformada en energía térmica, proporcionando la energía necesaria para elevar la temperatura del aire y del producto y evaporar la humedad contenida en este, permitiendo alcanzar las condiciones de secado necesarias, para la deshidratación solar del queso fresco.

Está claro que la rentabilidad de los proyectos orientados a generar este tipo de energía solo se consigue a largo plazo y con incentivos de parte de organizaciones civiles y gubernamentales, que permiten implementar estas tecnologías para mejorar los procesos de producción. La sustentabilidad energética del proceso de secado de queso fresco mediante el uso de energías renovables le da un valor agregado al producto final, el queso seco.

### **VI.3. Evaluación el secador solar.**

La temperatura fue medida en diversos puntos del secador solar, se puede observar que la temperatura alcanzada dentro del secador solar dependen directamente de la cantidad de radiación solar incidente en el secador, dentro de la cámara de secado se alcanzaron temperaturas entre los 20 y 47 °C, la humedad relativa varia en un rango de humedad del 10 al 85 %, dentro de la cámara del secador solar la humedad es menor que la humedad presente en el ambiente, durante las horas de mayor radiación la humedad relativa toma valores mínimos y la temperatura valores máximos.

Se presenta un periodo de días soleados importante en el año aumentando la velocidad del proceso de secado solar de queso fresco chiapaneco en contraste en el tiempo de lluvias el tiempo de secado aumenta en un 30 a 40 %.

### **VI.4. Pruebas de secado controlado de queso fresco chiapaneco.**

Para deshidratar el queso fresco, se redujo el contenido de humedad inicial de las muestras de un 45 % a un 15% de contenido final de humedad, para esto fueron necesarias 31 horas para el tratamiento a 40 °C, mientras que para 55 y 70 °C fueron necesaria 18 y 13 horas respectivamente.

La cinética de secado de queso fresco depende de la temperatura del aire de secado, temperaturas bajas conllevan a tiempos prolongados de secado

produciéndose rancidez en las muestras. Temperaturas elevadas redujeron drásticamente el tiempo de secado de las muestras pero se perdió el aroma del queso y se produjo oscurecimiento, a 55 °C se obtuvieron mejores resultados para el solar del queso fresco chiapaneco.

El proceso cinético del secado de queso fresco chiapaneco puede ser modelado a partir de dos modelos. Para 40 °C, el modelo logarítmico él es que mejor describe el proceso. A 55°C y 70 °C el modelo que mejor describe el proceso cinético es el modelo de page. Las curvas de secado permitieron identificar que el proceso de secado ocurre en el periodo de velocidad decreciente.

El coeficiente de difusión ( $D_{ef}$ ) para el queso fresco chiapaneco toma valores de  $2.03 \times 10^{-4}$ ,  $5.5 \times 10^{-4}$  y  $9.5 \times 10^{-4}$ , para 40, 55 y 70 °C respectivamente, este aumenta con la temperatura, La energía de activación ( $E_a$ ) calculada fue de 46.2 KJ/mol, la cual es similar a valores obtenidos para otros alimentos.

### **VI.5. Pruebas de secado solar de queso fresco chiapaneco.**

Para deshidratar las muestras de queso de  $\frac{1}{4}$  fueron necesarios 6 días, mientras que para la muestra de  $\frac{1}{2}$  de queso fueron necesarios 10 días, finalmente para las muestra de un queso entero fueron necesarios 16 días. Se recomienda deshidratar el queso en cuartos y medios quesos para reducir el tiempo de secado. Los quesos para deshidratar solarmente se prensan más para retirar el mayor suero posible también se le agrega más sal.

El secador solar es una oportunidad para conservar quesos en el tiempo de abundancia de leche y caída de su precio, y representa una ventaja económica para los productores, permitiéndoles almacenar en gabinetes para su maduración, lotes de 300 a 1000 quesos secos.

## VII. TRABAJOS FUTUROS.

### VII.1. Secado solar de queso fresco chiapaneco.

Es de suma importancia para establecer la calidad del queso deshidratado, el análisis de la calidad del queso fresco antes y después del secado solar y secado controlado. Este debe ser procesado dentro de los estándares establecidos, para lo cual se requiere el desarrollo de técnicas adecuadas de manufactura y deshidratación, del queso. La calidad de producto se medirá por la forma en que sus características cumplen primero con las disposiciones legales de sanidad, composición y control sanitario. Y segundo con el gusto y con la aceptación del consumidor, control del producto. Para el control de calidad el queso debe cumplir con las disposiciones presentes en la norma NOM- 121-SSA1-1994 ESPECIFICACIONES SANITARIAS PARA QUESOS FRESCOS, MADURADOS Y PROCESADOS. A continuación se presentan los análisis necesarios para el control de la calidad del queso fresco.

#### A.I. Control sanitario.

El control sanitario comprende un análisis microbiológicos para determinar el contenido o la presencia de coliformes fecales, *Staphylococcus aureus*, hongos y levaduras, y salmonella.

#### B.II. Control del producto.

Para el control del producto se proponen hacer análisis bromatológico, análisis fisicoquímico y análisis sensorial, a una muestra del queso de la población de muestras, que serán sometidas a los diversos tratamientos de secado.

Análisis bromatológico. Para este se determinarán los parámetros iniciales de la muestra, la humedad, pH, Acidez titulable y minerales.

Análisis fisicoquímico. Para este se realizaran las pruebas de; extracción de la grasa del queso, determinación del contenido de materia grasa, determinación de proteína.

Análisis sensorial. Para este se realizaron pruebas organolépticas para determinar la consistencia, el aroma, el sabor y el color del queso. En el anexo 2 se presenta una hoja para la prueba sensorial del queso seco deshidratado solarmente.

Otro aspecto a considerar es una posible pasteurización del queso seco por el tratamiento térmico al que se somete el producto con la deshidratación solar. Se recomienda realizar análisis microbiológicos del queso fresco y del queso deshidratado solarmente para corroborar esa hipótesis.

Un punto más a estudiar en un futuro para el queso deshidratado, consiste en determinar la caducidad del producto, conservar en bolsas herméticas el producto por ciertos periodos y observar el momento en que el producto presente un cambio en sus características, además de determinar el empaque más óptimo para conservar el producto.

### **VII.2. Secador Solar.**

Saravia y Sánchez (2007), proponen un método de diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto como información disponible para las consideraciones de diseño. Se propone determinar los parámetros del modelo propuesto por Saravia *et al*, coeficiente de difusión ( $h_d$ ) y coeficiente de convección ( $h_c$ ).

Las experiencias adquiridas técnicamente en la construcción del equipo, y en el uso de los materiales del primer prototipo, harán posible llegar al diseño de un secador solar para queso fresco que cumpla con las especificaciones de los parámetros de operación necesarios para el óptimo secado de queso, en una etapa posterior al trabajo de esta tesis. Diseñado en todos sus principios para el secado solar de queso fresco, aunque este modelo final no se construya por el momento. Para finalmente

obtener el diseño para tres secadores solares de queso fresco, para 50 quesos por tanda, un secador solar Semi industrial para 250 quesos por tanda y un secador solar industrial para 1000 quesos por tanda de secado.

También sería considerable implementar en los secadores semi-industrial e industrial antes mencionados, sistemas auxiliares de calentamiento compuestos de un radiador o intercambiador en la cámara de secado, un calentador solar de agua de tubos al vacío y un tanque de almacenamiento de agua aislado térmicamente, además de calentadores solares de aire externos a la cámara de secado, garantizando mantener una temperatura constante dentro del secador solar día y noche, lo que permitiría reducir el tiempo de secado.

A su vez se reconoce la importancia de trabajar en la automatización y control del secador solar, mediante un sistema de control, que pueda determinar y registrar las condiciones de operación del secador solar in situ y que este proceso permita optimizar continuamente el equipo de secado y el proceso de solar de queso fresco chiapaneco.

### **VII.3. Comunidad UNESCO.**

Es necesario basarse en la metodología propuesta por FIRCO y realizar una evaluación social del proyecto de secado solar de queso fresco chiapaneco.

Una evaluación social (ES), mide el impacto social durante la vida del proyecto, para determinar de qué manera se producen los cambios, es decir los impactos positivos y negativos. FIRCO desarrollo una metodología basada en la evaluación de ciertos indicadores esta es usada para evaluar agronegociós que implementaron energías renovables en sus procesos productivos, La ES caracteriza la situación socioeconómica y cultura de la muestra de agro negocio, el grado de organización, el acceso a créditos externos (Sector privado, Fundaciones de ONGs y subsidios de programas gubernamentales) el contexto socioeconómico de los trabajadores y la

movilidad laboral. Los indicadores elegidos para los proyectos evaluados (directos e indirectos), permiten medir el impacto social, esto se valida en visitas de campo al agronegoció.

También se propone un trabajo conjunto con la comunidad para el registro documental del secado solar de queso fresco chiapaneco, además de una constante capacitación a los productores en temas relacionados al secado solar además de inocuidad en la producción de queso.

Finalmente se deja plantada una hipótesis en este trabajo de tesis, Además de terminar o proponer los parámetros o indicadores necesarios para probar esa hipótesis, en un trabajo futuro.

*Es posible alcanzar el desarrollo energético sustentable de la comunidad UNESCO, al impulsar el acceso a las tecnologías renovables para generar energía de autoconsumo, de manera limpia y a la vez estimular el desarrollo económico, al dar valor agregado a la producción primaria mediante la conservación de productos alimenticios a través del secado solar además de otras tecnologías renovables y uso sustentable y eficiente de la energía.*

## VIII. LITERATURA CITADA.

1. Hernández Montes A., Villegas de Gante A., Calvo Arriaga A., Leon Velasco H. (2010) El Queso Crema de Chiapas: exploración de su aceptabilidad rumbo a lá obtención de una marca colectiva. Revista Claridades Agropecuarias. No. 203. Pág. 29.
2. Ortiz Herrera M.R., Culebro P.M. y Jimenez R.L.A. (2010) “Reseña Histórica y caracterización del sistema Leche-Queso Crema Chapas. Grupo de Asesores Multidisciplinarios (GAM). Tuxtla Gutierrez Chiapas.
3. Villegas de Gante A., Santos Moreno A., Hernandez Montes A. (2009). Los Quesos Mexicanos Genuinos: Contribución a su rescate a través de la vinculación Universidad-Productores. Claridades Agropecuarias. No. 191. Pag. 30
4. Villegas de Gante A., Santos Moreno A., Hernandez Montes A. (2009). El queso crema de Chiapas: Um acercamiento a su caracterización. Claridades Agropecuarias. No. 206 Pag. 33-34.
5. Culebro Perez M., Jimenez Rincón L., Ortiz Herrera M., Esponda Hernandez W., Leon Velasco H. (2011). El queso crema Chiapas una historia que nos identifica. Claridades Agropecuarias. No. 215. Pag. 35
6. Santos Moreno A. 2006. Elaboración a pequeña escala de quesos mexicanos con leche pasteurizada. Primer Simposium de lácteos. Chihuahua.
7. Berrones Hernandez R., Saldaña Trinidad S., Pantoja Enríquez J., Grajales Bonifas M., Interiano Grajales O., Pérez Pérez K., Silvano López P., Solís Candelaria A. (2010). Estudio del proceso de deshidratación del queso fresco chiapaneco mediante un secado solar de convección natural. Clave. 119850. V Congreso Internacional de Ingeniería Bioquímica.

8. Berrones-Hernandez R., Saldaña-Trinidad S., Grajales M.C., Interiano O., Perez K., Pantoja J., Mojica E. (2009). Estudio del proceso de deshidratación de queso fresco chiapaneco mediante un secador solar de convección natural. XXXIII Semana Nacional de la Energía Solar, Guadalajara Jalisco, México. Pag. 739-742.
9. Montes E., Torres R., Andrade R., Pérez O., Marimon J., Mesa I. et al (2008) Modelado de la cinética de ñame (*discordea rotundata*) en capa delgada. Ingeniería e investigación Vol. 28 No. 2 Agosto del 2008. Pág. 46.
10. Giraldo-Zuniga A., Arévalo-Pinedo A., Silva A., Valdés-Serra J., Pavlak M. (2010) Datos experimentales de la cinética del secado y del modelado matemático para pulpa de cupuacu (*theobroma grandiflorum*) en rodajas. Ciencia y Tecnología de Alimentos. ISSN 0101-2061
11. Hermosillo J., Gudiño D., Mendoza M. (1995) Notas sobre el curso de energía solar., Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. 1995. Capítulo Dos, Naturaleza de la energía Solar.
12. Barbosa-Cánovas G., Vega-Mercado H. (2010) Deshidratación de alimentos. Editorial Acribia S.A. Capítulo 4. Mecanismos de Deshidratación.
13. Rivaplasta C., Calizaya R., Gutierrez J. (2003) Diseño y valuación de un secador solar para el secado industrial de tomate. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Peru.
14. Mulet A., Rosselló C., Piñaga F., Carbonell J.V., y Berna A. (1983) Mecanismos y cinética de secado de zanahorias con aire caliente. Revista Agroquímica Tecnología y Alimentos. pág. 370.

15. Ocampo A. (2006) Modelado cinético del secado de la pulpa de mango. Revista EAI, ISSN 1794-1237 Numero 5.
16. López A., Virseda P. y Abril J. (1995) Modelización de cinética de secado de patata cortada en láminas. Revista Alimentaria
17. Ochoa R., Ortega C., Musalem O. (2007) Aprovechamiento de la energía solar térmica en el sector agropecuario. Revista claridades agropecuarias, Pág. 3.
18. Corp S. (2009) Secado Solar. Curso Internacional “Fuentes Renovables de Energía y Eficiencia Energética”. Argentina.
19. Corp S. Lugones B. (2009) Método gráfico para el diseño de secadores solares. Disponible en Internet:  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo01.htm>
20. Saravia L., Alía D., Sánchez B. (2007) El diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 11, ISSN 0329-5184.
21. Carranza J., Sánchez M. (2002) Cinética de secado de *Musa paradisiaca* L. “Platano” y *Manihot esculenta* Grantz “Yuca”. Revista Amazónica de Investigación Alimentaria, V.2 N °1. Disponible en Internet:  
<http://www.unapiquitos.edu.pe/pregrado/facultades/alimentarias/descargas/vol2/2.pdf>
22. Hernández H., Marcial J., Luigi F., Macías P. (2004) Nuevas Energías Renovables: Una alternativa energética sustentable para México. Instituto de Investigaciones Legislativas del senado de la Republica. Pág. 161. Disponible en Internet:  
[http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS\\_ENERG\\_RENOV.pdf](http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS_ENERG_RENOV.pdf)

23. Geankoplis C.J. (1983) Drying of process materials. En, Transport Process and unit operation, Segunda edición, , Allyn and Bacon, Boston, MA.
24. Alatorre C. (2009) Energías Renovables para el desarrollo sustentable en México. Secretaria de Energía. Disponible en Internet:  
[http://www.sener.gob.mx/res/0/ER\\_para\\_Desarrollo\\_Sustentable\\_Mx\\_2009.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/0/ER_para_Desarrollo_Sustentable_Mx_2009.pdf)
25. Van Campen B., Guidi D., y Best G. (2000) Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenible. Documento de trabajo sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales, No. 3, FAO, Roma. Disponible en Internet:  
<http://www.fao.org/uploads/media/Solar%20photovoltaic%20for%20SARD%20ES.pdf>
26. Ley de Desarrollo Rural Sustentable (2001) Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 7 de diciembre de 2001. Disponible en Internet:  
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/235.pdf>
27. SAGARPA (2010) Promueve SAGARPA y Banco Mundial la utilización de energías renovables en el campo Mexicano. Comunicado 34. Disponible en internet:  
<http://www.cnnexpansion.com/actualidad/2009/12/16/bm-da-premio-a-mexico-por-proyecto-verde>
28. Romo J. (2009) México Acciones y estrategias en el sector agropecuario para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. SAGARPA. Disponible en internet:  
[http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/cambioclimatico/Presentacion\\_Mexico.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/cambioclimatico/Presentacion_Mexico.pdf)
29. Martínez J. Arellano R. (2007) Participación social y desarrollo rural sustentable en la microcuenca Lagunillas, Jalisco, México. Cuadernos de desarrollo rural. No. 58. Disponible en internet: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11705804>

Secado Solar, ECURED Disponible en internet:

[http://www.ecured.cu/index.php/Secado\\_solar](http://www.ecured.cu/index.php/Secado_solar)

## IX. ANEXOS.

### IX.I. ANEXO 1. Modelos y constantes de secado y coeficientes de determinación, secado controlado de queso fresco chiapaneco.

Modelos de Secado	Tratamiento a 40 °C			Tratamiento a 55 °C			Tratamiento a 70 °C		
	Coeficientes	R <sup>2</sup>	RMSE	Coeficientes	R <sup>2</sup>	RMSE	Coeficiente	R <sup>2</sup>	RMSE
Newton	k=0.05	0.9173	0.0784	k=0.1349	0.8636	0.1182	k=0.2154	0.8881	0.1171
Page	k=0.01286 n=1.469	0.9633	0.0531	k=0.0254 n=1.895	0.9835	0.0434	k=0.05 n=1.886	0.9922	0.0324
Henderson	k=0.05571 a=1.092	0.9312	0.0727	k=0.1825 a=1.301	0.9741	0.0576	k=0.2975 a=1.437	0.9722	0.0612
Logarítmico	k=0.0002521 a=155.3 c=-114.4	0.9854	0.0341	k=0.0735 a=1.972 c=-0.799	0.9741	0.0576	k=0.2063 a=1.476 c=-0.1719	0.9910	0.0366

## IX.II. ANEXO 2. Análisis sensorial de queso seco chiapaneco.



### UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Maestría en Ciencias en Desarrollo Sustentable.

Análisis Sensorial de Queso Seco Chiapaneco.

Prueba de nivel de agrado

Nombre: \_\_\_\_\_ Edad: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Instrucciones:

La prueba de nivel de agrado emplea una escala hedónica con cinco puntos que describen desde un extremo agrado (5), hasta un extremo desagrado (1), con un punto intermedio. Para la evaluación del queso seco. Las muestras se presentan en platos individuales que fueron identificados por una letra respectivamente.

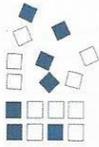
Tomar una porción con una cucharita plástica de un plato, analizarla y calificarla en la tabla de a continuación, es importante que comas un poco de pan de caja y bebas un poco de agua con la intención de neutralizar los sabores entre muestra y muestra, esta prueba se repetirá durante 3 días.

Tabla A. Cuestionario de aceptación en una escala hedónica para queso chiapaneco para cuatro indicadores.

Tabla A. Cuestionario de aceptación en una escala hedónica para queso seco chiapaneco.				
Plato	Sabor	Olor	Color	Presentación
a	1-5	1-5	1-5	1-5
b	1-5	1-5	1-5	1-5
c	1-5	1-5	1-5	1-5
d	1-5	1-5	1-5	1-5

Gracias por su colaboración.





August 2013

**TO WHOM IT MAY CONCERN**  
P r e s e n t

This is to certify that *Juana Maria Hernández Jarquín, Joel Pantoja Enriquez, Enrique A. Mojica Castillo, Eduardo Lara Morales, Luis Alberto Hernández Domínguez, Roilan Iglesias Díaz, Joel Moreira Acosta, Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte, Pathiyamattom Joseph Sebastian* presented the contribution: **DRYING KINETICS OF CHIAPAS'S FRESH CHEESE UNDER CONTROLLED CONDITIONS**, in the Renewable Energy and Sustainable Development Symposium at the XXII International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 11th to 15th, 2013.

Sincerely,

Armando Salinas Rodríguez  
President

