

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR  
INDIRECTO DE CACAO MEDIANTE EL USO DE AIRE  
CALENTADO POR ENERGÍA SOLAR**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela

Por los Brs. Larios Saldaña, Luis Ángel  
Teixeira Da Silva, Juan Manuel  
para optar al Título  
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2.004

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR  
INDIRECTO DE CACAO MEDIANTE EL USO DE AIRE  
CALENTADO POR ENERGÍA SOLAR**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Franklin Baduy C., M.Sc.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela

Por los Brs. Larios Saldaña, Luis Ángel  
Teixeira Da Silva, Juan Manuel  
para optar al Título  
De Ingeniero Mecánico

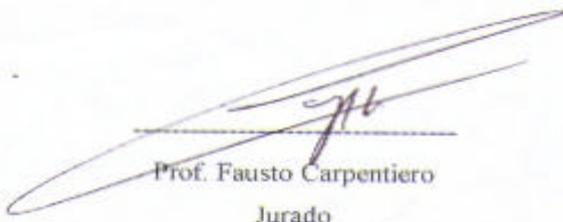
Caracas, 2.004

Caracas, 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres Larios Saldaña, Luis Ángel y Teixeira Da Silva, Juan Manuel, titulado:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR  
INDIRECTO DE CACAO MEDIANTE EL USO DE AIRE  
CALENTADO POR ENERGÍA SOLAR**

Considera que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.



Prof. Fausto Carpentiero  
Jurado



Prof. Francisco Garcia  
Jurado



Prof. Franklin Baduy  
Tutor Académico



## AGRADECIMIENTOS

Ante todo a Dios que nos acompaño en todo momento durante la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Sería insensato decir, que para realizar un proyecto de esta índole, no es necesario la colaboración de personas e instituciones que posean los conocimientos y la calidad humana imprescindible para el desarrollo del mismo. Por lo tanto es imposible dejar de agradecer a las siguientes personas:

- \* Prof. Franklin Baduy nuestro Tutor Académico, por la inmensa ayuda prestada en la realización de este Trabajo Especial de Grado, por su constante apoyo para que siguiéramos adelante con todas las exigencias que el mismo requería.
  
- \* Prof. Elevina Pérez nuestra asesora externa, quien con sus conocimientos y contactos en el área de tecnología de alimentos nos brindó las bases para el estudio de la deshidratación del cacao.
  
- \* Ing. Jesús Taborda, quien con su valioso tiempo nos ayudó en muchas diligencias para que este trabajo se llevara a cabo.
  
- \* Lic. Clímaco Álvarez, quien nos acompañó a la zona de Chuao y nos brindó sus conocimientos en el área del cacao.

Por último a todas aquellas personas que de un modo u otro prestaron su colaboración para que se pudiera llevar a cabo este trabajo de investigación

## **DEDICATORIA**

Este trabajo fue realizado en honor a mis padres,  
quienes me apoyaron en todo momento,  
a mi hermano y a  
Lisbeth quien siempre estuvo a mi lado

Luis A. Larios S.

## **DEDICATORIA**

A mi madre, padre y hermana;  
éste Trabajo Especial de Grado es por ustedes, de ustedes y para ustedes.

Juan M. Teixeira D.

## **RESUMEN**

**Larios S. Luis A., Teixeira D. Juan M.**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR INDIRECTO DE CACAO MEDIANTE EL USO DE AIRE CALENTADO POR ENERGÍA SOLAR**

**Tutor Académico Prof. Franklin Baduy. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de  
Ingeniería. Escuela de Mecánica. 2004, 157 págs.**

**Palabras Claves: Cacao, Humedad, Calentador Solar, Convección Natural,  
Deshidratador.**

Se determinó el contenido de humedad inicial del cacao fermentado para su posterior estudio. Se construyó un túnel de secado donde se realizaron diversas pruebas para la determinación de la humedad crítica, tiempo crítico, curvas y tiempo de secado para el cacao. La temperatura del aire exterior de 29,4 °C y con una humedad relativa de 70,1 % pudo ser incrementada en el túnel de secado hasta una temperatura de 54,8 °C y reducir su humedad relativa hasta un 45,5 %, obteniéndose un  $\Delta w = 0,02875$  kgw/kgs. La zona de Chuao posee un rango de radiación solar de 697 - 940 W/m<sup>2</sup>. Se construyó un prototipo de calentador solar de aire en el que se midieron la temperatura de la placa absorbadora, temperatura de la superficie selectiva, velocidad de entrada del aire al calentador solar por convección natural. Se desarrolló un modelo matemático del calentador solar de aire bajo los principios de convección natural para un flujo de aire, con la finalidad de obtener una longitud óptima del mismo. Se diseñó un deshidratador de cacao el cual consta de un calentador solar de aire y una cámara de secado donde se realiza el proceso de disminución de humedad de las muestras de cacao. Según el diseño propuesto en 0,9 m<sup>2</sup> mediante el uso del deshidratador indirecto de cacao se secan 10 kg. de cacao en 4 días.

## ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE TÍTULO.....	i
CARTA DE APROBACIÓN DEL JURADO.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA.....	v
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xviii
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	xxi
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. MOTIVACIÓN.....	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.4. PROPÓSITO.....	4
1.4.1. <i>Objetivo general:</i> .....	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos:</i> .....	4
1.5. ALCANCES.....	5
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
2.1. MARCO TEÓRICO.....	7
2.2. SECADO.....	7
2.2.2. <i>Proceso básico de secado</i> .....	8
2.2.3. <i>Períodos de secado</i> .....	9
2.2.4. <i>Sistemas de deshidratación</i> .....	16
2.2.5. <i>Secado al sol</i> .....	17
2.2.6. <i>Tipos de secado al sol</i> .....	18
2.5.6.1. Secaderos solares naturales.....	19
2.5.6.1.1. Secadores solares directos.....	19
2.5.6.1.2. Secaderos solares indirectos.....	19
2.5.6.2. Secaderos solares semi-artificiales.....	20
2.5.6.3. Secaderos solares asistidos.....	21
2.5.7. <i>Secado por gases calientes</i> .....	22
2.5.7.1. Secaderos de horno.....	22
2.5.7.2. Secaderos de bandejas o de armario.....	22

2.5.7.3.	Secaderos de túnel.....	23
2.5.7.4.	Secaderos de cinta transportadora.....	23
2.5.7.5.	Secaderos rotatorios .....	23
2.5.7.6.	Secaderos de lecho fluidizado .....	23
2.5.7.7.	Secaderos por arrastre neumático.....	24
2.5.8.	<i>Secaderos por conducción</i> .....	24
2.5.8.1.	Secaderos de bandejas a vacío .....	24
2.5.8.2.	Secaderos de tornillo sinfín .....	25
2.5.8.3.	Secaderos de rodillos.....	25
2.3.	CONVECCIÓN NATURAL.....	25
2.4.	PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA, CONSERVACIÓN DE MASA Y PSICROMETRÍA.....	30
2.4.1.	<i>Primera Ley de la Termodinámica (Ley de conservación de la energía) y conservación de la masa (continuidad)</i> .....	30
2.4.2.	<i>Psicrometría</i> .....	32
2.5.	TIPOS DE COLECTORES Y/O CALENTADORES SOLARES .....	33
2.5.1.	<i>Colectores solares planos</i> .....	33
2.5.2.	<i>Descripción general de un colector solar plano</i> .....	34
2.5.3.	<i>Tipos de colectores solares planos</i> .....	35
2.5.3.1.	Placas absorbedoras para calentamiento de líquidos.....	35
2.5.3.2.	Placas absorbedoras para calentamiento de gases.....	35
2.5.3.3.	Colector solar plano con superficie absorbedora y lámina transparente	36
2.5.3.4.	Colector solar plano con superficie absorbedora suspendida .....	37
2.5.3.5.	Colector almacenador de energía solar con cubierta transparente	37
2.5.4.	<i>Orientación y ángulo de inclinación de los colectores solares planos</i>	37
2.5.5.	<i>Colectores concentradores</i> .....	38
2.5.5.1.	Diferentes tipos de colectores concentradores. ....	38
2.5.5.2.	Concentradores de enfoque .....	38
2.5.5.3.	Concentradores fijos o semifijos.....	39
2.5.5.4.	Colectores fotovoltaicos .....	39
<b>CAPÍTULO III</b>	.....	<b>40</b>
3.1.	MARCO METODOLÓGICO.....	40
3.2.	DATOS CLIMÁTICOS DE LA REGIÓN DONDE SE COSECHA EL CACAO (CHUAO).....	40
3.3.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL DEL CACAO .....	42
3.4.	CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE SECADO .....	43
3.5.	CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE CALENTADOR SOLAR DE AIRE	53

3.6. MODELO MATEMÁTICO DEL CALENTADOR SOLAR PLANO DE AIRE	57
<i>Coefficientes del polinomio</i> .....	74
L.....	77
3.7. CÁMARA DE SECADO .....	81
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>83</b>
4.1. DIMENSIONAMIENTO DEL CALENTADOR SOLAR Y DE LA CÁMARA DE SECADO, MATERIALES Y COSTOS .....	83
4.1.1. <i>Dimensionamiento del calentador solar</i> .....	83
4.1.2. <i>Dimensionamiento de la cámara de secado</i> .....	87
4.1.3. <i>Materiales</i> .....	90
4.1.4. <i>Costos</i> .....	91
4.1.4.1. Costos generales o comerciales .....	91
4.1.4.2. Costos específicos para la construcción del deshidratador .....	92
4.2. CONCLUSIONES .....	93
4.3. RECOMENDACIONES .....	94
<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>95</b>
* DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD INICIAL PRESENTE EN LOS DIFERENTES TIPOS DE CACAO .....	95
CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO .....	101
DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y TIEMPO CRÍTICO.....	109
DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD FINAL REAL .....	117
DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LAS DIFERENTES PRUEBAS .....	118
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO TOTAL PARA EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN EN EL TÚNEL DE SECADO .....	119
<b>APÉNDICE B .....</b>	<b>120</b>
CÁLCULOS PSICROMÉTRICOS.....	120
<b>APÉNDICE C .....</b>	<b>123</b>
RADIACIÓN SOLAR .....	123
RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE.....	123
<i>Constante solar</i> .....	123
<i>Variación de la radiación extraterrestre</i> .....	123
<i>Distribución espectral de la radiación solar extraterrestre</i> .....	124
RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE .....	125
<i>Interacción de la radiación con la atmósfera</i> .....	125
<i>Dirección de la radiación solar directa</i> .....	127
RADIACIÓN SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS .....	129
<i>Irradiancia solar directa sobre superficies inclinadas</i> .....	129
<i>Irradiancia solar difusa y reflejada sobre una superficie inclinada</i> .....	131

<i>Irradiancia solar total sobre una superficie inclinada</i> .....	132
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>135</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>137</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

### CAPITULO III

Cuadro 3.1. “Irradiación anual en Venezuela” .....	42
Cuadro 3.2. “Datos experimentales” .....	46
Cuadro 3.3. “Datos de todas las experiencias” .....	47
Cuadro 3.4. “Cambios de pendientes” .....	49
Cuadro 3.5. “Humedades y tiempos críticos para cada prueba” .....	50
Cuadro 3.6. “Humedades finales reales para las diferentes pruebas” .....	51
Cuadro 3.7. “Tiempo de secado Teórico y Real” .....	52
Cuadro 3.8. “Data de temperaturas del vidrio y de la placa absorbadora para diferentes días” .....	55
Cuadro 3.9. “Temperaturas Promedio” .....	55
Cuadro 3.10. “Datos utilizados para el cálculo de la velocidad” .....	56
Cuadro 3.11. “Propiedades termofísicas del aire a diferentes temperaturas” .....	60
Cuadro 3.12. “Coeficientes del polinomio en función de la longitud L” .....	62
Cuadro 3.13. “Iteraciones y coeficientes para $q_T$ ” .....	68
Cuadro 3.14. “Densidad del aire a diferentes temperaturas” .....	72
Cuadro 3.15. “Coeficientes del polinomio en función de la longitud L” .....	74
Cuadro 3.16. “Iteraciones y coeficientes de $\dot{H}$ ” .....	77

### APÉNDICE A

Cuadro A.1. “Determinación de humedad (método de desecación en estufa)” .....	96
Cuadro A.2. “Resumen de la prueba #1” .....	97
Cuadro A.3. “Resumen de la prueba #2” .....	98
Cuadro A.4. “Resumen de la prueba #3” .....	98
Cuadro A.5. “Resumen de la prueba #4” .....	99
Cuadro A.6. “Resumen de la prueba #5” .....	99

Cuadro A.7. “Resumen de la prueba #6” .....	100
Cuadro A.8. “Resumen de la prueba #7” .....	101
Cuadro A.9. “Variación de $w$ con respecto al tiempo para la prueba #1” .....	102
Cuadro A.10. “Variación de $w$ con respecto al tiempo para la prueba #2” .....	103
Cuadro A.11. “Variación de $w$ con respecto al tiempo para la prueba #3” .....	104
Cuadro A.12. “Variación de $w$ con respecto al tiempo para la prueba #4” .....	105
Cuadro A.13. “Variación de $w$ con respecto al tiempo para la prueba #5” .....	106
Cuadro A.14. “Variación de $w$ con respecto al tiempo para la prueba #6” .....	107
Cuadro A.15. “Variación de $W$ con respecto al tiempo para la prueba #7” .....	108
Cuadro A.16. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #1” .....	110
Cuadro A.17. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #2” .....	111
Cuadro A.18. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #3” .....	112
Cuadro A.19. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #4” .....	113
Cuadro A.20. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #5” .....	114
Cuadro A.21. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #6” .....	115
Cuadro A.22. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #7” .....	116
Cuadro A.23. “Humedades y tiempos críticos para cada prueba” .....	117
Cuadro A.24. “Estimación de la humedad final real prueba #1” .....	118
Cuadro A.25. “Valores de velocidad de secado en los tres períodos” .....	118
Cuadro A.26. “Comparación entre tiempo total teórico y tiempo total real” .....	119

APÉNDICE C

Cuadro C1. “Reflectancia de algunos materiales” .....132

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO II

Figura 2.1. “Proceso básico de secado” .....	9
Figura 2.2. “Períodos del secado” .....	10
Figura 2.3. “Período de velocidad de secado constante” .....	11
Figura 2.4. “Influencia de la temperatura del aire de secado” .....	12
Figura 2.5. “Influencia de la velocidad del aire de secado” .....	14
Figura 2.6. “Períodos de velocidad decreciente” .....	15
Figura 2.7. “Secador solar indirecto” .....	20
Figura 2.8. “Secadero solar de túnel (disposición en serie)” .....	21
Figura 2.9. “Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección” .....	26
Figura 2.10. “Volumen de control aplicado a un sistema abierto” .....	30

### CAPITULO III

Figura 3.1. “Túnel de Secado” .....	45
Figura 3.2. “Curva de secado: humedad vs. tiempo” .....	47
Figura 3.3. “Comparación de la velocidad de secado del cacao fermentado variando la temperatura y el flujo de aire” .....	48
Figura 3.4. “Curva de secado: Aproximaciones lineales” .....	49
Figura 3.5. “Tasa de secado: $dw/dt$ vs. tiempo” .....	51
Figura 3.6. “Tasa de secado: $dw/dt$ vs. humedad” .....	52
Figura 3.7. “Esquema de un calentador solar de aire” .....	57
Figura 3.8. “Propiedades termofísicas del aire” .....	60
Figura 3.9. “ $g(Pr)$ ” .....	61
Figura 3.10. “Coeficiente convectivo local para una longitud fija de $L = 1m$ ” .....	62
Figura 3.11. “Coeficientes de a, b, c y d del polinomio en función de L” .....	63
Figura 3.12. “Área de la placa absorbidora en función de x” .....	65

Figura 3.13. “Psicometría del aire dentro del calentador (calentamiento sensible)”	69
Figura 3.14. “Densidad del aire en función de la temperatura”	72
Figura 3.15. “Velocidad del aire para una longitud fija de $L = 1\text{m}$ ”	73
Figura 3.16. “Coeficientes de a, b y c del polinomio en función de L”	74
Figura 3.17. “Gráfica de la función $\dot{H}_o(L) - q_T(L) = 0$ ”	79
Figura 3.18. “Ampliación de la Gráfica de la función $\dot{H}_o(L) - q_T(L) = 0$ ”	80
Figura 3.19. “Psicometría del aire dentro de la cámara de secado”	82

#### CAPITULO IV

Figura 4.1 “Esquema de la placa absorbadora”	84
Figura 4.2. “Esquema de la sección transversal del calentador de aire.”	84
Figura 4.3. “Esquema de la superficie selectiva”	85

#### APÉNDICE A

Figura A.1. “Curva de Secado para la prueba #1”	102
Figura A.2. “Curva de Secado para la prueba #2”	104
Figura A.3. “Curva de Secado para la prueba #3”	105
Figura A.4. “Curva de Secado para la prueba #4”	106
Figura A.5. “Curva de Secado para la prueba #5”	107
Figura A.6. “Curva de Secado para la prueba #6”	108
Figura A.7. “Curva de Secado para la prueba #7”	109
Figura A.8. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #1”	110
Figura A.9. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #2”	111
Figura A.10. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #3”	112

Figura A.11. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #4” .....	113
Figura A.12. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #5” .....	114
Figura A.13. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #6” .....	115
Figura A.14. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #7” .....	116

## APÉNDICE B

Figura B.1. “Psicrometría del aire dentro del calentador (calentamiento sensible)” .....	120
--	-----

## APÉNDICE C

Figura C.1. “Distribución espectral de la radiación solar en función de las condiciones atmosféricas y el ángulo de incidencia” .....	124
Figura C.2. “Interacción de la radiación con la atmósfera terrestre” .....	126
Figura C.3. “Trayectoria de la radiación solar a través de la atmósfera terrestre” .....	127
Figura C.4. “Irradiación directa, difusa y reflejada sobre una superficie inclinada” .....	130

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. “Datos mensuales de precipitación (mm) CHUAO-PASAGUACA” .....	140
Anexo 2. “Datos mensuales de evaporación (mm) CHUAO-PASAGUACA” .....	141
Anexo 3. “Promedio anual insolación, horas (período 1951 - 1970)” .....	141
Anexo 4. Promedio anual radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)...	142
Anexo 5. “Insolación media, mes de Enero, horas (período 1951 - 1970)” .....	142
Anexo 6. “Insolación media, mes de Abril, horas (período 1951 - 1970)” .....	143
Anexo 7. “Insolación media, mes de Julio, horas (período 1951 - 1970)” .....	143
Anexo 8. “Insolación media, mes de Octubre, horas (período 1951 - 1970)” .....	144
Anexo 9. “Promedio mes de Enero radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	144
Anexo 10. “Promedio mes de Febrero radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	145
Anexo 11. “Promedio mes de Marzo radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	145
Anexo 12. “Promedio mes de Abril radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	146
Anexo 13. “Promedio mes de Mayo radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	146
Anexo 14. “Promedio mes de Junio radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	147
Anexo 15. “Promedio mes de Julio radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	147
Anexo 16. “Promedio mes de Agosto radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)” .....	148

Anexo 17. “Promedio mes de Septiembre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”	148
Anexo 18. “Promedio mes de Octubre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”	149
Anexo 19. “Promedio mes de Noviembre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”	149
Anexo 20. “Promedio mes de Diciembre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”	150
Anexo 21. “Túnel de secado (vista frontal)”	150
Anexo 22. “Túnel de secado (vista trasera)”	151
Anexo 23. “Túnel de secado, detalle interno, balanza, ventilador, tobera, resistencias”	151
Anexo 24. “Túnel de secado, detalle resistencias”	152
Anexo 25. “Túnel de secado, ventilador”	152
Anexo 26. “Túnel de secado, tablero de control, suiches individuales para las resistencias con sus respectivos potenciómetros y potenciómetro del ventilador”	153
Anexo 27. “Túnel de secado, instrumentos utilizados en la medición de las propiedades del aire (Tri-sense)”	153
Anexo 28. “Túnel de secado, instrumentos utilizados en la construcción y medición de variables en el túnel, pinza amperimétrica, voltímetro y cuenta revoluciones”	154
Anexo 29. “Túnel de secado, detalle de cesta para la colocación de las muestras”	154
Anexo 30. “Túnel de secado en funcionamiento con muestras de cacao”	155
Anexo 31. “Túnel de secado, detalle de medición en prueba”	155
Anexo 32. “Calentador solar plano de aire (vista frontal)”	156

Anexo 33. “Calentador solar plano de aire, detalle de termocuplas en vista lateral” .....	156
Anexo 34. “Calentador solar plano de aire, vista de sección transversal y detalle de termocuplas” .....	157
Anexo 35. “Calentador solar plano de aire termocuplas” .....	157

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

### LETRAS GRIEGAS

$\beta$  : Coeficiente volumétrico de expansión térmica

$\nu$  : Viscosidad cinemática

$\rho$  : Densidad

$\phi$  : Humedad relativa

$\theta$  : Ángulo de inclinación

### SÍMBOLOS

$A_p$ : Área de la placa absorbadora

$A_{ss}$ : Área de la superficie selectiva

$C_p$ : Calor específico a presión constante

$g$ : Gravedad

$G_{b,T}$ : Irradiación solar directa sobre superficie inclinada

$G_{d,T}$ : Irradiación solar difusa

$G_{r,T}$ : Irradiación solar reflejada

$G_T$ : Irradiación solar total

$Gr$ : Número de Grashof

$h$ : Entalpía

$h_p$ : Coeficiente convectivo de la placa absorbadora

$h_{v,i}$ : Coeficiente convectivo de la superficie selectiva

$H_f$ : Humedad final

$H_o$ : Humedad inicial

$I_{sc}$ : Constante solar

$k$ : Conductividad térmica

L: Longitud del calentador solar de aire

•  
m : Flujo másico

$m_w$ : Masa de agua en la muestra

$m_s$ : Masa de producto seco en la muestra

Nu: Número de Nusselt

$P_v$ : Presión de vapor

Pr: Número de Prandtl

•  
 $\dot{Q}$  : Calor

$q_{v,s}$ : Calor por convección vidrio superior – aire ambiente

$q_{v,i}$ : Calor por convección vidrio inferior – aire interno

$q_p$  : Calor por convección placa absorbadora – aire interno

$q''$ : Flujo de calor por conveccion

Re: Número de Reynolds

$R_c$ : Periodo de velocidad constante

$T_{v,i}$ : Temperatura de la superficie selectiva interna

$T_p$ : Temperatura de la placa absorbadora

$T_a$ : Temperatura ambiente

$T_2$ : Temperatura de salida del calentador solar

$t_c$ : Tiempo crítico

$T_s$ : Temperatura de superficie

$T_f$ : Temperatura de película

$T_\infty$  : Temperatura del fluido

V: Velocidad

$w_c$  Humedad critica del cacao

$w_o$ : Humedad inicial del cacao

w: Humedad

•  
 $\dot{W}$  : Trabajo

Z: altura

## CAPÍTULO I

### 1.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de su historia, Venezuela ha contado con dos cultivos destinados principalmente a la exportación: el Café y el Cacao. Éstos constituyeron, hasta el auge petrolero iniciado con el segundo cuarto del siglo pasado, los principales medios de intercambio de que dispuso la nación. El Cacao venezolano, desde 1600 a 1820 ocupó el primer lugar de exportación. Muchas publicaciones internacionales lo señalan como el de más alta calidad en el mercado mundial. El Cacao (*Theobroma cacao*), ha descendido en importancia relativa dentro de la economía venezolana. Sin embargo, la calidad del producto derivada del beneficio del cacao (la recolección, partida y desgranada de la mazorca, la fermentación y el secado) ha mantenido su prestigio en el mercado mundial y ocupa una buena posición dentro de las clasificaciones comerciales (extra fino, fino de primera, fino de segunda). Mediante estos procesos de beneficio se desarrollan en el grano los principios fundamentales del sabor, aroma y calidad inconfundibles del cacao, lo que determina en gran medida su condición de finos y aromáticos, es decir, la calidad del producto final. El beneficio constituye parte fundamental y decisiva para la comercialización del cacao en el mercado nacional e internacional. El secado es el proceso final del beneficio y actualmente en Chuao se emplea el secado solar en patios donde se extiende el grano (en superficies preparadas de forma artesanal), directamente a los rayos solares. Una manera de mejorar el proceso de secado es aprovechar de la energía proveniente del sol la transformación de una buena parte de las ondas electromagnéticas a calor mediante la utilización de un cuerpo negro en conjunto con una superficie selectiva, este conjunto es llamado calentador solar plano de aire solar. De esta manera, se genera el efecto invernadero dentro del calentador con la finalidad de incrementar la

temperatura del medio, en este caso aire, a ser utilizado en el deshidratado; este método descrito se denomina secado indirecto utilizando aire calentado por energía solar. A los fines de mejorar la calidad del producto y de minimizar el impacto ambiental en Chuao, se propone una planta de secado solar, mediante la utilización del calentador solar plano de aire. Posteriormente este aire caliente pasará a través de la cámara de secado donde se encuentra el cacao. Algunas ventajas de la utilización de este método son controlar las propiedades psicrométricas del aire utilizado en el secado, mantener una higiene adecuada en el proceso por medio de la cámara de secado y aumentar la producción del cacao mediante la disminución del tiempo necesario para el secado.

## **1.2. MOTIVACIÓN**

Lo que motivó a realizar un proyecto de esta índole fue la oportunidad de participar en la resolución de un problema específico, que integró a participantes de la Facultades de Ingeniería y Ciencias.

Desde el punto de vista académico, nos estimuló el hecho de que el estudio conlleva a análisis termodinámicos, de transferencia de calor, diseño de partes y síntesis; en fin, fue una oportunidad para aplicar y consolidar parte de los conocimientos teóricos obtenidos a través de la carrera.

## **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Venezuela, por estar localizada a  $10^\circ$  de latitud norte y  $69^\circ$  de longitud, lo que la ubica entre el Ecuador y el trópico de Cáncer, cuenta con una cantidad de energía solar disponible relevante. Dicho de otra manera, a causa de su ubicación geográfica, se estima una irradiación diaria anual en Venezuela de 710 a  $750 \text{ W/m}^2$ , lo que significa que se puede aprovechar esta energía para algunos procesos.

Existen diversas maneras de deshidratar alimentos entre las cuales podemos diferenciar dos grupos: el secado directo y el secado indirecto; el secado directo se caracteriza por ser la misma fuente de energía la que realiza el secado; y el secado indirecto, necesita de un medio a ser calentado por la fuente de energía para poder secar el producto.

Actualmente el secado del cacao a nivel nacional se realiza de forma tradicional aplicando la deshidratación solar directa, que consiste en colocar el cacao directamente al sol sobre patios expuestos a la radiación solar. Esto trae como consecuencia una dependencia directa de las condiciones climáticas, ya que sólo se expone el producto en las horas despejadas del día, lo que demora el proceso a seis días aproximadamente. Por otra parte, la falta de control de higiene del proceso, ya que, estos patios son generalmente de cemento, carreteras de asfalto, etc; además existe el contacto directo con agentes externos como: la gente, animales, contaminación, etc.

Por lo tanto, se trata de diseñar un secador solar indirecto con la finalidad de lograr la deshidratación del cacao; mediante el control las propiedades psicrométricas del aire, su velocidad y las condiciones de higiene en el proceso dentro de la cámara de secado (aislada a los agentes externos y sólo en contacto con el medio de secado, en este caso aire calentado por medio de la energía solar). Otro factor de importancia en general, es que los métodos de secado indirecto solar retienen más vitaminas que el secado directo al sol. Se espera que la utilización del secador solar, beneficiará de forma directa la calidad del producto final, así como también incrementará la producción del mismo debido a la reducción del tiempo necesario para el secado.

Por otra parte, el factor humano desempeña un papel muy importante desde el punto de vista de mantenimiento y operacional, por ende, éste secador debe ser de fácil uso y de mantenimiento sencillo.

En la actualidad la búsqueda de mejora de los productos y el aumento de producción de los mismos son las metas comunes de todo productor, en este caso específico la Asociación de Productores de Cacao de Chuao.

Sin embargo debido a la falta de recursos económicos el objetivo general de diseñar y construir un deshidratador indirecto de cacao mediante el uso de aire calentado por energía solar no se pudo cumplir en su totalidad, ya que no fue posible su construcción por el motivo antes mencionado, por lo que sólo se propone el diseño del deshidratador.

#### **1.4. PROPÓSITO**

##### **1.4.1. Objetivo general:**

- Diseñar y construir un deshidratador indirecto que utilice energía solar para el secado de cacao cosechado en Chuao, Estado Aragua.

##### **1.4.2. Objetivos específicos:**

- Conocer las condiciones climáticas de la zona donde se seca el cacao (Chuao).
- Estudiar los requerimientos de secado del cacao cosechado en Chuao:
  - Humedad inicial.
  - Humedad final.
  - Tiempo de secado.
- Construir un Túnel de secado para obtener la curva de secado del cacao y determinar:
  - Humedad crítica
  - Tasa de Secado
  - Tiempo de Secado
- Construir un prototipo de calentador solar de aire para medir los efectos de la radiación solar (incremento de temperatura), en las

superficies que comprenden el calentador solar plano de aire: la placa absorbadora y la superficie selectiva.

- Aplicar los principios de convección natural en la elaboración de un modelo matemático de calentador solar plano de aire.
  - Primer Principio de la termodinámica
  - Conservación de masa
  - Psicrometría
- Proyecto del calentador solar:
  - Irradiación diaria
  - Tipos de colectores de energía solar
  - Selección del proceso (más adecuado al sector chuao)
- Dimensionamiento de la cámara de secado
- Propuesta del deshidratador solar indirecto de cacao:
  - Dimensiones (planos)
  - Materiales
  - Costos
- Recomendaciones

## **1.5. ALCANCES**

Realizar una revisión bibliográfica con la finalidad de entender el proceso de secado del cacao y comprender el efecto de la radiación solar en los deshidratadores solares.

Realizar visitas a Chuao, específicamente al patio de secado en donde se realiza el proceso de manera tradicional, para verificar lo obtenido en la revisión bibliográfica.

Obtener muestras de cacao fermentado de Chuao, ya que éstas son las que se colocan a secar en el patio de secado y por lo tanto es la muestra de interés en este estudio.

Diseño y construcción de un túnel de secado con la finalidad de obtener los parámetros necesarios para el secado del cacao (Curvas de secado, Humedad crítica, tiempo crítico, velocidad de secado, tiempo de secado).

Diseño y construcción de un prototipo de calentador solar plano de aire, con el objetivo de medir las temperaturas en las superficies (placa absorbadora, superficie selectiva) y también medir la velocidad dentro del mismo por convección natural.

Desarrollo de un modelo matemático para el dimensionamiento de un calentador solar plano de aire para la deshidratación de cacao.

Propuesta de un prototipo definitivo de deshidratador solar indirecto de aire (planos) por medio del cual se estimará el costo y los materiales a ser utilizados en su construcción.

## **CAPÍTULO II**

### **2.1. MARCO TEÓRICO**

En la siguiente sección se dará a conocer los fundamentos teóricos utilizados en esta investigación. Se hará una breve reseña de los orígenes del secado, su proceso; también se expondrá lo que significa: períodos de secado, humedad crítica, tiempo crítico, tiempo total de secado necesario. Por otra parte, se hablará de algunos métodos de deshidratación como son: secado solar, secado por gases calientes y secado por conducción. Para concluir esta sección se explicará brevemente los conceptos de convección natural, radiación solar, primer principio de la termodinámica, conservación de masa, psicrometría, tipos de colectores y/o calentadores solares.

### **2.2. SECADO**

El secado de los alimentos es el método más antiguo de conservación de los productos perecederos. La utilización del sol para reducir el contenido de agua de un producto, es el procedimiento más ancestral y menos costoso de conservación. Hoy todavía se utiliza para el secado de frutas: higos (higos secos), uvas (pasas), melocotones (orejones), ciruelas (ciruelas pasas), etc.

Con la deshidratación de un producto se consigue un incremento de las posibilidades de conservación y una gran reducción de peso. Estos son los dos factores que aconsejan la utilización de este proceso, puesto que además de conseguir la conservación del alimento asegura una reducción substancial de los costos de almacenamiento y/o transporte.

### 2.2.2. Proceso básico de secado

El secado es un procedimiento de conservación que al disminuir la cantidad de agua contenida en un alimento, disminuye la actividad microbiana y reduce la actividad enzimática.

El agua se elimina de los alimentos por medio de su difusión, en fase líquida y/o vapor, a través de su estructura interior. Al movimiento del agua líquida le seguirá su evaporación en algún punto del alimento, para lo cual es necesario calor, por lo tanto el proceso supone realmente un transporte simultáneo de materia y energía.

La transmisión de calor tiene lugar en el interior del alimento y está relacionado con el gradiente de temperatura existente entre su superficie y la correspondiente a la superficie del agua en el interior del alimento. Si se suministra al agua suficiente energía para su evaporación, el vapor producido se transportará desde la superficie de la capa húmeda en el interior del producto hacia la superficie de éste. El gradiente de presión existente entre la superficie del agua en el interior y en el aire exterior al alimento, es el que provoca la difusión del vapor de agua hacia la superficie de éste.

Por lo tanto, durante el secado se producen cuatro procesos de transporte (figura 2.1):

1.- *Transmisión de calor desde el medio secante hasta la superficie del producto.* Puede realizarse por conducción, convección o radiación.

2.- *Transmisión de calor desde la interfase sólido-medio secante hasta el interior del sólido.* Sólo puede tener lugar por conducción, en régimen no estacionario (las condiciones en cualquier punto varían con el tiempo)

3.- *Transmisión de materia a través del sólido.* Se puede producir por difusión o por capilaridad. Difusión debida a las diferencias de concentraciones y capilaridad, aprovechando los capilares existentes. La difusión tiene lugar en el secado de productos con humedades del orden de 25% (base húmeda) o inferiores, mientras que

la capilaridad se presenta para niveles más altos de humedad (65% o más), siempre y cuando en la estructura interna del producto existan capilares.

4.- *Transferencia de vapor desde la interfase sólido-medio de secado hacia el seno del medio secante.* Los equipos de deshidratación utilizarán por tanto para la transferencia de energía, procesos basados en la convección, conducción o radiación desde la fuente de calor hasta el alimento. Los sistemas más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y aire como vehículo de esta energía, por lo tanto la transferencia de calor dependerá, en este caso, de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión.

Es necesario tener en cuenta los cuatro procesos de transporte citados, puesto que la velocidad de secado será proporcional al más lento de ellos. En la mayoría de los casos los procesos limitantes serán los de transporte de materia y calor en el interior del alimento.

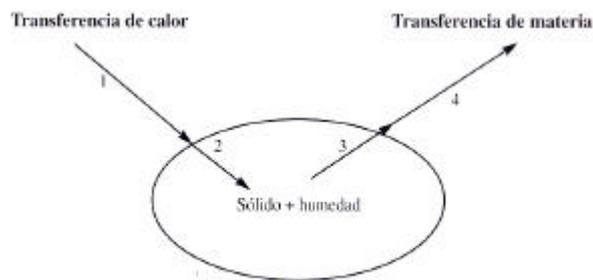


Figura 2.1. “Proceso básico de secado”

### 2.2.3. Períodos de secado

El proceso de secado está normalmente dividido en tres fases: una fase inicial de precalentamiento, seguido de otra de velocidad de secado constante y una o más fases de velocidad de secado decreciente. En la figura 2.2 se muestra la curva de

secado obtenida cuando se representa el contenido de humedad contra el tiempo de secado.

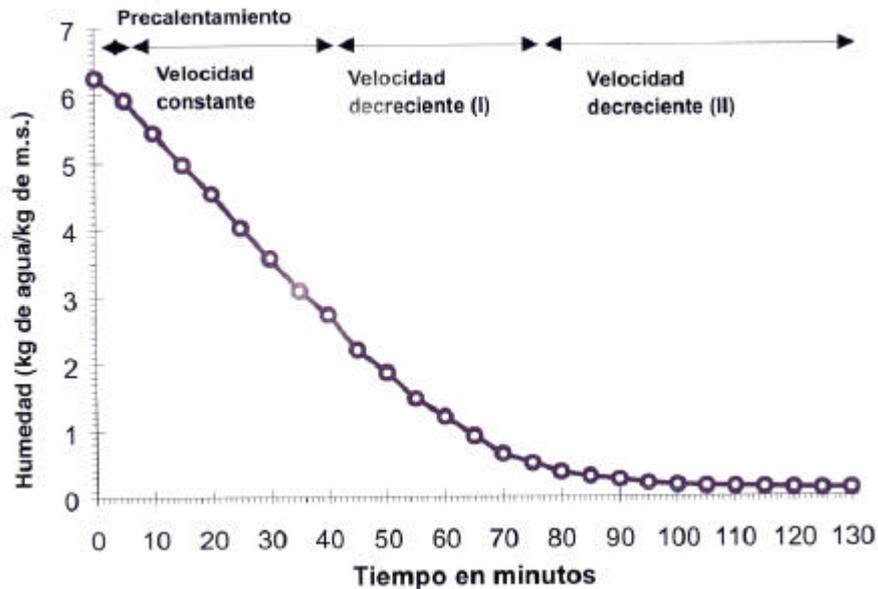


Figura 2.2. “Períodos del secado”

En el secado por convección, por lo tanto, se pueden distinguir las siguientes etapas clásicas, diferenciadas entre sí por la velocidad de secado:

- *Un período de precalentamiento*, que transcurre mientras el producto y el agua en el contenido se calientan ligeramente, hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo característica del ambiente secante. El producto a secar al principio está frío, su presión de vapor es igualmente baja, por lo tanto la velocidad de transferencia de masa es muy lenta. Por el contrario, el gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie fría del producto es elevada, en consecuencia la transferencia de calor es alta. La cantidad de calor transferida a la superficie del producto es netamente superior a la cantidad de calor arrastrada por la poca agua evaporada, existe un desequilibrio. El excedente de calor se utiliza entonces en calentar la superficie del producto, lo cual produce una disminución del gradiente de temperatura, que cesará

cuando se alcance el equilibrio estacionario. Este período es muy corto en comparación con el tiempo total de secado.

- Un período de velocidad constante, durante el cual se produce una reducción importante del contenido de agua. La evaporación se efectúa en la superficie del producto, a temperatura constante, siendo esta la de bulbo húmedo del aire. Durante este período, el flujo de calor intercambiado entre el aire y el producto se utiliza enteramente para la evaporación del agua. Este período continua mientras que la superficie del producto esté alimentada por agua libre líquida desde el interior, fundamentalmente por capilaridad. En la mayoría de los casos esta etapa de velocidad de secado constante finalizara cuando el contenido medio de humedad del producto alcance el valor de la *humedad crítica*. Por lo tanto, en la curva de secado este período se deberá ajustar a una recta (la humedad crítica coincide con el punto en que la recta ajustada se separa de la curva de secado) (figura 2..3).

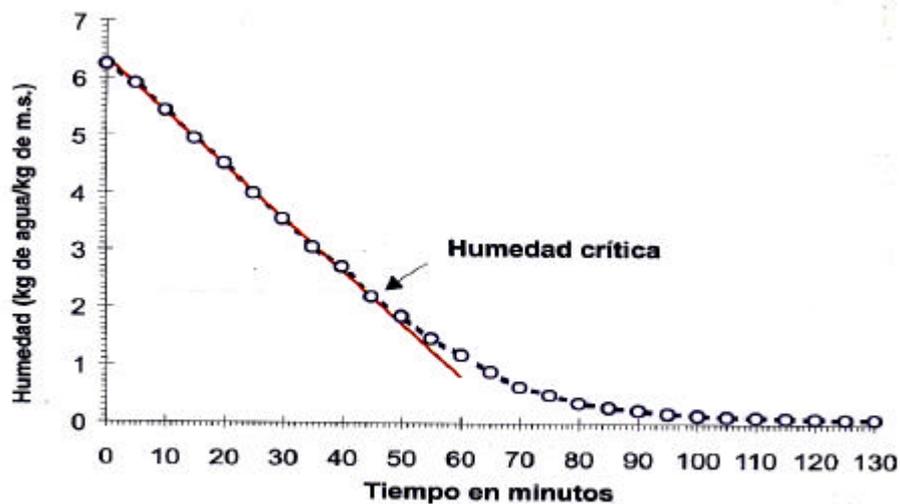


Figura 2.3. “Período de velocidad de secado constante”

La humedad crítica no es una propiedad del alimento, sino que depende del tamaño de partícula y de las condiciones del aire de secado.

En el período de velocidad constante, el principal mecanismo de transporte de masa es el flujo capilar de agua líquida, aunque puede existir alguna difusión de líquido. El mecanismo interno de flujo de la humedad no afecta a la velocidad de secado en este período, es el entorno secante, el aire, el que impone la velocidad de secado, que se incrementa al hacerle la temperatura (figura 2.4). Lo mismo ocurre con la velocidad del aire de secado, cuando mayor es ésta mayor es la velocidad del secado. (figura 2.5).

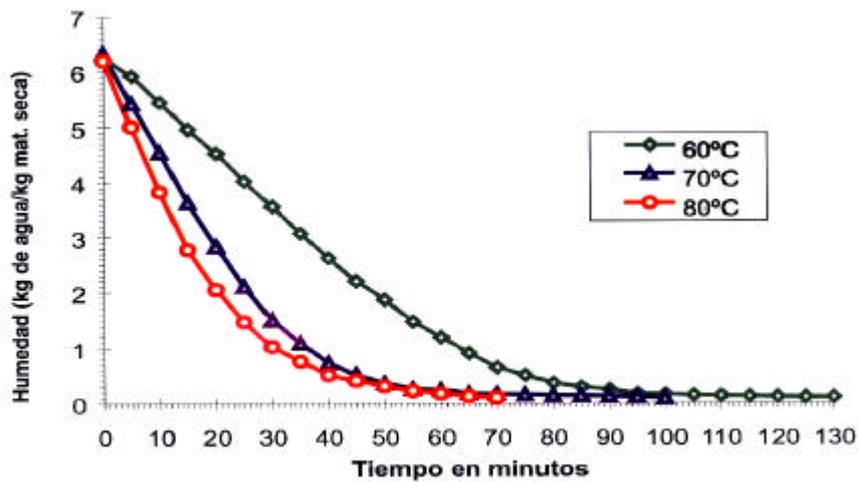


Figura 2.4. “Influencia de la temperatura del aire de secado”

El diámetro de los poros y de los capilares disminuye y la pérdida de peso es aproximadamente igual al volumen de agua evaporada. El flujo de agua líquida arrastra solutos que se depositan en la superficie, si no son volátiles, produciendo el fenómeno llamado “Case Hardening” que afecta a la eliminación de agua en los períodos posteriores. Cuando la superficie externa del producto deja de ser saturada, comienzan uno o varios períodos de velocidad de secado decreciente y la temperatura se incrementa continuamente desde la de bulbo húmedo hasta la del fluido calefactor.

- *Un período de velocidad decreciente*, que comienza cuando la superficie del producto en contacto con el aire de secado alcanza el umbral de higroscopicidad

(para materiales higroscópicos). Desde el punto de vista macroscópico, esto corresponde a alcanzar la humedad crítica. La zona de evaporación “frente de secado” que se encontraba en la superficie, se desplaza hacia el interior del producto. La brusca reducción de la superficie efectiva de transferencia, debida a una alimentación insuficiente de agua libre, es la causa de la disminución de la velocidad de secado. La migración del agua es cada vez más difícil y como consecuencia la transferencia de masa se convierte en el factor limitante. Los depósitos de solutos obstruyen los poros, el agua ligada migra bajo forma de vapor y la distancia a recorrer por el frente de vapor es cada vez mayor, todos estos factores frenan rápidamente la transferencia interna de agua. En el primer período de velocidad decreciente, el mecanismo de transporte de masa que predomina es la difusión de vapor, desde la zona de evaporación hasta la superficie del producto.

- Un segundo período de velocidad decreciente, o período de velocidad final. Este período solo existe para materiales higroscópicos. El flujo másico se reduce más rápidamente que en el período anterior. En este período, el conjunto del producto está en el dominio de la higroscopía. En el alimento no queda más que agua ligada que se evacúa muy lentamente. Esta fase se termina cuando el producto alcanza su humedad de equilibrio, que depende como es lógico, de las condiciones de secado.

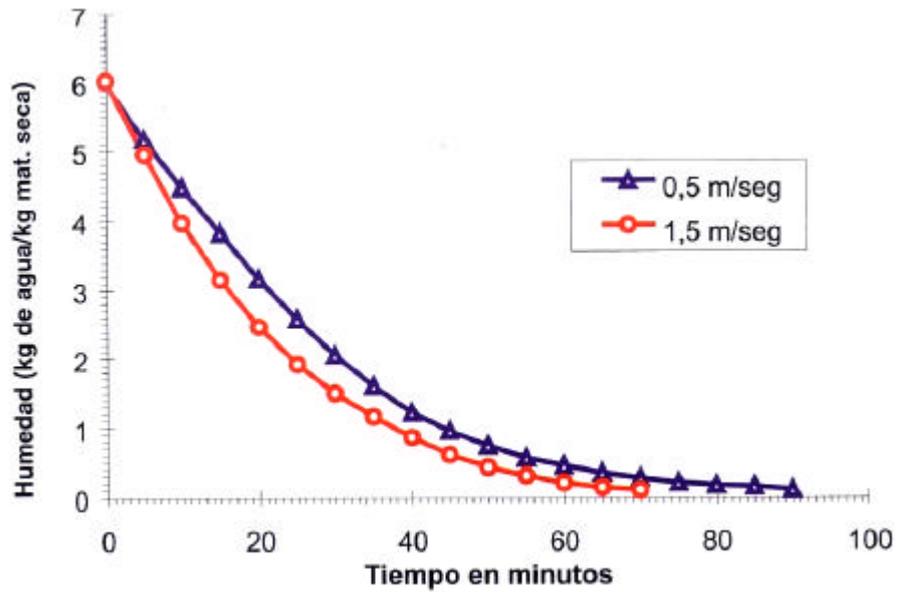


Figura 2.5. “Influencia de la velocidad del aire de secado”

Los períodos de velocidad decreciente se aprecian claramente si se representa la velocidad de secado ( $dx/dt$ : variación de la humedad con respecto del tiempo) contra la humedad por encima del equilibrio (figura 2.6). En dicha figura puede observarse el tramo horizontal correspondiente a la velocidad constante y los tramos de velocidad decreciente. La humedad crítica coincide con el punto de intersección de la recta de la velocidad constante con la del primer tramo de velocidad decreciente.

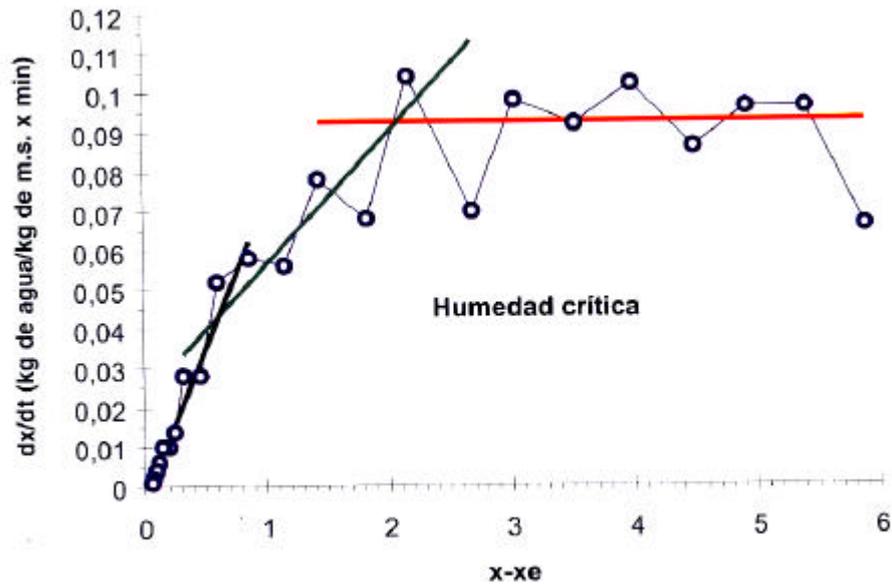


Figura 2.6. “Períodos de velocidad decreciente”

Para conocer el tiempo necesario en lograr una determinada reducción en la humedad de un producto debe predecirse la velocidad de secado. Durante el período de velocidad constante la expresión a utilizar es:

$$R_c = \frac{dw}{dt} = \frac{w_0 - w_c}{t_c} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Siendo  $w_c$  la humedad crítica,  $w_0$  la humedad inicial y  $t_c$  el tiempo de secado a velocidad constante.

Durante el período de velocidad decreciente la ecuación a aplicar es:

$$-\frac{dw}{dt} = \frac{R_c}{w_c}(w) \quad \text{Ec. 2.4}$$

o también

$$-\frac{w_c}{R_c} \int_{w_c}^w \frac{dw}{w} = \int_{t_c}^t dt \quad \text{Ec. 2.5}$$

Siendo los límites de integración la humedad crítica,  $w_c$ , o el final del período de secado a velocidad constante,  $t_c$ , y la humedad final deseada para el producto,  $w$ . Mediante la integración se obtiene:

$$t - t_c = \frac{w_c}{R_c} * \ln\left(\frac{w_c}{w}\right) \quad \text{Ec. 2.6}$$

Y el tiempo total de secado es entonces:

$$t = \frac{w_0 - w_c}{R_c} + \frac{w_c}{R_c} * \ln\left(\frac{w_c}{w}\right) \quad \text{Ec. 2.7}$$

#### **2.2.4. Sistemas de deshidratación**

Los métodos de secado se han desarrollado alrededor de los requerimientos específicos de cada producto. Por esta razón el proceso tiene lugar de muchas formas y se utilizan diferentes clases de equipos. En general, la deshidratación se conduce según dos métodos básicos: proceso adiabático y no adiabático. En el proceso adiabático el calor de vaporización es suministrado por el calor sensible del aire en contacto con el producto a secar. En el proceso no adiabático, el calor de evaporación es aportado por el calor radiante o por el calor transferido a través de las paredes en contacto con el material a secar. En todos los métodos de deshidratación, el alimento a secar se debe colocar en contacto con un medio, que con frecuencia es aire, para el disminuir la humedad del producto y sus alrededores. Basándonos en la influencia de la transferencia de materia y de la transmisión de calor, se deduce que el sistema de

deshidratación más eficaz será aquel que mantenga los máximos valores posibles de los gradientes de presión de vapor y de temperatura entre el aire y el interior del producto a deshidratar.

A continuación se exponen las principales características de estos sistemas de deshidratación y los diferentes tipos de secaderos utilizados.

### **2.2.5. Secado al sol**

La utilización del calor radiante del sol para evaporar la humedad de los alimentos es el método de secado más antiguo y extendido por todo el mundo.

Sin embargo, el secado al aire presenta muchas limitaciones para producciones a gran escala, entre estas se pueden citar los elevados costos de mano de obra, la necesidad de grandes superficies, ausencia de posibilidades de control del proceso de secado, infestación por insectos, posible degradación de los alimentos debida a reacciones bioquímicas y desarrollo de microorganismos, debido entre otras cosas a los largos tiempos de secado. Entre las ventajas de la energía solar la más importante es que se trata de una energía libre, no contaminante, renovable y abundante que no puede ser monopolizada y satisface los requerimientos globales para el desarrollo sostenible. Por esta razón en los últimos años se han realizado numerosos intentos para desarrollar el secado solar principalmente para la conservación de productos agrícolas y forestales.

El método tradicional de secado al sol consiste en distribuir el producto en una capa fina sobre una superficie uniforme. El producto se remueve y voltea periódicamente durante el secado. La temperatura del producto durante el secado al sol oscila entre 5 y 15°C por encima de la temperatura ambiente y el tiempo de secado puede alcanzar 3 – 4 semanas. Las características del producto: color, forma y las condiciones de humedad iniciales y finales deseadas influyen sobre la temperatura del producto y el tiempo de secado. El secado al sol es ampliamente utilizado para el secado de granos, también de frutas y algunas hortalizas.

### **2.2.6. Tipos de secado al sol**

El método simple de secado utilizando directamente el sol presenta muchos problemas, tales como lluvia o tiempo nublado, contaminación por polvo, por insectos o por aves y la posibilidad de deterioro por desarrollo de microorganismos y de reacciones químicas y enzimáticas, debido a los largos tiempos de secado.

Por esta razón se han desarrollado otros métodos de secado que permiten utilizar la radiación solar como fuente de energía en mejores condiciones.

Ahora bien, la utilización de la radiación solar para un secado planificado presenta varias dificultades. Un problema básico es el carácter periódico de esta radiación, lo que ha llevado a pensar en la posibilidad de almacenar parte de la energía obtenida durante los períodos de insolación, por medio de dispositivos de acumulación del calor. Además, incluso en los períodos de radiación pueden producirse dificultades, la intensidad de la radiación incidente es función del tiempo, esto lleva a la necesidad de un adecuado control estratégico y de los medios necesarios para este control. Otro problema es el causado por la baja densidad energética de la radiación solar, que requiere grandes superficies de acumulación de energía.

La naturaleza de la radiación solar presenta problemas innatos que requieren medios para su solución tales como acumuladores de calor, fuente auxiliar de energía, sistema de control y gran superficie en colectores solares y en consecuencia los costes en inversiones son evidentemente mayores que en el secado al sol. Por lo tanto la energía solar puede ser utilizada económicamente para el secado sólo si su objetivo se puede coordinar con las características específicas de la radiación solar, así la situación geográfica que afecta al número de días de sol al año y a la intensidad de radiación incidente proporciona aumentos de energía en algunas zonas.

Las ventajas, citadas antes, de la energía solar han hecho que este tipo de secaderos despierten de nuevo interés, siendo muchos los estudios que se están realizando para mejorar su eficiencia. La energía solar se utiliza para secar

indirectamente granos, frutas, etc. Los secaderos solares difieren en el modo de calentamiento o en la forma en que se utiliza el calor procedente de la radiación solar.

La parte funcional más importante del secadero solar es el espacio de secado donde tiene lugar el proceso, en los secaderos solares que reciben directamente la radiación, el material a secar absorbe directamente la energía, en este caso, el espacio de secado tiene una cubierta transparente. En los secaderos indirectos por convección, el medio de secado es aire precalentado por la energía solar en un calentador, que convierte la radiación solar en calor. En los sistemas directos de transmisión de calor, el fluido de trabajo del calentador solar es el propio aire de secado.

Los secaderos solares se clasifican en tres grupos principales:

- Secadero solar natural.
- Secadero solar semi-artificial.
- Secadero solar asistido.

### **2.5.6.1. Secaderos solares naturales**

#### **2.5.6.1.1. *Secaderos solares directos***

Son el tipo de sencillo de secadero solar. Generalmente se utilizan para el secado de productos agrícolas, tales como frutas, forrajes y hortalizas.

En líneas generales constan de una superficie de secado cubierta por un material transparente, que protege al producto de la lluvia y de la polución. El material a secar se extiende en una capa fina sobre un fondo y es expuesto directamente a la radiación solar.

#### **2.5.6.1.2. *Secaderos solares indirectos***

En este tipo de secadero, la radiación solar no incide directamente sobre el producto a secar. El aire se calienta en un calentador solar y es conducido a la cámara de secado para deshidratar el producto. Generalmente se utilizan como colectores

placas solares para calentar el aire en aplicaciones que utilizan baja y moderada temperatura. La eficiencia de estos calentadores depende del diseño y de las condiciones de operación.

En la figura 2.7 aparece el esquema de un secadero de este tipo. El material a secar se coloca sobre bandejas perforadas situadas unas encima de otras. La pared frontal del secadero debe estar orientada al sur y la parte superior tiene una cubierta transparente (superficie selectiva), la pared trasera está aislada térmicamente, tanto esta pared como el fondo están recubiertos con una capa de pintura negra. El aire del ambiente se calienta con una placa absorbadora, unido al fondo de la caja y fluye por sí solo al espacio de secado. El aire húmedo sale al exterior.

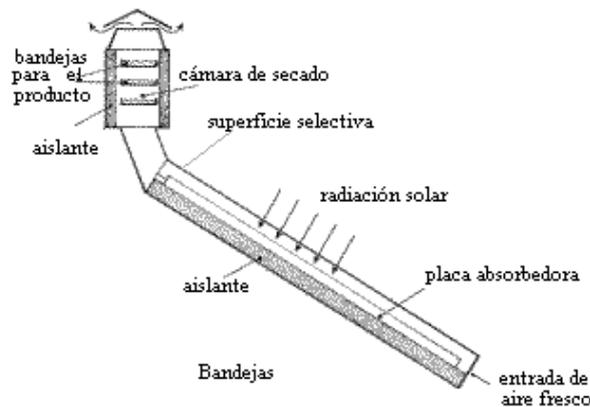


Figura 2.7. “Secador solar indirecto”

### 2.5.6.2. Secaderos solares semi-artificiales

En este tipo de secadero solar el caudal másico de aire requerido es proporcionado por un ventilador. Uno de los sistemas más extendido para el secado de productos agrícolas es el secadero solar de túnel. En la figura 2.8 se representa un esquema de este tipo de secadero con disposición en serie.

El túnel tiene una cubierta transparente la primera sección sirve como colector solar para precalentamiento del aire, la superficie del fondo de esta zona esta pintada de negro. La siguiente sección del túnel es el espacio del secado, el material a secar e extiende sobre el fondo y recibe directamente la radiación del sol.

La longitud del túnel se puede reducir situando en paralelo el colector y el espacio de secado.

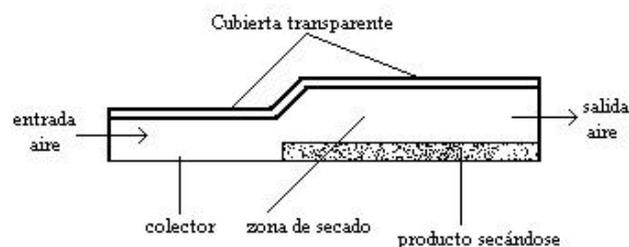


Figura 2.8. “Secadero solar de túnel (disposición en serie)”

### 2.5.6.3. Secaderos solares asistidos

Se trata de secaderos convencionales a los que se ha añadido equipamiento suplementaria, para poder utilizar una proporción significativa de energía térmica que reemplace la energía solar.

La conexión a los secaderos solares de un equipo para almacenamiento físico del calor se justifica principalmente por tres razones:

- El tiempo diario de secado puede ser ampliado a aquellas horas en que no hay sol.
- Se puede prevenir el sobre secado almacenando el exceso de energía solar recogida en los períodos de mayor radiación.
- Se puede controlar la temperatura de secado.

### **2.5.7. Secado por gases calientes**

Con este método, los gases calientes se ponen en contacto con el material húmedo a secar para facilitar la transferencia de calor y de masa, siendo la convección el mecanismo principalmente implicado. Se les llama también, por lo tanto, secaderos directos o por convección. Los gases calientes arrastran fuera del secadero los vapores producidos.

Los gases calientes pueden ser: aire calentado por medio de vapor de agua, gases de combustión y vapor recalentado. [10]

#### **2.5.7.1. Secaderos de horno**

Son los más simples. Constan de un pequeño recinto de forma de paralelepípedo de dos pisos. En el piso inferior se instala el quemador encargado de calentar el aire, que atraviesa, por convección natural o forzada, el lecho perforado sobre el que se asienta el lecho del producto a secar.

#### **2.5.7.2. Secaderos de bandejas o de armario**

Están formados por una cámara metálica rectangular (armario), en cuyo interior se disponen unos bastidores móviles. Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas colocándose sobre ellas el producto a secar. El ventilador colocado en la parte superior hace circular el aire por los calentadores y después entre las bandejas. El calentador está constituido por un haz de tubos en cuyo interior circula normalmente vapor de agua. El calor del medio de secado (aire caliente) se transmite al producto por convección; la corriente de convección pasa sobre el producto, no a través del mismo. El aire debe circular sobre la superficie del producto, como se ha dicho, a relativamente alta velocidad para aumentar la eficacia de la transmisión de masa y de la transferencia de masa.

### **2.5.7.3.Secaderos de túnel**

Los secaderos de túnel pueden presentar configuraciones diferentes pero en general son cámaras de secado rectangulares. Son semejantes a los secaderos de bandejas, pero de funcionamiento semi-continuo, para lo cual el producto a secar va colocado también sobre unas bandejas, que son transportadas por el interior del túnel en carretillas, que entran por un extremo con el producto húmedo y salen por el extremo opuesto con el producto seco.

### **2.5.7.4.Secaderos de cinta transportadora**

Son secaderos continuos con circulación de aire a través del material, que se traslada sobre un transportador de cinta perforada. Esta cinta suele ser de malla metálica o de lámina de acero perforada.

### **2.5.7.5.Secaderos rotatorios**

Son secaderos de funcionamiento continuo que constan de una carcasa cilíndrica que gira sobre unos soportes adecuados, por lo general esta carcasa esta ligeramente inclinada respecto a la horizontal.

El producto húmedo se introduce por un extremo del cilindro, avanza por él por gravedad, en virtud de la rotación del mismo y de la inclinación de la carcasa, y sale seco por el otro extremo. Cuando los gases calientes circulan en el sentido del avance del material, le ayudan a desplazarse a lo largo del secadero.

### **2.5.7.6.Secaderos de lecho fluidizado**

En ellos, el aire caliente se utiliza simultáneamente como agente de secado y de fluidización al ser forzado a pasar a través del lecho de partículas del alimento, con

una velocidad alta, suficiente para vencer las fuerzas gravitacionales del producto y mantener las partículas en estado suspendido. De este modo se consiguen grandes velocidades de transferencia de materia entre el sólido y el aire, y por lo tanto tiempos de secado muy cortos.

#### **2.5.7.7. Secaderos por arrastre neumático**

Son secaderos continuos de calentamiento directo, en los que la eliminación de la húmeda se realiza dispersando el producto a secar en una corriente de gases calientes que lo transportan a velocidades elevadas. El secado tiene lugar durante el transporte.

#### **2.5.8. Secaderos por conducción**

Este tipo de secaderos se caracterizan porque en ellos la transmisión de calor hasta el producto húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared, generalmente metálica, son por lo tanto secaderos indirectos. [10]

##### **2.5.8.1. Secaderos de bandejas a vacío**

Son secaderos indirectos por cargas, formados por una cámara herméticamente cerrada, provista de placas calefactoras y bandejas que soportan el material a secar. El elemento calefactor suele ser un fluido tal como agua caliente (para bajas temperaturas), vapor de agua o frecuentemente aceites térmicos.

El producto a secar se dispone sobre bandejas metálicas que se colocan sobre la superficie calefactora. El calor se transmite por conducción hasta el producto, que a baja temperatura libera vapores de disolvente debido al elevado grado de vacío que se aplica a la cámara.

### **2.5.8.2.Secaderos de tornillo sinfín**

Son secaderos continuos de calentamiento indirecto, formados esencialmente por un transportador de tornillo sinfín horizontal encerrado dentro de una carcasa cilíndrica encamisada. El producto, que se alimenta por un extremo, se transporta lentamente a través de la zona caliente y se descarga por el otro extremo.

### **2.5.8.3.Secaderos de rodillos**

En los secaderos de rodillos el producto se seca sobre la superficie de un rodillo giratorio calentado interiormente. El cilindro se calienta interiormente con vapor de agua a presión, o bien con menos frecuencia, con agua u otro, líquido transmisor de calor. El producto seco se separa en forma de película continua por medio de una cuchilla que rasca longitudinalmente la superficie del cilindro.

## **2.3. CONVECCIÓN NATURAL**

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido. Se acostumbra a utilizar el término “convección”

cuando se hace referencia a este transporte acumulado y el término “advección” cuando se habla del transporte debido al movimiento volumétrico del fluido.

Estamos especialmente interesados en la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando éstos tienen diferentes temperaturas. Considere el flujo del fluido sobre la superficie calentada de la figura 2.9.

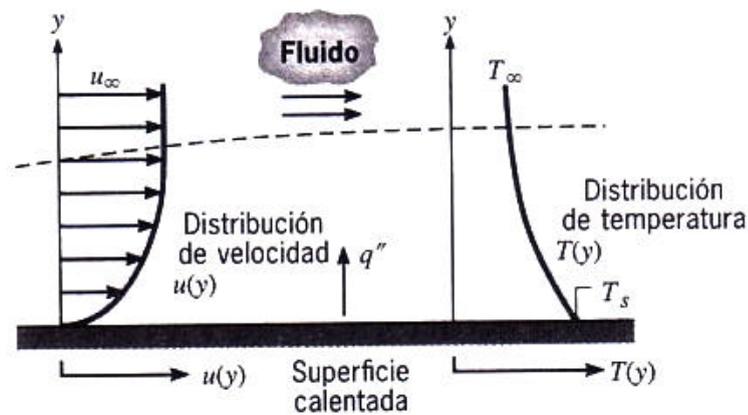


Figura 2.9. “Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección”

Una consecuencia de la interacción fluido-superficie es el desarrollo de una región en el fluido en la que la velocidad varía de cero en la superficie a un valor finito  $U_\infty$  asociado con el flujo. Esta región del fluido se conoce como capa límite hidrodinámica. Más aún, si las temperaturas de la superficie y del fluido difieren, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varía de  $T_s$  en  $y = 0$  a  $T_\infty$  en el flujo exterior. Esta región denominada capa límite térmica, puede ser más pequeña, más grande o del mismo tamaño que aquella en la que varía la velocidad. En cualquier caso, si  $T_s > T_\infty$ , ocurrirá la transferencia de calor por convección entre la superficie y el flujo exterior.

El modo de transferencia de calor por convección se sustenta tanto en el movimiento aleatorio molecular como en el movimiento volumétrico del fluido en la

capa límite. La contribución debida al movimiento molecular aleatorio (difusión) domina cerca de la superficie donde la velocidad del fluido es baja. De hecho, en la interfaz entre la superficie y el fluido ( $y = 0$ ), la velocidad del fluido es cero y el calor se transfiere sólo por este mecanismo. La contribución debida al movimiento volumétrico del fluido se origina del hecho de que la capa límite crece a medida que el flujo avanza en la dirección “x”. En efecto, el calor que se conduce en esta capa es arrastrado corriente abajo y finalmente se transfiere al fluido fuera de la capa límite. La apreciación de los fenómenos de la capa límite es esencial para la comprensión de la transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Hablamos de “convección forzada” cuando el flujo es causado por medios externos. En cambio, la “convección libre o natural” el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura del fluido.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es la forma:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \text{ Ec. 2.8}$$

donde  $q''$ , el flujo de calor por convección ( $\text{W/m}^2$ ), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido,  $T_s$  y  $T_\infty$ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la “ley de enfriamiento de Newton”, y la constante de proporcionalidad “ $h$ ” ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ) se denomina “coeficiente de transferencia de calor por convección”. Éste depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte.

Cuando se utiliza la ecuación anterior, se supone que el flujo de calor por convección es “positivo” si el calor se transfiere desde la superficie (  $T_s > T_\infty$  ) y “negativo” si el calor se transfiere hacia la superficie (  $T_\infty > T_s$  ) [16].

Considere ahora situaciones en las que no hay velocidad forzada y en las que, no obstante, aún hay corrientes de convección dentro del fluido. Tales situaciones se denominan de convección libre o natural. En la convección libre, el movimiento del fluido se debe a las fuerzas de empuje dentro de este. El empuje se debe a la presencia combinada de un gradiente de densidad del fluido y de una fuerza de cuerpo que es proporcional a la densidad. Las fuerzas de cuerpo se deben a los campos gravitacional, centrífugo, centrípeto, magnético y/o eléctrico.

En la convección libre se introduce un número adimensional que juega el mismo papel que el número de Reynolds (Re) en la convección forzada y es el número de Grashof ( $Gr_x$ ), la cual indica la razón que hay entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, y viene expresado por la siguiente ecuación:

$$Gr_x = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * x^3}{\nu^2} \quad \text{Ec. 2.9}$$

$\beta$  es el coeficiente volumétrico de expansión térmica, proporciona una medida de la cantidad por la cual cambia la densidad en respuesta a un cambio en la temperatura a presión constante y está definido por:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad \text{Ec. 2.10}$$

donde T es la temperatura absoluta.

Siendo  $g$  la fuerza de gravedad, es importante destacar que se debe sustituir  $g \rightarrow g \cdot \cos\theta$  cuando el ángulo de inclinación de la superficie varía en un rango de  $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ .

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

Sin embargo, sabemos que las propiedades del fluido varían con la temperatura a través de la capa límite y que esta variación influirá en la transferencia de calor, esta influencia podemos manejarla con todas las propiedades evaluadas a una temperatura media de la capa límite " $T_f$ ", que se denomina temperatura de película y viene expresada de la siguiente forma:

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Si se satisface la desigualdad  $(Gr_L / Re_L^2) \gg 1$ , los efectos de convección forzada se pueden ignorar y el número de Nusselt local  $Nu_L = f(Gr_L, Pr)$ . En sentido estricto, un flujo de convección libre es uno que se induce solo mediante fuerzas de flotación, en cuyo caso no hay una velocidad de convección forzada bien definida y  $(Gr_L / Re_L^2) = \infty$ .

Por otra parte, mediante estudios que se han realizado acerca de la convección libre laminar [16] se ha obtenido una manera de evaluar el número de Nusselt local ( $Nu_x$ ), que no es más que el gradiente de temperatura adimensional en la superficie y proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie. El número de Nusselt local se define de la siguiente manera:

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot x}{k} = \left( \frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4} \cdot g(Pr) \quad \text{Ec. 2.12}$$

siendo  $k$  la conductividad térmica del fluido y sabiendo que el gradiente de temperatura adimensional en la superficie es una función del número de Prandtl, se puede evaluar mediante la siguiente fórmula:

$$g(\text{Pr}) = \frac{0.75 * \text{Pr}^{1/2}}{(0.609 + 1.221 * \text{Pr}^{1/2} + 1.238 * \text{Pr})^{1/4}}; \quad \text{donde } 0 \leq \text{Pr} \leq \infty \quad \text{Ec. 2.13}$$

## **2.4. PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA, CONSERVACIÓN DE MASA Y PSICROMETRÍA**

### **2.4.1. Primera Ley de la Termodinámica (Ley de conservación de la energía) y conservación de la masa (continuidad)**

Para aplicar la primera ley, necesitamos primero identificar el volumen de control, una región de espacio limitada por una superficie de control a través de la cual pueden pasar la energía y la materia (figura 2.10). [24]

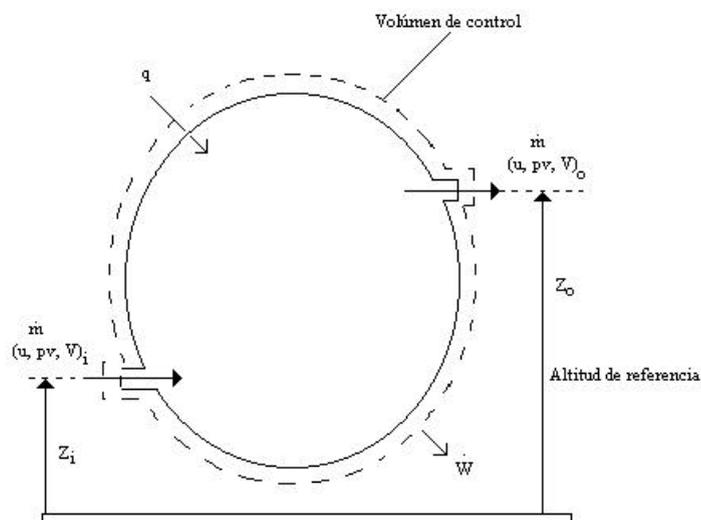


Figura 2.10. "Volumen de control aplicado a un sistema abierto"

El requerimiento de conservación de la energía para un sistema abierto, donde el flujo de masa proporciona el transporte de energía interna, cinética y potencial

hacia dentro y fuera del sistema. En tales casos, es habitual dividir el intercambio de la energía en forma de trabajo en dos contribuciones. La primera contribución, denominada trabajo de flujo, se asocia con el trabajo realizado por fuerzas de presión que mueven el fluido a través de la frontera del sistema. Para una masa unitaria, la cantidad de trabajo es equivalente al producto de la presión por el volumen específico del fluido ( $p \cdot v$ ). Respecto a todos los otros trabajos se supone que los realiza el sistema y se incluyen en el término  $\dot{W}$ . De aquí, si se supone que se transferirá calor al sistema, no ocurre conversión de energía dentro de éste, y la operación se encuentra en condiciones de estado estable. La ecuación de balance de energía se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{m} \left( u + pv + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_i - \dot{m} \left( u + pv + \frac{V^2}{2} + gZ \right)_o + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde  $u + pv = h$ ,  $\dot{W} = 0$  y suponiendo que no existe una variación de la masa

$$\dot{m} = \dot{m}_i = \dot{m}_o \quad \text{Ec. 2.15}$$

La ecuación 2.13 se puede describir de la siguiente manera

$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i = h_o + \frac{V_o^2}{2} + gZ_o \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde  $q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$ .

### 2.4.2. Psicrometría

El aire que compone nuestra atmósfera es una mezcla de gases ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar,  $CO_2$ ,  $H_2$ , Ne, He, Kr, Xe) entre los cuales destacan principalmente el nitrógeno y el oxígeno. Para fines prácticos el aire puede considerarse como una mezcla de  $N_2$  y  $O_2$  (aire seco) y de vapor de agua (humedad). El aire atmosférico nunca estará libre de agua por completo por lo tanto hablaremos de aire húmedo.

Si el vapor está a la presión y temperatura de saturación, la mezcla se conoce como una mezcla saturada, y para la mezcla aire – vapor se utiliza el término aire saturado.

La humedad relativa  $\phi$  se define como la relación entre la presión de vapor del aire y a la presión que tendría si estuviese saturado de humedad a la misma temperatura.

$$\phi = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad \text{Ec. 2.17}$$

La relación de humedad “w” de una mezcla de vapor de agua y aire se define como el cociente de la masa del vapor de agua “ $m_w$ ” entre la masa de aire seco “ $m_s$ ”. El término humedad específica se utiliza como sinónimo de relación de humedad

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad \text{Ec. 2.18}$$

La entalpía del aire húmedo es la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua.

$$h = h_s + wh_v \quad \text{Ec. 2.19}$$

donde

$$h_s = C_p * \Delta T$$

$$h_v = h_g = \text{entalpía de vapor saturado}$$

Por lo tanto, sustituyendo la ecuación 2.19 en la ecuación 2.14 y agrupando términos nos queda

$$\dot{H}_o = m_s \left[ h_s + w * h_v + \frac{V^2}{2} * (1 + w) + g * Z * (1 + w) \right]_{i,e} \quad \text{Ec. 2.20}$$

donde  $\dot{H}_o$  es la entalpía entre la entrada y la salida del volumen de control.

## **2.5. TIPOS DE COLECTORES Y/O CALENTADORES SOLARES**

### **2.5.1. Colectores solares planos**

Un colector solar es una especie de intercambiador de calor que transforma la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido (agua o aire generalmente) que circula por los tubos o ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.29 y 2.5  $\mu\text{m}$ ) y es por naturaleza variable con el tiempo. En condiciones óptimas podemos esperar como máximo, flujos de 1100  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares planos son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100  $^{\circ}\text{C}$ .

Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la

energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de frutas y granos.

### **2.5.2. Descripción general de un colector solar plano**

La energía solar incidente, tiene que atravesar una o varias capas de vidrio o algún otro material transparente adecuado, antes de alcanzar la placa de absorción negra que es el elemento más importante del colector solar, al cual está unido el tubo o ducto. En esta placa, es donde la energía radiante es convertida en calor. Este calor, posteriormente es transferido por convección (si el fluido de trabajo es aire) o por conducción (si el fluido es agua), que es el que finalmente remueve la energía térmica del colector y la transfiere al tanque de almacenamiento térmico o al espacio o producto que va a ser calentado, según la aplicación que se le esté dando. El vidrio (superficie selectiva) o su equivalente, además de permitir la entrada de la radiación solar hasta la placa absorbidora, sirve también para minimizar las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente por la parte superior del colector.

El aislante térmico (espuma de poliuretano, poliestireno, lana de fibra de vidrio o algún otro) colocado en la parte posterior y lados del colector, disminuye también las pérdidas de calor hacia el medio ambiente en esas partes. Todas las partes mencionadas se encuentran dentro de una caja que sirve como parte estructural del colector y que puede ser hecha de diversos materiales como lámina metálica, madera o plástico.

### **2.5.3. Tipos de colectores solares planos**

Los colectores solares planos pueden ser divididos en dos categorías básicas: los que utilizan como fluido de trabajo un líquido (agua) y los que utilizan un gas (aire). En general los que calientan aire manejan flujos mucho más grandes que los que calientan agua. También podemos decir que cuando se trabaja con un líquido, este fluye normalmente por un tubo adherido a la placa absorbidora o aleta; mientras que cuando se utiliza un gas, este fluye por un ducto que forma parte de la placa absorbidora y que además puede tener muy diversas formas.

#### **2.5.3.1. Placas absorbedoras para calentamiento de líquidos**

En general las placas de absorción pueden estar formadas por tubos con aleta individuales o bien, utilizando una sola placa de absorción, a la cual se le adhieren los tubos.

#### **2.5.3.2. Placas absorbedoras para calentamiento de gases**

En general se pretende que dentro del colector haya una gran área de contacto entre la placa absorbidora y el aire circulando a través del colector, para asegurar una óptima transferencia de calor.

La radiación solar desempeña un importante papel en muchos procesos ambientales. Todas las fuentes de energía que emplea el hombre se derivan del sol y las plantas dependen de esa energía para la fotosíntesis y el desarrollo.

La placa absorbidora es el elemento más importante de todo sistema para el uso directo de la energía solar, el cual transforma la radiación solar en energía para calentar el aire.

Una parte importante de los colectores planos es su superficie absorbadora, que es esencialmente plana, pero que puede ser perforada, corrugada, provista de aletas o rugosa.

La superficie absorbe energía solar, se calienta y luego transfiere el calor al aire. Los colectores planos, en su mayor parte, son fijos. Recogen la radiación directa y difusa, lo que permite calentar el aire incluso en días nublados, cuando toda la radiación incidente es difusa.

Entre algunas de las ventajas del uso de colectores solares para calentar el aire se cuentan las siguientes: a) su utilización para el secado es directa; b) no produce contaminación ni corrosión del sistema de distribución del aire y es fuente inagotable de energía; c) las pérdidas de energía no constituyen problema serio, puesto que los aumentos medios necesarios para el secado de granos son relativamente pequeños; y d) el material y la tecnología de la construcción de colectores solares planos son generalmente sencillos.

Los principales inconvenientes son: a) la disponibilidad de energía solar es variable y para el secado de granos se la puede aprovechar en pequeña escala solamente; b) los coeficientes de transferencia de energía son bajos, debido a las limitaciones de la velocidad del aire. Si esta última fuese demasiado alta, habría grandes incrementos en la pérdida de carga del sistema y habría que emplear ductos de aire relativamente grandes en el colector solar; y c) la vida útil del colector solar es normalmente inferior a la de los demás sistemas de secado.

### **2.5.3.3. Colector solar plano con superficie absorbadora y lámina transparente**

Los colectores solares planos con superficie absorbadora cubierta por una lámina transparente se componen de una placa, generalmente metálica, pintada de negro opaco, que absorbe la radiación solar y está cubierta por una película semitransparente (plástico rígido o flexible, o vidrio), la que actúa como aislante

térmica en la parte superior. En la parte inferior el colector lleva aislamiento térmico con materiales como lana de vidrio o poliestireno, entre otros.

#### **2.5.3.4. Colector solar plano con superficie absorbadora suspendida**

Los colectores solares planos de superficie absorbadora suspendida se caracterizan por el paso del flujo de aire por debajo o por los costados de la superficie absorbadora

#### **2.5.3.5. Colector almacenador de energía solar con cubierta transparente**

Los colectores almacenadores de energía solar con cubierta transparente acumulan una parte de la energía solar en forma de calor sensible, en un lecho de piedras por ejemplo, que actúa como superficie absorbadora, atenuando las elevaciones bruscas de temperatura y promoviendo la estabilidad relativa de sus incrementos. El colector almacenador continúa calentando el aire durante cierto tiempo después de la puesta de sol, debido a la temperatura almacenada en el lecho absorbador. La magnitud de dicho incremento de temperatura y de los períodos adicionales de funcionamiento del sistema dependen de varios factores, tales como: flujo de aire, radiación solar incidente, espesor del lecho de piedras y otros detalles de la construcción del colector.

#### **2.5.4. Orientación y ángulo de inclinación de los colectores solares planos**

La inclinación óptima diaria de un colector solar se puede determinar en función del ángulo de declinación diaria del sol y de la latitud (Ver APÉNDICE C).

### **2.5.5. Colectores concentradores**

Existen muchas aplicaciones, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas. Para obtener temperaturas altas (superiores a los 100 °C), se hace necesario incrementar la intensidad de la energía solar. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbadora, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico.

#### **2.5.5.1. Diferentes tipos de colectores concentradores.**

Existe una gran variedad de colectores concentradores, pero podemos decir que todos ellos pueden clasificarse en dos categorías básicas: los de enfoque y los fijos o semifijos. Los concentradores de enfoque constan fundamentalmente de tres partes: el concentrador o sistema óptico, el receptor donde se encuentra el absorbedor y un mecanismo de seguimiento para el sol. Los de enfoque necesitan forzosamente un mecanismo para seguir el sol y con ellos se pueden lograr altas temperaturas en el absorbedor. Los fijos o semifijos no necesitan del mecanismo para seguir al sol, pero sólo se pueden obtener temperaturas moderadas. Podemos tener una gran variedad de concentradores, receptores y tipos de mecanismos para seguir el sol, como se muestra enseguida.

#### **2.5.5.2. Concentradores de enfoque**

Para poder obtener las más altas temperaturas posibles, el concentrador de enfoque debe tener la capacidad de formar una imagen nítida del disco solar en el receptor y este debe ser del tamaño mínimo que pueda contener esa misma imagen del sol.

### **2.5.5.3. Concentradores fijos o semifijos**

Es bueno considerar este tipo de colectores concentradores debido a que requieren un mínimo de seguimiento al sol e incluso pueden permanecer definitivamente en forma estacionaria. Además, tienen la capacidad de también aprovechar la radiación difusa. Las temperaturas que podemos obtener con estos dispositivos son moderadas, pero aún así son de interés debido a que un gran porcentaje del calor requerido en los procesos industriales y comerciales, requieren de temperaturas relativamente bajas.

### **2.5.5.4. Colectores fotovoltaicos**

Las principales aplicaciones de la energía solar son de tipo térmico, donde la energía luminosa, mediante diversos mecanismos se aprovecha en forma de calor. Sin embargo, existe una aplicación no fototérmica de mucha importancia que consiste en la producción de electricidad a partir de la radiación solar mediante celdas solares y paneles fotovoltaicos.

## CAPÍTULO III

### 3.1. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se desarrolla la metodología utilizada en el transcurso de la investigación. Se muestran los cálculos realizados en las diferentes etapas que comprenden el estudio experimental de este trabajo especial de grado. También se exponen datos utilizados y obtenidos por otras fuentes. De manera breve el siguiente capítulo comprende: Datos climáticos de Chuao, determinación del contenido de humedad inicial del cacao, construcción del túnel de secado, realización de las curvas de secado, determinación de la humedad crítica, tiempo crítico, tiempo de secado; construcción de un prototipo de calentador solar de aire, mediciones de temperaturas en la placa absorbadora, en la superficie selectiva, velocidad del aire en convección natural dentro del calentador solar. También se muestra el desarrollo del modelo matemático del calentador solar de aire y por último se hará un breve estudio de la cámara de secado.

### 3.2. DATOS CLIMÁTICOS DE LA REGIÓN DONDE SE COSECHA EL CACAO (CHUAO).

La información climática es suministrada por el servicio de meteorología agrícola del FONAIAP (Maracay) [25].

**Precipitación:** En el período de 1980 y 1993 la precipitación ha variado de 989 a 467 mm anuales, encontrándose una marcada diferencia entre la época más lluviosa y la más seca, el período lluvioso se inicia en el mes de mayo y finaliza entre los meses de septiembre y octubre, dando paso a un período seco que se prolonga hasta 6 meses hasta el inicio de las lluvias.

**Temperatura:** La temperatura media entre 1980 y 1993 registró un valor promedio de 27,75 °C existiendo poca amplitud térmica entre las temperaturas anuales y las mensuales.

**Evaporación:** 900 mm anuales. humedad Relativa: 68,1 % Recursos hídricos superficiales El área cacaotera de esta Zona se caracteriza por tener una precipitación fluvial promedio comprendida entre 800 y 1000 mm por año.

También se obtuvo una data importante en el Ministerio del Ambiente [13] (Ver ANEXO 1), valores medidos directamente en la zona bajo estudio (Chua) por una antigua estación meteorológica que en la actualidad no existe.

**Irradiación:** En la zona costera aragüeña no existen estaciones meteorológicas con la disponibilidad de medir la irradiación diaria, irradiación anual, insolación, etc; por lo tanto, se realizó una búsqueda de dichos valores en la data de las Fuerzas Armadas [13] ( Ver ANEXO 2). Es relevante destacar que la data obtenida es elemental en un estudio para el diseño de cualquier aparato que funcione con energía solar, ya que, con estos valores se puede estimar cuanta potencia por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) llega a la superficie terrestre en un tiempo determinado, por ende, se puede evaluar si es viable la construcción de cualquier aparato comparando estos valores con los necesarios para proceso en estudio.

Es importante aclarar que los valores de la quinta columna (Cuadro 3.1) de irradiación ( $W/m^2$ ), se refiere a la suma de la radiación difusa y la radiación directa incidente en ese momento sobre una superficie horizontal ubicada en la tierra.

Promedio radiación directa y difusa (periodo 1955-1970)			Promedio Insolación, Horas (periodo 1951-1970)	
mes	irradiación (cal/cm <sup>2</sup> )	irradiación (kwh/m <sup>2</sup> )	horas	irradiación (W/m <sup>2</sup> )
Enero	450	5,2335	7	747,6429
Febrero	500	5,8150	7	830,7143
Marzo	560	6,5128	7	930,4000
Abril	525	6,1058	6,5	939,3462
Mayo	475	5,5243	6,5	849,8846
Junio	525	6,1058	6,5	939,3462
Julio	525	6,1058	8	763,2188
Agosto	525	6,1058	8	763,2188
Septiembre	500	5,8150	8	726,8750
Octubre	475	5,5243	7,5	736,5667
Noviembre	450	5,2335	7,5	697,8000
Diciembre	450	5,2335	7,5	697,8000

Cuadro 3.1. "Irradiación anual en Chuao, Estado Aragua"

En el cuadro 3.1 se dan las radiaciones directa y difusa durante todo el año, en él podemos observar que Venezuela por estar a una latitud de 10° Norte posee un rango de radiación solar de 697 - 940 W/m<sup>2</sup> aproximadamente, por lo que el secado al sol es una buena opción para la deshidratación de cacao.

### **3.3. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL DEL CACAO**

Para calcular la humedad inicial en el cacao se siguió el procedimiento normalizado según la AOAC (Asociación de Químicos Analíticos) [15]. Primero se tomaron las bandejas de aluminio las cuales estaban dentro de una estufa para eliminar la humedad presente en estas, se colocaron las bandejas dentro de un desecador durante 25 minutos con el fin de eliminar la humedad residual. Pasado este tiempo se pesó cada bandeja para saber su masa; luego se tomaron dos gramos de cacao previamente molido y se introdujeron en cada bandeja, así se obtendría una masa total que sería la suma de la masa de la bandeja más los dos gramos de cacao. Inmediatamente se metieron las bandejas nuevamente en el desecador para evitar que la muestra de cacao gane o pierda humedad. A continuación se colocaron las bandejas

en una estufa por 24 horas a una temperatura de 100 °C. Posteriormente se tomaron las bandejas y se introdujeron en el desecador nuevamente durante 25 minutos para volverlas a pesar y así poder calcular el contenido de humedad, por medio de la diferencia de masa inicial y masa final. El contenido de humedad se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{Humedad} = \frac{(\text{masa inicial} - \text{masa final})}{(\text{masa inicial} - \text{masa de la bandeja vacía})} * 100 \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde la masa inicial es la masa de la bandeja vacía más la masa de la muestra.

Para el cálculo de la humedad final real de la muestra se utilizó el valor de la humedad final teórica, este valor es dado por la Legislación Francesa y para el cacao tiene un valor de 6 - 7 % y un límite máximo de 8 % de humedad [3]. La humedad real viene expresada por:

$$H_f = \frac{m_i * H_0 - 100 * m_w}{m_i - m_w} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde  $H_f$  es la humedad final real,  $m_i$  es la masa inicial de la muestra,  $m_w$  es la masa de agua evaporada de la muestra y  $H_0$  es la humedad inicial de la muestra.

### **3.4. CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE SECADO**

Para el estudio del proceso de deshidratación del cacao se diseñó y se construyó un túnel de secado. Dicho túnel estaba compuesto de un ventilador con su respectivo reóstato para variar su velocidad de giro, dos resistencias calentadoras de 1100W cada una con reóstatos individuales, una tobera, una cesta de alambre, una

balanza eléctrica y los instrumentos de medición de temperatura, humedad y velocidad (Tri – sense).

Una breve descripción del funcionamiento del túnel es la siguiente: el ventilador fuerza una corriente de aire atmosférico en el punto 1, que es la entrada del túnel, ingresa un caudal de aire con sus propiedades termodinámicas (humedad relativa, temperatura); luego pasa por unas resistencias eléctricas que están ubicadas de manera que ocupen el área periférica del túnel en ese punto, allí se le cambian las propiedades termodinámicas al aire por medio de un calentamiento sensible, es decir, manteniendo la humedad absoluta constante, aumentando la temperatura del aire y disminuyendo la humedad relativa del mismo; luego este aire pasa a través de una tobera (punto 2) para direccionar el flujo de aire caliente hacia la cesta contentiva de producto húmedo (cacao), de esta manera se garantiza que todo el aire caliente pase por el producto. La masa del producto húmedo es indicada en la balanza cada cierto tiempo, se leen y registran las variables del proceso;  $V_1, T_1, \phi_1$  ,  $V_2, T_2, \phi_2$  ,  $V_3, T_3, \phi_3$ . Una vez que este aire pasa a través del producto (punto 3) que posee una humedad inicial alta, cerca del 60% específicamente para el cacao, vuelven a cambiar sus propiedades termodinámicas, aumenta la humedad relativa, disminuye la temperatura y la humedad absoluta también aumenta; por ser un enfriamiento latente.

A continuación se muestra un breve esquema del túnel de secado, especificando los puntos donde varían las propiedades termodinámicas del aire; es importante destacar que los puntos de mediciones de dichas propiedades se realizaron en las zonas demarcadas con puntos rojos en el esquema.

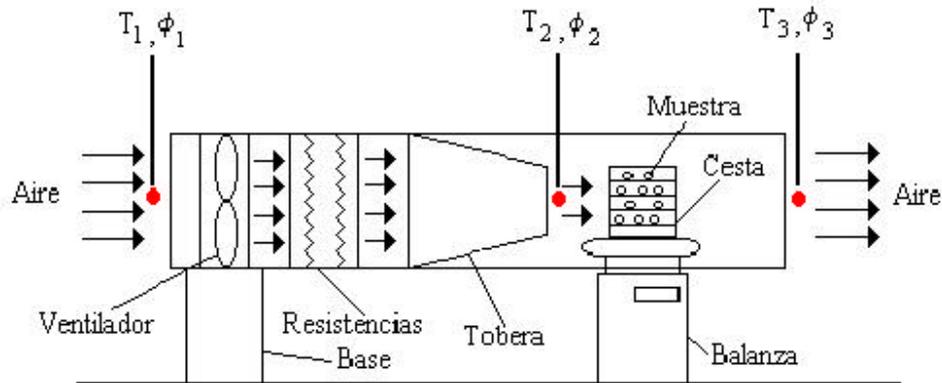


Figura 3.1. “Túnel de Secado”

Se realizaron 7 pruebas diferentes en el túnel de secado; la primera prueba tuvo los siguientes parámetros de operación: el ventilador a 700 r.p.m, una humedad inicial del cacao del 49,1%, y una masa inicial de producto de 45 gr. Por medio de esta prueba se obtuvo las curvas de velocidad de secado; las cuales relacionan la masa de materia húmeda con la masa de materia seca, obteniéndose la diferencia de peso que se medía en la balanza eléctrica, dispuesta dentro del túnel con mediciones de cada media hora; una vez que se observó que ya no existía variación de peso apreciable de la muestra se detuvo el experimento y se realizaron los cálculos de la humedad para cada medición, donde la humedad se expresa por medio de la ecuación 2.18.

tiempo (min.)	mw (g)	ms (g)	m (g)	wj (kgw/kgs)
0	140,3853	<b>145,6146</b>	286,00	0,9640
30	136,2130	141,2869	277,50	0,9354
60	134,9859	140,0140	275,00	0,9270
90	134,4950	139,5049	274,00	0,9236
120	133,7588	138,7411	272,50	0,9185
150	133,2679	138,2320	271,50	0,9152
180	133,0225	137,9774	271,00	0,9135
210	132,5316	137,4683	270,00	0,9101
240	132,2862	137,2137	269,50	0,9084
270	132,1635	137,0864	269,25	0,9076
300	132,0408	136,9591	269,00	0,9067
330	132,0408	136,9591	269,00	0,9067

Cuadro 3.2. “Datos experimentales”

Donde “mw” es la masa en base húmeda en gramos, “ms” es la masa en base seca en gramos, “m” es la masa de producto total en gramos y “wj” es la humedad variable en kgw/kgs durante la prueba. Para el cálculo de “mw” se tomó el valor de la humedad inicial, en este caso 0,490858; y se multiplicó por la masa total del producto, de manera similar se calculó “ms”, multiplicando la masa total por la diferencia de la unidad y el porcentaje de humedad inicial de la muestra, para este caso 0,509142. Para los valores de “wj” se procedió a aplicar la ecuación 2.18.

Luego se procedió a la realización de la gráfica humedad vs. tiempo con los datos obtenidos anteriormente, como se muestra en la figura siguiente:

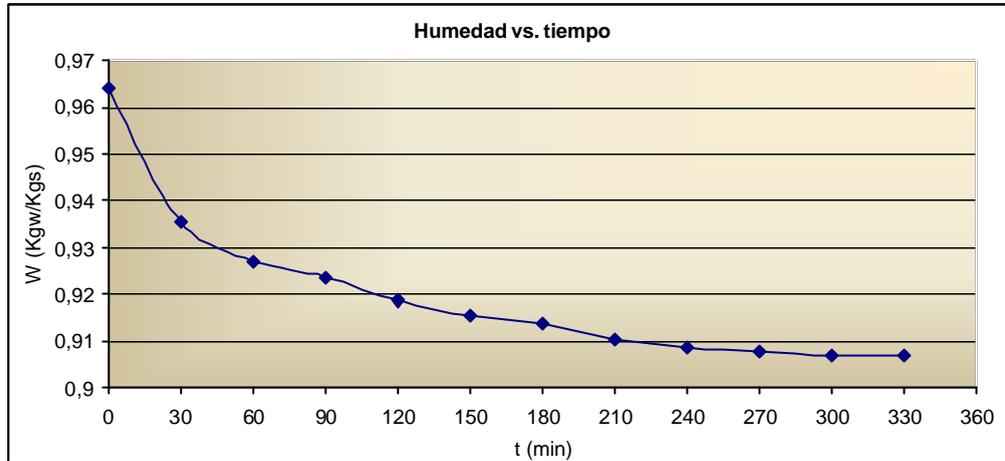


Figura 3.2. “Curva de secado: humedad vs. tiempo”

Este mismo procedimiento se repitió las seis veces restantes (Ver APÉNDICE A); con la variación de algunos de los parámetros de operación; estas pruebas se resumen con sus respectivas modificaciones en el siguiente cuadro:

Prueba	Tipo de cacao	Humedad inicial (%)	r.p.m. Ventilador	Potencia resistencias (w)
1	fresco	49,08	700	2200
2	fresco	56,82	700	2200
3	fresco	56,69	700	2200
4	fresco	63,24	700	2200
5	fermentado	55,94	700	2200
6	fermentado	55,94	700	1100
7	fermentado	55,94	< 700	1100

Cuadro 3.3. “Datos de todas las experiencias realizadas en el túnel de secado variando parámetros en cada prueba”

En la siguiente figura se hace una comparación del comportamiento de la velocidad de secado para el cacao fermentado variando la temperatura y el flujo de aire.

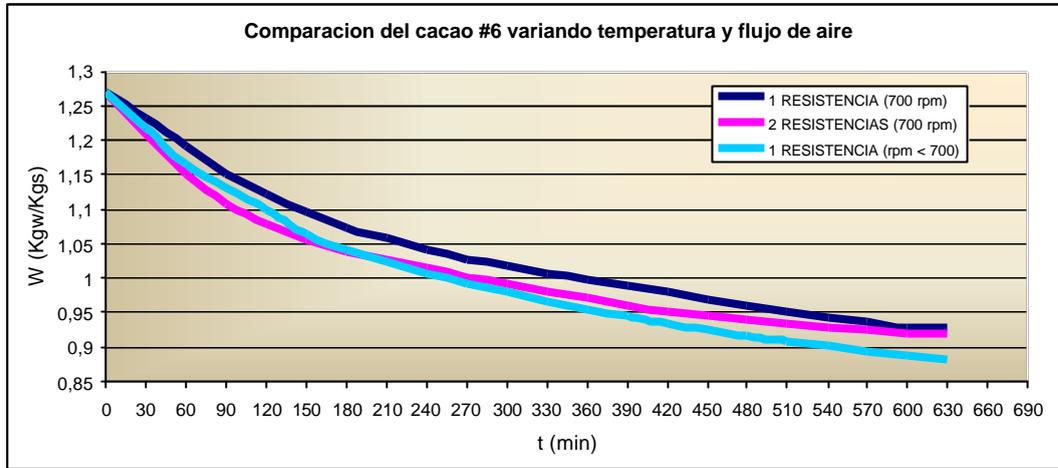


Figura 3.3. “Comparación de la velocidad de secado del cacao fermentado variando la temperatura y el flujo de aire”

En la figura 3.3 se observa una comparación de la velocidad de secado del cacao fermentado variando la temperatura y el flujo de aire. Comparando estos resultados con las figuras 2.4 y 2.5, en donde se muestran los efectos de la temperatura y la velocidad del aire en el proceso de secado, respectivamente; podemos constatar que al aumentar la temperatura del aire se aumenta la velocidad en la eliminación de agua de la muestra pero contrario a la figura 2.5 podemos observar que al aumentar la velocidad del aire de secado trae como consecuencia una humedad final de la muestra más alto que si se utiliza una velocidad más baja empleando el mismo tiempo en ambos procesos.

Una vez obtenidas todas las curvas de secado; se procedió a estimar para cada caso la humedad crítica del producto, siendo la humedad crítica el punto donde existe el cambio más notable de pendiente en la curva; por lo tanto, se tomó la curva respectiva y se dividió por aproximaciones lineales en pequeños intervalos, una vez conocidas las ecuaciones de estas curvas linealizadas se derivaron, obteniendo así las pendientes respectivas, de esta manera se fueron verificando en que punto se hacia el cambio de pendiente más notable, el cual fue tomado como la humedad crítica ( $w_c$ ).

Estos pasos se observan en el siguiente grafico que corresponde a la primera experiencia:

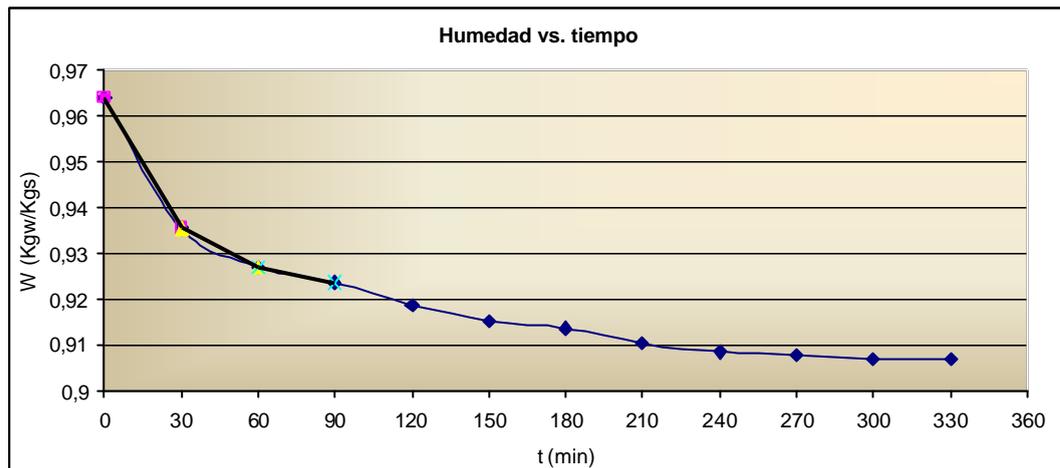


Figura 3.4. "Curva de secado: Aproximaciones lineales para la estimación de la humedad crítica"

Como se observa en el gráfico tenemos tres linealizaciones de la curva en los primeros 90min, es obvio que el cambio más notable de pendiente se encuentra en este rango de tiempo; por lo tanto con la derivada de estas ecuaciones que aparecen en el gráfico se obtuvo lo siguiente:

Rectas	Pendientes	cambio de pendiente
Y	Y'	$\Delta m$
$-0,001x + 0,9641$	-0,001	0
$-0,0003x + 0,9439$	-0,0003	<b>-0,0007</b>
$-0,0001x + 0,9338$	-0,0001	-0,0002

Cuadro 3.4. "Cambios de pendientes de las aproximaciones lineales"

Donde se observa que el punto donde se localiza la humedad crítica para esta experiencia es en el cambio de pendiente entre la primera y la segunda recta, que corresponde a un tiempo crítico de 30min y una humedad crítica de 0,9354

(kgw/kgs). En el APÉNDICE A se explica con más detalle el cálculo del tiempo y la humedad crítica para todas las pruebas realizadas, se muestran las figuras y cuadros complementarios a cada prueba.

A continuación se muestra un cuadro resumen de todas las experiencias mostrando sus humedades críticas con sus respectivos tiempos críticos.

Prueba	Tipo de cacao	Humedad Critica (Kgw/Kgs) "Wc"	Tiempo critico tc (min.)
1	Fresco	0.9354	30
2	Fresco	1.2056	90
3	Fresco	1.2876	30
4	Fresco	1.7019	30
5	Fermentado	1.1521	60
6	Fermentado	1.1526	90
7	Fermentado	1.1645	60

Cuadro 3.5. "Humedades y tiempos críticos para cada prueba"

Es importante señalar que las pruebas relevantes para esta investigación son las que provienen del cacao fermentado; debido a que el fermentado es el proceso anterior al secado; las demás experiencias fueron pruebas realizadas para la verificación del funcionamiento del túnel.

También cabe destacar que las muestras frescas fueron las primeras que se pudieron obtener debido a circunstancias relacionadas con la producción y las fermentadas fueron obtenidas algún tiempo después; las primeras experiencias son importantes ya que se observa en las características de la totalidad de las muestras tanto fermentadas como frescas, que la humedad inicial no varía considerablemente; por ende con estas experiencias lo que se busca es verificar las diferencias de secado de las diferentes clases de cacao. De todas maneras hay que especificar que en la zona bajo estudio (CHUAO) el fermentado y el secado del producto se realizan mezclando todas las variedades existentes de cacao en la zona; por eso la importancia de las tres últimas experiencias con las muestras heterogéneas fermentadas. Lo que garantiza

una continuidad de la investigación, ya que se tomó en consideración el proceso de secado para las muestras fermentadas específicas de la zona.

Las humedades finales reales para las tres pruebas finales, son estimadas de acuerdo a lo expuesto en el APÉNDICE A, a continuación se resumen dichas humedades en el siguiente cuadro:

Prueba	mi (g)	mw (g)	Ho (%)	Hf (%)
5	334,0000	174,0525	55,9426	16,3910
6	401,2500	209,0975	55,9426	22,8033
7	604,0000	314,7536	55,9426	20,2078

Cuadro 3.6. “Humedades finales reales para las diferentes pruebas”

Los diferentes periodos de velocidad de secado se aprecian en la siguiente figura:

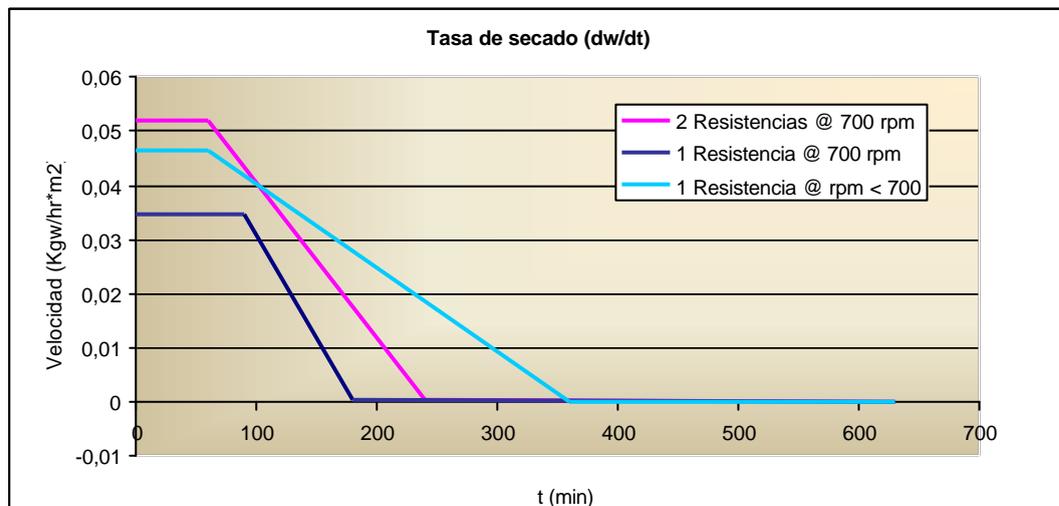


Figura 3.5. “Tasa de secado: dw/dt vs. tiempo”

En dicha gráfica puede observarse el tramo horizontal correspondiente a la velocidad constante y los tramos de velocidad decreciente. La humedad crítica coincide con el punto de intersección de la recta de la velocidad constante con la del primer tramo de velocidad decreciente.

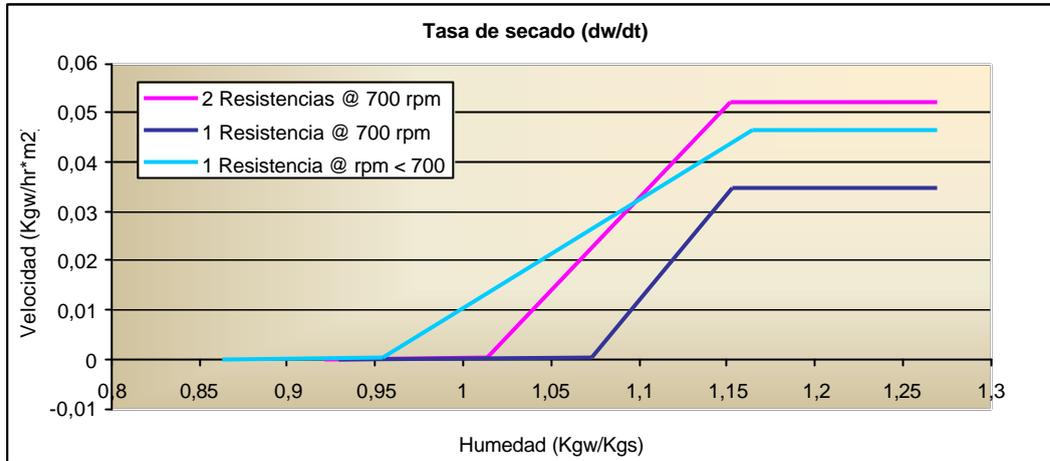


Figura 3.6. "Tasa de secado: dw/dt vs. humedad"

Observando las figuras 3.5 y 3.6 se puede apreciar la diferentes tasas de secado para las últimas tres pruebas en función del tiempo y de la humedad respectivamente, en ellas podemos notar que la prueba # 5, la muestra tuvo una mayor velocidad de secado comparado con las otras dos pruebas; esto porque logró disminuir la humedad del grano más rápidamente hasta una humedad final. Mientras que en la prueba # 7 observamos que la velocidad de secado fue un poco más baja pero a su vez logro disminuir la humedad final a un valor menor que las pruebas anteriores.

Por otra parte el tiempo de secado se calculó mediante la ecuación 2.7 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Prueba	tiempo de secado Teórico		tiempo de secado Real	
	min.	Hr.	min.	Hr.
5	1129,6178	18,8270	714,0746	11,9012
6	1702,2561	28,3709	787,8027	13,1300
7	1273,5061	21,2251	667,9871	11,1331

Cuadro 3.7. "Tiempo de secado Teórico y Real"

Donde el tiempo de secado teórico es el que se calcula en base a la humedad final teórica ( en este caso 8%), mientras que el tiempo de secado real es el calculado con la humedad final real, la cual es la alcanzada en las diferentes pruebas en el túnel de secado.

Los cálculos de los procedimientos nombrados anteriormente ( curva de secado, tasa de secado, tiempo de secado, promedios de temperaturas y humedad relativa) se amplían con más detalle en el APÉNDICE A.

### **3.5. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE CALENTADOR SOLAR DE AIRE**

Este modelo se construyó con la finalidad de verificar los valores teóricos de los coeficientes convectivos locales del fenómeno de convección natural, medir la velocidad del aire dentro del calentador en convección natural y las temperaturas que se generan en el vidrio y en la placa absorbadora por efectos de la irradiación solar; comprobar que los parámetros de diseño sean los más óptimos basados en las condiciones climáticas más adversas del año; con el propósito de garantizar el funcionamiento del calentador todo el año, y por lo menos 7 horas diarias.

Para este experimento se diseñó y se construyó un calentador solar plano de aire, éste estaba constituido por una lámina de latón pintada de negro mate, un vidrio de 6 mm. de espesor, aislante, madera y cartón.

A continuación se dará una breve descripción de la construcción del calentador: se diseñó con un ángulo de inclinación de  $26^\circ$  para la incidencia solar, se tomó una caja de cartón que sirvió como base para la placa absorbadora; a ésta se le diseñaron unos soportes de madera con la finalidad de resistir el peso del vidrio o superficie selectiva; la placa absorbadora se aisló por su parte inferior con anime para disminuir las pérdidas al ambiente. Una vez construido se colocó con dirección al sur para garantizar una colección de energía solar diaria máxima sin la necesidad de mover el calentador. Las paredes laterales de la base del cuerpo negro fueron

diseñadas de manera tal que se disminuyera la sombra incidente sobre la placa absorbadora, esto se realizó mediante la implementación de una sección transversal trapezoidal en vez de una sección transversal rectangular.

Para esta experiencia, se utilizaron como instrumento de medición varias termocuplas y el lector de temperaturas de las mismas. La ubicación de las termocuplas fue la siguiente: la primera fue colocada en la superficie superior del vidrio, que está en contacto directo con la radiación solar y el aire externo; la segunda se colocó en la parte inferior del vidrio, la tercera se colocó en la parte superior de la placa absorbadora y la última se colocó de manera tal que sirviera para mediciones ambientales.

Esta configuración es relevante en el cálculo de los coeficientes convectivos locales, valores necesarios para el cálculo y el diseño del calentador solar utilizado por el deshidratador.

Se realizaron tres experimentos respectivos a la medición de las temperaturas mencionadas anteriormente; el primer día fue nublado y con lloviznas, el segundo día soleado y despejado, el tercer día fue nublado, soleado y con lloviznas. Esto garantiza que las mediciones hechas son en condiciones bastante desfavorables para la colección de energía solar. Sin embargo, se logró medir las temperaturas del vidrio superior e inferior, y la temperatura de la placa absorbadora. A continuación se muestran los datos obtenidos:

Hora	Cuerpo Negro			Temp. Superior del vidrio			Temp. Inferior del vidrio		
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 1	Día 2	Día 3	Día 1	Día 2	Día 3
08:00	29,2	24,9	21,3	28,0	21,0	21,3	27,0	22,4	21,3
08:30	22,5	35,9	21,2	22,5	25,3	21,2	22,5	29,5	21,2
09:00	31,4	48,0	23,0	25,8	29,7	23,0	27,0	38,0	23,0
09:30	23,8	51,3	39,9	23,8	30,7	28,7	23,8	39,1	34,2
10:00	33,0	62,3	51,9	25,9	36,9	33,0	27,2	51,2	43,3
10:30	35,2	71,3	61,5	26,9	38,9	33,8	30,0	53,9	45,1
11:00	40,1	69,9	82,5	28,0	35,3	46,7	32,2	49,5	67,1
11:30	51,0	77,4	52,3	32,7	41,9	36,7	39,8	57,6	46,1
12:00	61,7	71,3	86,1	36,9	40,8	49,3	48,3	53,1	62,6
12:30	47,8	67,9	84,9	32,8	40,9	48,9	38,5	52,3	66,8
13:00	45,0	85,2	93,9	29,3	44,0	54,2	33,7	63,9	73,2
13:30	26,0	84,9	74,3	26,0	45,9	47,5	26,0	64,0	59,3
14:00	25,9	78,3	38,9	25,9	44,5	32,2	25,9	59,9	35,3
14:30	25,6	66,2	35,8	25,6	39,2	30,9	25,6	49,6	32,7
15:00	26,3	56,1	34,3	26,3	37,2	29,6	26,3	44,5	31,8
15:30	26,1	56,5	55,2	26,1	38,5	38,0	26,1	44,1	46,4
16:00	25,8	56,5	37,6	25,8	36,7	31,5	25,8	45,5	30,6
16:30	25,4	48,3	35,8	25,4	35,8	30,5	25,4	39,5	32,0
17:00	25,1	39,1	31,8	25,1	32,4	27,9	25,1	34,6	29,4

Cuadro 3.8. “Data de temperaturas (°C) del vidrio y de la placa absorbadora para diferentes días”

De esta data se calculó el promedio de las temperaturas obteniendo como resultado lo siguiente:

Superficie	Temp. Promedio (°C)
Cuerpo negro	41,0994
Superficie superior del vidrio	29,7331
Superficie inferior del vidrio	33,9329

Cuadro 3.9. “Temperaturas Promedio; superficie selectiva y placa absorbadora”

También se midió la velocidad del aire dentro del calentador solar en conveccion natural. Estas mediciones se realizaron desde las 9 a.m. hasta las 5 p.m., período en el cual se colocó el calentador nuevamente a la exposición de la irradiación solar; tomando en cuenta que la velocidad es la relación de la distancia entre el tiempo, se pudo calcular esta velocidad para diferentes horas del día teniendo

como constante el largo del calentador (distancia). Se efectuaron diversas mediciones del tiempo. Cada treinta minutos se realizaron diez mediciones de tiempo en segundos; esto se logró mediante el seguimiento de cierta cantidad de humo dentro del calentador, ya que, anteriormente se habían utilizado micromanómetros con tubos pitot y estos, por ser la velocidad muy baja, fueron incapaces de medirla. Por lo tanto, una vez completadas las mediciones; se promediaron los tiempos; dichos promedios se realizaron con la longitud del calentador, de esta manera se obtuvo la velocidad experimental dentro del calentador solar por convección natural. En el siguiente cuadro se muestran los valores medidos experimentalmente en esta prueba:

Long.(m)	t1(seg.)	t2(seg.)	t3(seg.)	t4(seg.)	t5(seg.)	t6(seg.)	t7(seg.)	t8(seg.)	t9(seg.)	t10(seg.)	t (seg.)	Vs (m/s)	Ve (m/s)	Hora
1,25														08:00
1,25														08:30
1,25	2,89	6,49	3,84	4,1	6,88	6,16	5,25	2,84	4,17	8,63	5,125	0,2439	0,2439	09:00
1,25	3,56	3,97	5,4	7,33	6,47	2,53	2,53	2,89	3,12	3,49	4,129	0,3027	0,3027	09:30
1,25	2,82	3,26	2,38	4,23	1,97	1,87	2,73	1,83	4,23	1,47	2,679	0,4666	0,4666	10:00
1,25	3,29	4,8	3,13	4,6	3,6	6,49	2,41	1,95	3,13	2,68	3,608	0,3465	0,3465	10:30
1,25	3,37	4,3	2,65	2,2	2,66	3,47	2,69	2,67	2,64	2,9	2,955	0,4230	0,4230	11:00
1,25	2,54	3,17	2,63	2,91	2,85	3,29	2,69	2,42	3,25	2,6	2,835	0,4409	0,4409	11:30
1,25	2,68	2,47	3,81	4,47	3,68	2,8	2,99	3,5	3,06	2,72	3,218	0,3884	0,3884	12:00
1,25	2,47	2,85	3,38	3,49	3,89	5,09	5,04	5,33	4,77	6,47	4,278	0,2922	0,2922	12:30
1,25	3,11	2,77	1,98	3,43	3,96	4,25	3,4	5,77	3,94	2,93	3,554	0,3517	0,3517	13:00
1,25	2,33	3,22	3,95	3,64	3,67	3,75	4,61	2,27	3,65	1,4	3,249	0,3847	0,3847	13:30
1,25	3,1	2,76	2,98	2,63	4,13	3,59	2,75	2,59	3,87	3,43	3,183	0,3927	0,3927	14:00
1,25	3,48	4,69	8,4	7,27	9,11	7,12	4,1	3,91	4,1	6,19	5,837	0,2142	0,2142	14:30
1,25	6,6	9,95	5,21	6,06	11,66	5,9	9,65	5,72	7,72	8,05	7,652	0,1634	0,1634	15:00
1,25	10,89	9,77	7,19	3,99	10,33	7,22	6,57	3,91	3,6	4,69	6,816	0,1834	0,1834	15:30
1,25	5,89	8,04	9,62	8,21	6,62	7,26	12,88	8,22	4,56	8,81	8,011	0,1560	0,1560	16:00
1,25	9,02	5,17	8,65	8	5,06	7,54	5,65	5,59	4,87	6,02	6,557	0,1906	0,1906	16:30
1,25	6,3	10,02	8,93	6,97	7,46	8,33	8,15	9,33	6,52	9,31	8,132	0,1537	0,1537	17:00

: lluvioso

: nublado

Cuadro 3.10. “ Datos utilizados para el cálculo de la velocidad del aire en convección natural dentro del calentador solar plano”

### 3.6. MODELO MATEMÁTICO DEL CALENTADOR SOLAR PLANO DE AIRE

En el estudio del modelo matemático sólo se tomó en cuenta los efectos de la convección natural que ocurría dentro del calentador, debido a que los efectos de radiación no son tomados en cuenta porque el medio de trabajo es no participativo. La radiación sólo incrementa la temperatura del vapor de agua (incremento de temperatura despreciable, para este caso), más no así la del aire seco ya que es transparente a la radiación solar. Por otra parte la radiación incrementa la temperatura tanto de la placa absorbidora como la de la superficie selectiva por ambos lados, dando origen a un gradiente de temperatura entre las superficies y el fluido de trabajo.

Un análisis energético del sistema “aire húmedo” (figura 3.7), sometido a un calentamiento sensible, vía radiación solar, es detallado a continuación:

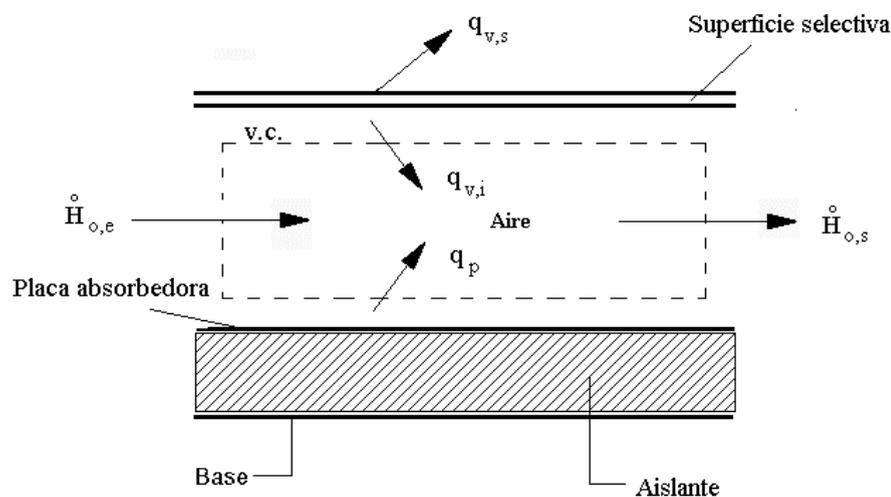


Figura 3.7. “Esquema de un calentador solar de aire”

Donde,  $\dot{H}_{o,e}$  es la metalpía de entrada,  $\dot{H}_{o,s}$  es la metalpía de salida,  $q_{v,s}$  es la convección “vidrio superior – aire ambiental”,  $q_{v,i}$  es la convección “vidrio inferior – aire interno” y  $q_p$  es la convección “placa absorbidora – aire interno”.

Aplicando el análisis energético al sistema mostrado se reduce a:

$$\dot{H}_{o,e} + q_{v,i} + q_p = \dot{H}_{o,s} \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$q_{v,i} = h_{v,i} * A_v * (T_{v,i} - T_a) \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$q_p = h_p * A_p * (T_p - T_a) \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde,  $h_p$  y  $h_{v,i}$  son los coeficientes convectivos de la placa absorbedora y de la superficie selectiva respectivamente;  $A_p$  y  $A_{v,i}$  son las áreas de la placa absorbedora y de la superficie selectiva ;  $T_p$  y  $T_{v,i}$  son las temperaturas de la placa absorbedora y de la superficie selectiva; y  $T_a$  es variable con la distancia “x” dentro del calentador, y se supone un comportamiento lineal para  $T_a$ , por lo tanto:

$$T_a = f(x) = \frac{T_2 - T_1}{L} * x + T_1 \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde,  $L$  es la longitud del calentador,  $T_1$  es un valor conocido (medido a la entrada del calentador),  $T_2$  es el valor deseado ( $T_2 = T_1 + \Delta T$ ); es importante destacar que  $\Delta T$  fue seleccionado para las condiciones climáticas de menor irradiación solar con la finalidad de garantizar que éste funcione la mayor parte del día (o por lo menos siete horas diarias). También es importante señalar que  $T_2 < T_{v,i} = T_p$ , esta condición nos garantiza que el fenómeno de convección sea desde las superficies hacia el aire y no desde el aire hacia las superficies.

Para el cálculo de  $q_{v,i}$  y  $q_p$  es necesario hallar los valores de los coeficientes convectivos locales “ $h_{v,i,x}$ ” y “ $h_{p,x}$ ”. Estos coeficientes en convección natural los podemos obtener de la siguiente manera:

De la ecuación 2.12 despejamos  $h_x$ :

$$h_x = \frac{k}{x} * \left( \frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4} * g(Pr) \quad \text{Ec. 3.7}$$

Luego sustituimos la ecuación 2.9 en la ecuación anterior

$$h_x = \frac{k * g(Pr)}{x} * \left[ \frac{g * \cos(\theta) * \beta * (T_s - T_a) * x^3}{4 * \nu^2} \right]^{1/4} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Por otra parte sabemos que las propiedades del fluido varían con la temperatura y que estos influirán en la transferencia de calor, por lo tanto, las propiedades del aire la evaluamos en función de la temperatura de película. De la ecuación 2.11 obtenemos lo siguiente:

$$T_a = 2 * T_f - T_s \quad \text{Ec. 3.9}$$

Por consiguiente variando las propiedades del aire en función de la temperatura de película y sustituyendo la ecuación 3.9 en la ecuación 3.8 nos queda:

$$h_x(T_f) = \frac{k(T_f) * g[Pr(T_f)]}{x} * \left[ \frac{g * \cos(\theta) * \frac{1}{T_f} * (T_s - T_f) * x^3}{2 * (\nu(T_f))^2} \right]^{1/4} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Sustituyendo la ecuación 3.6 en la ecuación 2.11 obtenemos

$$T_f(x) = \frac{T_2 - T_1}{2 * L} * x + \frac{T_s + T_1}{2} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Para resolver la ecuación 3.10 primero se obtuvo una función de la conductividad térmica (k) del aire, Prandtl (Pr), g(Pr) y viscosidad cinemática (v), todo en función de  $T_f(x)$ ; se tomaron los valores de las propiedades termofísicas del aire a diferentes temperaturas en un rango de 300 a 400 K (se tomó este rango ya que no sobrepasamos los 400 K y tampoco medimos temperaturas inferiores a 300 K dentro del calentador). Por lo tanto se graficaron estos puntos y se aproximó a una curva polinómica de segundo grado, como sigue:

T (K)	Pr	v*1000000	K*1000	g(Pr)
300	0,707	15,89	26,30	0,5009
350	0,700	20,92	30,00	0,4992
400	0,690	26,41	33,80	0,4966

Cuadro 3.11. “Propiedades termofísicas del aire a diferentes temperaturas”

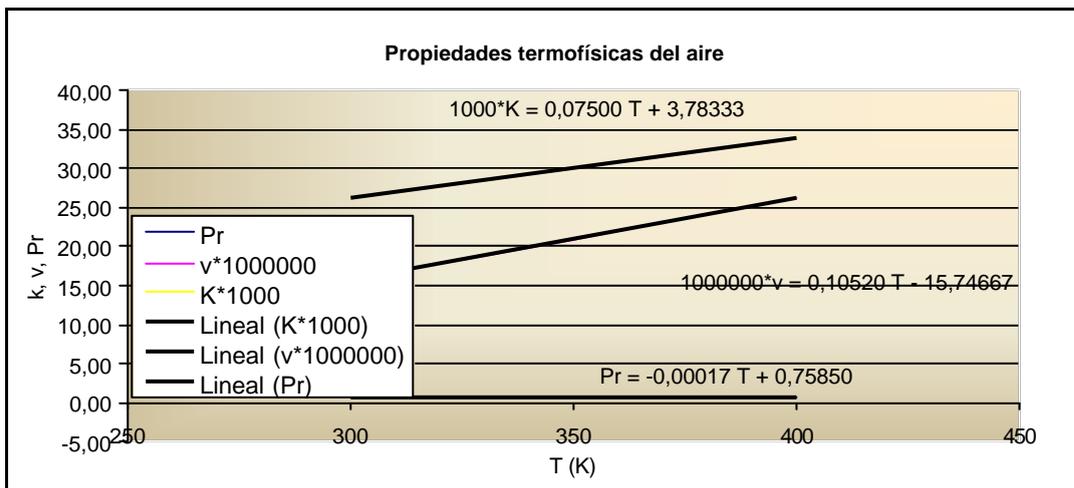


Figura 3.8. “Propiedades termofísicas del aire”

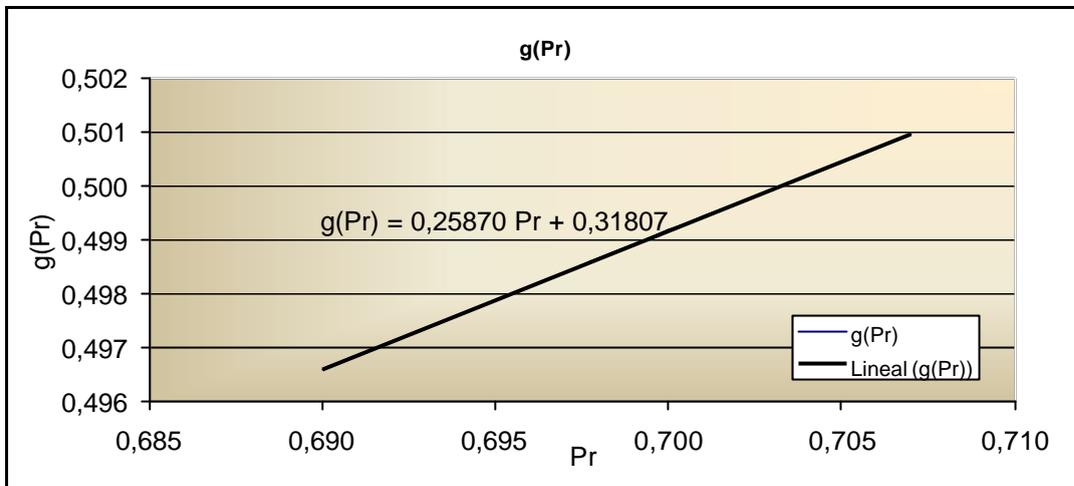


Figura 3.9. “g(Pr)”

Para facilitar los cálculos se programó en una hoja de cálculo la conductividad térmica ( $k$ ) del aire, Prandtl ( $Pr$ ),  $g(Pr)$  y viscosidad cinemática ( $\nu$ ), todo en función de  $T_f(x)$  para una longitud fija de “ $L$ ”, lo que nos dio como resultado el coeficiente convectivo local en función de “ $x$ ” el cual se graficó obteniéndose una curva que se aproximó a un polinomio de tercer grado ( $ax^3 + bx^2 + cx + d$ ). Este mismo procedimiento se realizó para diferentes valores de “ $L$ ” obteniéndose para cada una de ellas sus respectivas gráficas.

Como la variación de los coeficientes ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ ) en un rango de  $0 < L < 1,0$  es muy poca sólo se tomaron rangos de  $1,0 < L < 2,0$ . Los coeficientes se hallaron de las ecuaciones de cada variación de  $L$  tomándose uno a uno los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$ . Por ejemplo tomemos la gráfica para  $L = 1m$

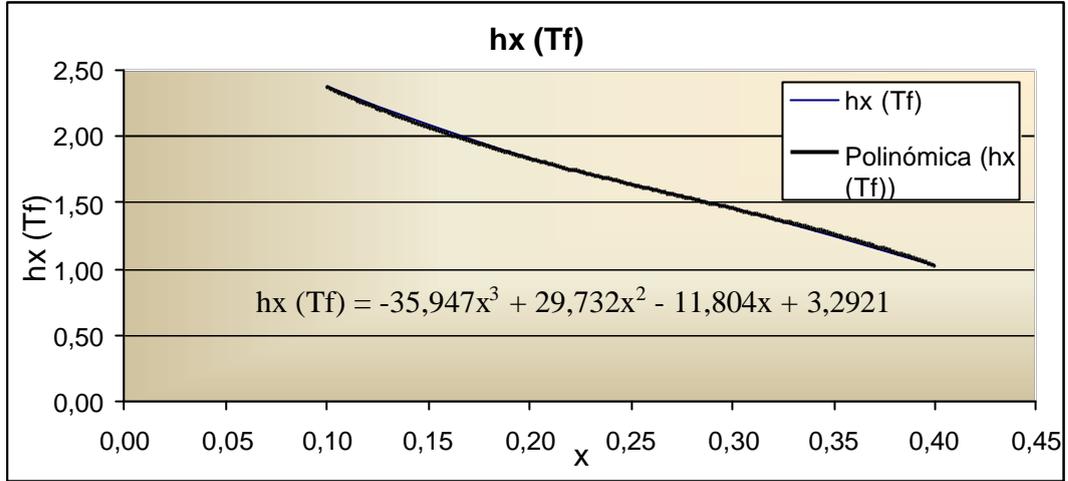


Figura 3.10. “Coeficiente convectivo local para una longitud fija de L = 1m”

De esta gráfica vemos que el coeficiente convectivo viene expresado por

$$h(x) = -35,947x^3 + 29,732x^2 - 11,804x + 3,2921$$

Donde a = -35,947; b = 29,732; c = 11,804 y d = 3,2921. De esta misma manera se hallaron todos los coeficientes de cada polinomio obteniéndose:

L	Coeficientes del polinomio			
	a	b	c	d
1,0	-35,9470	29,7320	-11,8040	3,2921
1,1	-28,0940	25,6470	-10,9550	3,2557
1,2	-23,7710	23,2480	-10,3920	3,2314
1,3	-18,3900	19,7460	-9,5771	3,1894
1,4	-16,8310	18,9260	-9,3538	3,1828
1,5	-12,7680	15,7390	-8,5257	3,1333
1,6	-12,6680	16,0140	-8,5979	3,1459
1,7	-9,2793	12,8920	-7,6976	3,0847
1,8	-10,2560	14,2650	-8,1326	3,1264
1,9	-6,9976	10,8020	-7,0310	3,0423
2,0	-6,1101	9,9232	-6,7357	3,0225

Cuadro 3.12. “Coeficientes del polinomio en función de la longitud L”

Luego se procedió a graficar todos los coeficientes en función de la longitud L

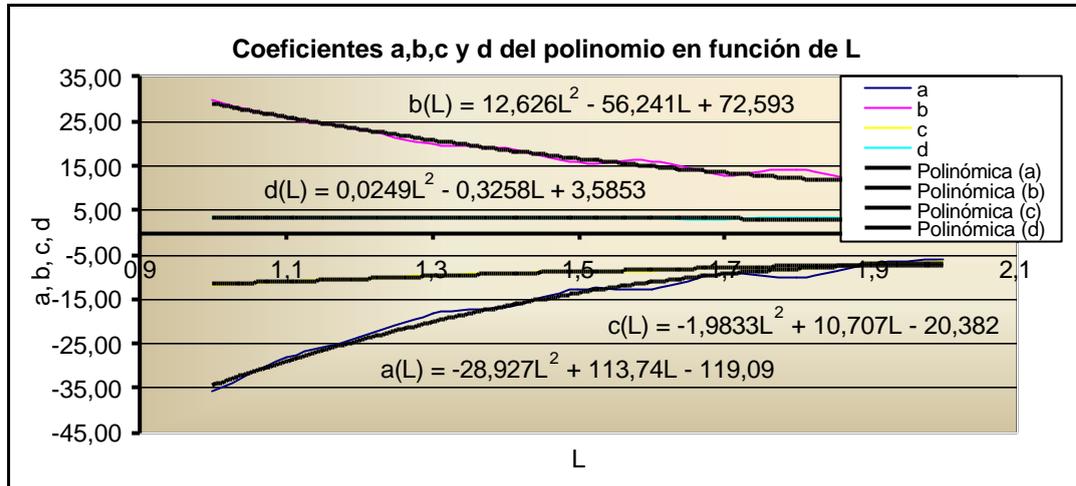


Figura 3.11. “Coeficientes de a, b, c y d del polinomio en función de L”

De aquí obtenemos:

$$a(L) = -28,927L^2 + 113,74L - 119,09$$

$$b(L) = 12,626L^2 - 56,241L + 72,593$$

$$c(L) = -1,9833L^2 + 10,707L - 20,382$$

$$d(L) = 0,0249L^2 - 0,3258L + 3,5853$$

Estos van a ser los nuevos coeficientes del coeficiente convectivo local para la parte inferior de la superficie selectiva, este procedimiento se hizo con la finalidad de obtener una función dependiente de la longitud. Luego la ecuación del coeficiente convectivo local va a venir expresada como:

$$h_{v,i}(x)_L = (-28,927L^2 + 113,74L - 119,09)x^3 + (12,626L^2 - 56,241L + 72,593)x^2 + (-1,9833L^2 + 10,707L - 20,382)x + (0,0249L^2 - 0,3258L + 3,5853)$$

Ec.3.12

Este procedimiento se aplicó también para la placa absorbidora obteniéndose como resultado la siguiente ecuación:

$$h_p(x)_L = (-3,8652L^2 + 14,782L - 14,868)x^3 + (5,01L^2 - 20,656L + 23,931)x^2 + (1,8782L^2 + 8,7758L - 13,805)x + (0,1083L^2 - 0,6712L + 4,2628)$$

Ec. 3.13

Por lo tanto concluimos que

$$h_{v,i} = f_1(x)$$

$$h_p = f_2(x)$$

Volviendo a la ecuación 3.3 y agrupando términos nos queda

$$\overset{\circ}{H}_o = q_T \quad \text{Ec. 3.14}; \quad \text{Donde, } q_T = q_{v,i} + q_p \quad \text{Ec. 3.15}$$

Con la finalidad de hacer variable cada término en ambos miembros de la ecuación 3.14, se procedió a diferenciarlas de la siguiente manera:

$$d\overset{\circ}{H}_o = dq_T = dq_{v,i} + dq_p \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde de la ecuación 3.4 y 3.5 se obtuvieron sus diferenciales:

$$dq_{v,i,x} = (dh_{v,i,x} * A_{v,i,x} * (T_{v,i} - T_{a,x}) + h_{v,i,x} * (T_{v,i} - T_{a,x}) * dA_{v,i,x} + h_{v,i,x} * A_{v,i,x} * (-dT_{a,x}))dx$$

Ec 3.17

$$dq_{p,x} = (dh_{p,x} * A_{p,x} * (T_p - T_{a,x}) + h_{p,x} * (T_p - T_{a,x}) * dA_{p,x} + h_{p,x} * A_{p,x} * (-dT_{a,x}))dx$$

Ec 3.18

Donde,  $h_{v,i,x}$  y  $h_{p,x}$  son los coeficientes convectivos locales de la superficie selectiva y de la placa absorbadora respectivamente,  $A_{v,i,x}$  y  $A_{p,x}$  son las áreas de la superficie selectiva y de la placa absorbadora, que en este caso ambas son iguales;  $T_{v,i}$  y  $T_p$  son las temperaturas de la superficie selectiva y de la placa absorbadora respectivamente.

Diferenciando las ecuaciones 3.12 y 3.13 obtenemos:

$$dh_{v,i,x} = (-86,781L^2 + 341,22L - 357,27)x^2 + (25,252L^2 - 113,082L + 145,18)x + (-1,983L^2 + 10,707L - 20,382)$$

Ec 3.19

$$dh_{p,x} = (-11,5956L^2 + 44,346L - 44,604)x^2 + (10,02L^2 - 41,312L + 47,862)x + (-1,8782L^2 + 8,7758L - 13,805)$$

Ec. 3.20

Para determinar una aproximación para la variación del área en función de la longitud se procedió de la siguiente manera.

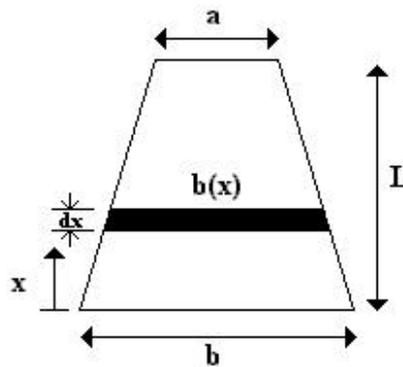


Figura 3.12. “Área de la placa absorbadora en función de x”

La ecuación del área de la placa absorbadora viene expresada como:

$$A = \frac{b+a}{2} * L \quad \text{Ec. 3.21}$$

Pero como sabemos que el área también varía en función de la longitud la podemos calcular en una forma diferencial como se muestra a continuación:

$$dA = dx * b(x) \quad \text{Ec. 3.22}$$

mediante la siguiente relación se determina b(x)

$$\frac{\frac{b}{2} - \frac{a}{2}}{L} = \frac{\frac{b}{2} - \frac{b(x)}{2}}{x} \Rightarrow \frac{b-a}{L} = \frac{b-b(x)}{x} \quad \text{Ec. 3.23}$$

Luego, despejando de la ecuación 3.23 “b(x)” y sustituyéndola en la ecuación 3.22 se obtiene:

$$dA = \left( b - \frac{b-a}{L} * x \right) * dx \quad \text{Ec. 3.24}$$

Ahora diferenciando la ecuación 3.6

$$dT_a = \frac{T_2 - T_1}{L} * dx \quad \text{Ec. 3.25}$$

resumiendo

$$dq_T = \left( dh_{v,i,x} * A_{v,i,x} * (T_{v,i} - T_{a,x}) + h_{v,i,x} * (T_{v,i} - T_{a,x}) * dA_{v,i,x} + h_{v,i,x} * A_{v,i,x} * (-dT_{a,x}) \right) dx + \left( dh_{p,x} * A_{p,x} * (T_p - T_{a,x}) + h_{p,x} * (T_p - T_{a,x}) * dA_{p,x} + h_{p,x} * A_{p,x} * (-dT_{a,x}) \right) dx \quad \text{Ec. 3.26}$$

Donde

$$dh_{v,i,x} = (-86,781L^2 + 341,22L - 357,27)x^2 + (25,252L^2 - 113,082L + 145,18)x + (-1,983L^2 + 10,707L - 20,382)$$

$$dh_{p,x} = (-11,5956L^2 + 44,346L - 44,604)x^2 + (10,02L^2 - 41,312L + 47,862)x + (-1,8782L^2 + 8,7758L - 13,805)$$

$$dA_{v,i,x} = dA_{p,x} = \left( b - \frac{b-a}{L} * x \right) * dx$$

$$dT_{a,x} = \frac{T_2 - T_1}{L} * dx$$

Integrando la ecuación 3.26

$$\int_0^L d(q_T) = \int_0^L d(q_{v,i} + q_p) = \int_0^L d(q_{v,i}) + \int_0^L d(q_p) = f_1(L)$$

De la ecuación 3.15 sabemos

$$q_T = q_{v,i} + q_p$$

$$q_{v,i} = (a+b) * (14,4635(T_2 - T_{v,i})L^6 + 63,1830(T_{v,i} - T_2)L^5 + (0,025 * T_1 + 88,7321 * T_2 - 88,7571 * T_{v,i})L^4 + 41,6624(T_{v,i} - T_2)L^3 + 10,3539(T_2 - T_{v,i})L^2 + 1,7926(T_{v,i} - T_2)L)$$

Ec. 3.27

$$q_p = (a+b) * (1,9326(T_2 - T_p)L^6 + 9,896(T_p - T_2)L^5 + 18,7011(T_2 - T_p)L^4 + 16,4075(T_p - T_2)L^3 + 7,2381(T_2 - T_p)L^2 + 2,1314(T_p - T_2)L)$$

Ec. 3.28

Para el dimensionamiento de la placa absorbidora y la superficie selectiva se realizaron iteraciones basadas en la variación de la sección transversal en la entrada y salida del calentador. Para el procedimiento se utilizaron las ecuaciones 3.15, 3.27 y 3.28. En el siguiente cuadro se resume los valores de los coeficientes del polinomio resultante de la ecuación 3.15. En el cual el valor resaltado en negrita es el valor utilizado en el diseño del calentador solar plano propuesto.

a(m)	b(m)	L <sup>6</sup>	L <sup>5</sup>	L <sup>4</sup>	L <sup>3</sup>	L <sup>2</sup>	L
0,2000	0,2000	30,5695	-132,5755	182,9488	-80,8548	17,9945	-2,5320
0,2250	0,2400	35,5370	-154,1190	212,6779	-93,9937	20,9186	-2,9435
0,2500	0,2800	40,5046	-175,6625	242,4071	-107,1326	23,8427	-3,3549
0,2750	0,3200	45,4721	-197,2060	272,1363	-120,2715	26,7668	-3,7664
0,3000	0,3600	50,4396	-218,7495	301,8655	-133,4104	29,6909	-4,1778
0,3250	0,4000	55,4072	-240,2931	331,5946	-146,5493	32,6150	-4,5893
0,3500	0,4400	60,3747	-261,8366	361,3238	-159,6882	35,5391	-5,0007
0,3750	0,4800	65,3423	-283,3801	391,0530	-172,8270	38,4632	-5,4122
0,4000	0,5200	70,3098	-304,9236	420,7821	-185,9659	41,3873	-5,8236
0,4250	0,5600	75,2773	-326,4671	450,5113	-199,1048	44,3114	-6,2351
0,4500	0,6000	80,2449	-348,0106	480,2405	-212,2437	47,2355	-6,6465
<b>0,5000</b>	<b>0,5500</b>	<b>80,2449</b>	<b>-348,0106</b>	<b>480,2405</b>	<b>-212,2437</b>	<b>47,2355</b>	<b>-6,6465</b>

Cuadro 3.13. "Iteraciones y coeficientes para  $q_T$ "

Donde a y b corresponden al área de la placa absorbidora (ver figura 3.12).

Los valores de las temperaturas fueron medidas y se tomaron los valores más desfavorables en función de las temperaturas promedio más bajas registradas en las mediciones donde:

$$T_1 = 302,6 \text{ K}$$

$$T_2 = 312,6 \text{ K}$$

$$T_{v,i} = 307,1 \text{ K}$$

$$T_p = 314,2 \text{ K}$$

Por lo tanto, evaluando la ecuación 3.15 con los valores anteriores de área y de temperaturas

$$q_T(L) = 80,24449L^6 - 348,0106L^5 + 480,24051L^4 - 212,2437L^3 + 47,2355L^2 - 6,6465L$$

Ec. 3.29

Diferenciando de la ecuación 3.14 el término a la izquierda obtenemos:

$$d\dot{H}_O = \dot{m}_{as} [C_p * dT + w * dh_v + (1 + w) * v * dv + (1 + w)dz] * \frac{dx}{dx} \quad \text{Ec. 3.30}$$

El miembro derecho de la ecuación 3.30 lo podemos desglosar de la siguiente manera:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left[ \frac{T_2 - T_1}{L} * x + T_1 \right] = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{Ec.3.31}$$

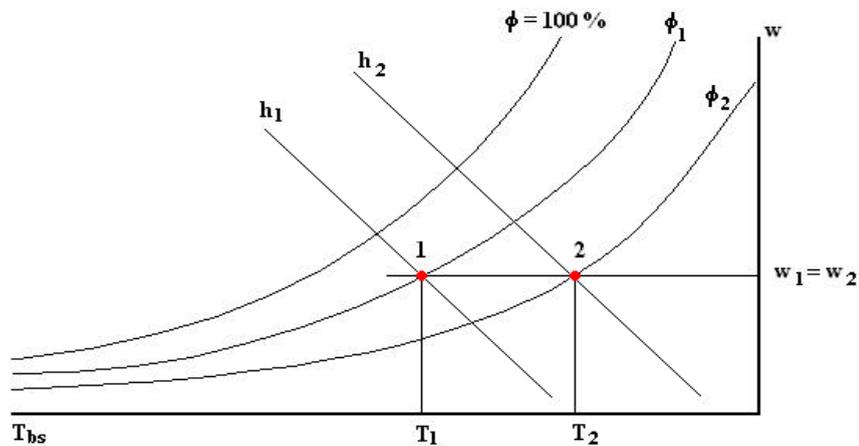


Figura 3.13. “Psicrometría del aire dentro del calentador (calentamiento sensible)”

Dentro del calentador ocurre un fenómeno llamado *calentamiento sensible* que es un aumento de la temperatura de bulbo seco a humedad absoluta constante en la figura 3.13 se representa este fenómeno.

Por lo tanto

$$h_1 = h_{a1} + w_1 * h_{v1} \quad \text{Ec.3.32}$$

$$h_2 = h_{a2} + w_2 * h_{v2} \quad \text{Ec.3.33}$$

Donde,  $h_1$  y  $h_2$  son las entalpías psicrométricas en los puntos 1 y 2 respectivamente,  $h_{a1}$  y  $h_{a2}$  son las entalpías del aire seco,  $h_{v1}$  y  $h_{v2}$  son las entalpías del vapor de agua y  $w_1$ ,  $w_2$  son las humedades absolutas en los puntos 1 y 2 respectivamente que se mantienen constante durante el calentamiento sensible.

Donde la entalpía psicrométrica “h” es variable con la distancia “x” dentro del calentador, y se supone un comportamiento lineal para h, por lo tanto:

$$h(x) = \frac{h_2 - h_1}{L} * x + h_1 \quad \text{Ec. 3.34}$$

Sabiendo que

$$h = h_a + w * h_v \quad \text{Ec. 3.35}$$

Derivando la ecuación 3.35 en función de x nos queda

$$\frac{dh}{dx} = \frac{dh_a}{dx} + w * \frac{dh_v}{dx} \quad \text{Ec. 3.36}$$

Despejando

$$w * \frac{dh_v}{dx} = \frac{dh}{dx} - \frac{dh_a}{dx} \quad \text{Ec. 3.37}$$

Donde

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h_2 - h_1}{L} \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$\frac{dh_a}{dx} = C_p * \frac{dT}{dx} = C_p * \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{Ec. 3.39}$$

Por lo tanto

$$w * \frac{dh_v}{dx} = \frac{(h_2 - h_1) - C_p * (T_2 - T_1)}{L} \quad \text{Ec. 3.40}$$

Continuando con el desglose del miembro derecho de la ecuación 3.30 tenemos:

$$\dot{m} = \rho * A * V \quad \text{Ec. 3.41}$$

Donde,  $\dot{m}$  es el flujo másico de aire,  $\rho$  la densidad del aire, A es el área de la placa absorbadora y V es la velocidad del fluido dentro del calentador.

Como se ha explicado en líneas anteriores las propiedades del aire varían con la temperatura que a su vez varía con la distancia, por lo tanto, la densidad del aire varía con la distancia dentro del calentador solar. Por otra parte como desconocemos la longitud de la placa absorbadora tomamos un diferencial de área. Es importante destacar que el área se considero de forma trapezoidal con la finalidad de incrementar la velocidad del aire a la salida del calentador.

Despejando de la ecuación 3.41 la velocidad y colocándola en función de “x” nos queda

$$V(x) = \frac{\dot{m}}{\rho(x) * A(x)} \quad \text{Ec. 3.42}$$

Para hallar una función de la densidad del aire se tomó de la tabla de propiedades termofísicas del aire, la densidad para diferentes temperaturas en un rango de 300 a 400 K. Por lo tanto se graficaron estos puntos y se aproximó a una curva polinómica de segundo grado, como sigue:

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
300	1,1614
350	0,9950
400	0,8711

Cuadro 3.14. “Densidad del aire a diferentes temperaturas”

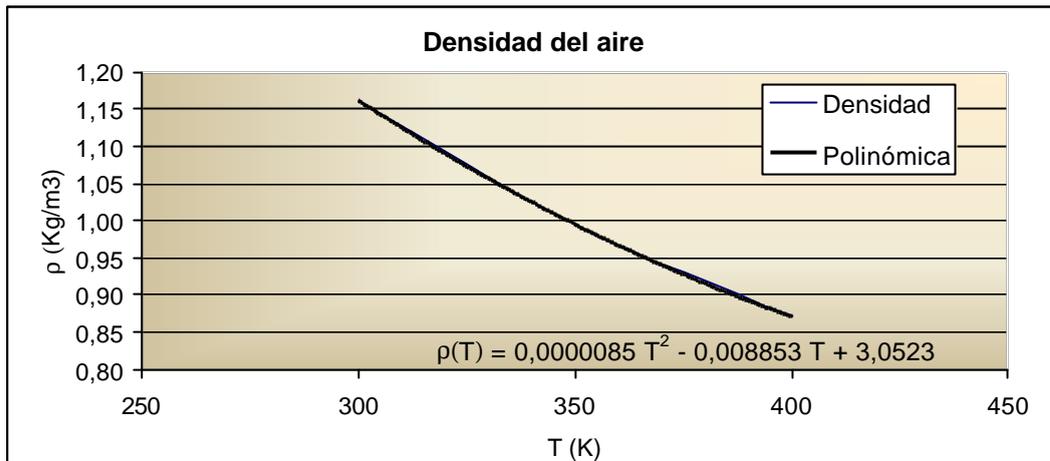


Figura 3.14. “Densidad del aire en función de la temperatura”

Como se observa en la figura anterior la densidad es función de la temperatura, pero para efectos de nuestros cálculos se utilizó la temperatura en función de x, por lo tanto la ecuación de la densidad del aire viene expresada como:

$$\rho(T_a(x)) = 0,0000085 * T_a(x)^2 - 0,008853 * T_a(x) + 3,0523 \quad \text{Ec. 3.43}$$

Por otra parte, integrando la ecuación 3.24 se tiene

$$A(x) = b * x - \frac{b-a}{2 * L} * x^2 \quad \text{Ec. 3.44}$$

Para facilitar los cálculos se programó en una hoja de cálculo el área y la densidad en función de “x” para una longitud fija de “L”, lo que nos dio como

resultado una velocidad en función de “x” la cual se graficó obteniéndose una curva que se aproximó a una polinomio de segundo grado ( $ax^2 + bx + c$ ). Este mismo procedimiento se realizó para diferentes valores de “L” obteniéndose para cada una de ellas sus respectivas gráficas.

Como la variación de los coeficientes (a, b y c) en un rango de  $0 < L < 1,0$  es muy poca sólo se tomaron rangos de  $1,0 < L < 2,0$ . Los coeficientes se hallaron de las ecuaciones de cada variación de L tomándose uno a uno los valores de a, b y c. Por ejemplo tomemos la gráfica para  $L = 1\text{m}$

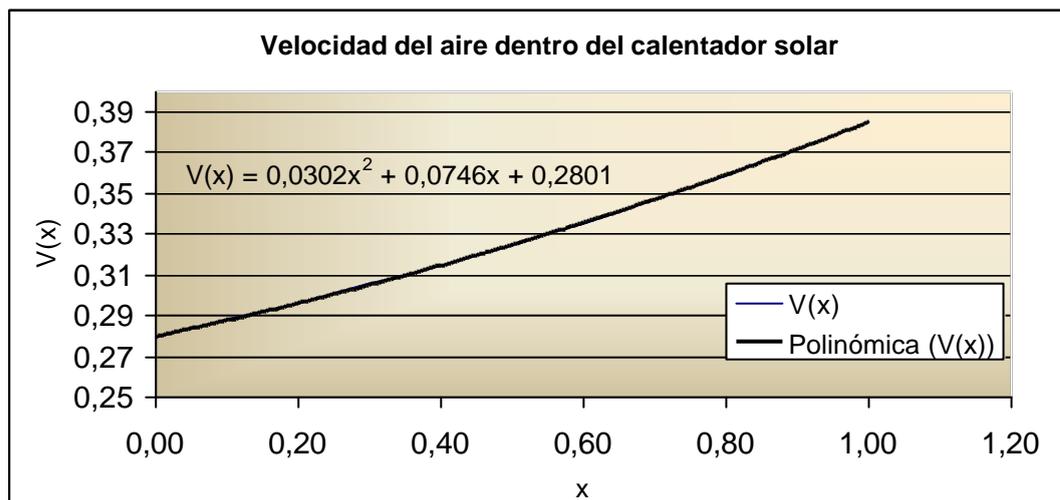


Figura 3.15. “Velocidad del aire para una longitud fija de  $L = 1\text{m}$ ”

De esta gráfica vemos que la función velocidad viene expresada por

$$V(x) = 0,0302 x^2 + 0,0746 x + 0,2801$$

Donde  $a = 0,0302$ ,  $b = 0,0746$  y  $c = 0,2801$ . De esta misma manera se hallaron todos los coeficientes de cada polinomio obteniéndose:

L	Coeficientes del polinomio		
	a	b	C
1,0	0,0302	0,0746	0,2801
1,1	0,0250	0,0678	0,2801
1,2	0,0210	0,0621	0,2801
1,3	0,0179	0,0573	0,2801
1,4	0,0154	0,0532	0,2801
1,5	0,0134	0,0497	0,2801
1,6	0,0118	0,0466	0,2801
1,7	0,0104	0,0438	0,2801
1,8	0,0093	0,0414	0,2801
1,9	0,0084	0,0392	0,2801
2,0	0,0075	0,0372	0,2801

Cuadro 3.15. “Coeficientes del polinomio en función de la longitud L”

Luego se procedió a graficar todos los coeficientes en función de x

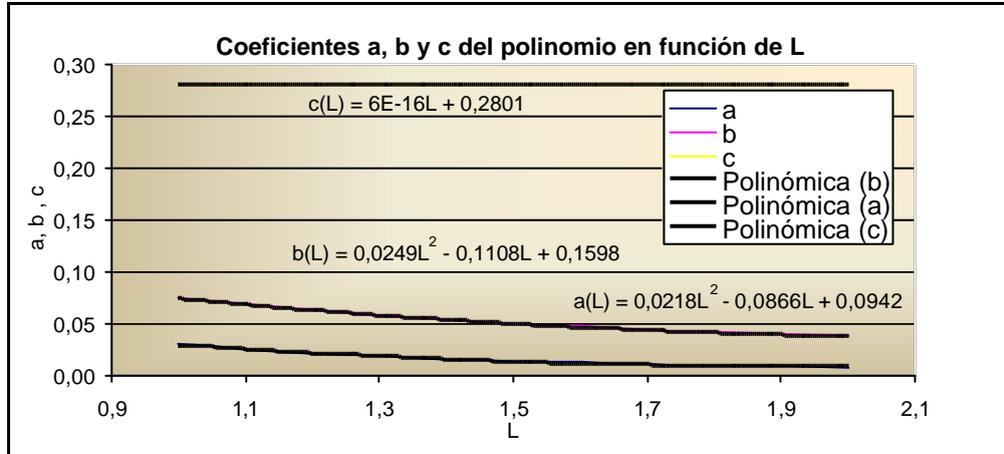


Figura 3.16. “Coeficientes de a, b y c del polinomio en función de L”

De aquí obtenemos:

$$a(L) = 0,0218L^2 - 0,0866L + 0,0942$$

$$b(L) = 0,0249L^2 - 0,1108L + 0,1598$$

$$c(L) = 6e - 16L + 0,2801$$

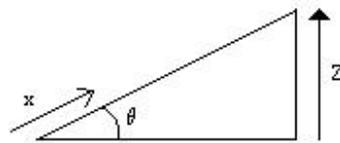
Estos van a ser los nuevos coeficientes de la función velocidad, todo este procedimiento se hizo con la finalidad de obtener una función dependiente de la longitud. Luego la ecuación de la velocidad va a venir expresada como:

$$V(x) = (0,0218L^2 - 0,0866L + 0,0942)x^2 + (0,0249L^2 - 0,1108L + 0,1598)x + (6e - 16L + 0,2801) \quad \text{Ec. 3.45}$$

por lo tanto

$$\frac{dV}{dx} = (0,0436L^2 - 0,1732L + 0,1884)x + (0,0249L^2 - 0,1108L + 0,1598) \quad \text{Ec. 3.46}$$

Y por último tenemos el término “dz” que se expresa de la siguiente forma:



$$Z = x * \text{sen}(\theta)$$

$$dZ = \text{sen}(\theta) * dx \quad \text{Ec. 3.47}$$

Resumiendo

$$d\dot{H}_o = \dot{m}_{as} * [C_p * dT + w dh_v + (1+w) * v * dv + (1+w) dz] * \frac{dx}{dx}$$

Donde

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$w \frac{dh_v}{dx} = \frac{(h_2 - h_1) - Cp^*(T_2 - T_1)}{L}$$

$$V(x) = (0,0218L^2 - 0,0866L + 0,0942)x^2 + (0,0249L^2 - 0,1108L + 0,1598)x + (6e - 16L + 0,2801)$$

$$\frac{dV}{dx} = (0,0436L^2 - 0,1732L + 0,1884)x + (0,0249L^2 - 0,1108L + 0,1598) \quad y$$

$$dZ = \text{sen}(\theta) \cdot dx$$

Integrando la ecuación 3.30 de 0 a L se tiene:

$$\int_0^L d\dot{H}_o = f_2(L)$$

$$\dot{H}_o = \dot{m}^*(h_2 - h_1) + L \cdot \dot{m}^* g \cdot \text{sen}\theta \cdot (1 + W) + \dot{m}^*(1 + w) \cdot (0,0023L^8 - 0,0066L^7 - 0,0037L^6 + 0,0254L^5 + 0,0513L^4 - 0,0199L^3 + 0,0081L^2 + 0,0447L)$$

Ec. 3.48

Iterando con diferentes valores de “h” (altura sección transversal), con los valores de a y b seleccionados anteriormente; se obtienen los siguientes coeficientes para el polinomio de la ecuación 3.48 en función de L.

h	L <sup>8</sup>	L <sup>7</sup>	L <sup>6</sup>	L <sup>5</sup>	L <sup>4</sup>	L <sup>3</sup>	L <sup>2</sup>	L	m*(h <sup>2</sup> -h <sup>1</sup> )
0,0200	8,3019E-06	-2,3823E-05	-1,3355E-05	9,1682E-05	1,8517E-04	-7,1830E-05	2,9237E-05	1,0923E-02	0,0368
0,0400	1,6604E-05	-4,7646E-05	-2,6710E-05	1,8336E-04	3,7034E-04	-1,4366E-04	5,8474E-05	2,1847E-02	0,0736
0,0500	2,0755E-05	-5,9557E-05	-3,3388E-05	2,2920E-04	4,6292E-04	-1,7957E-04	7,3093E-05	2,7308E-02	0,0920
<b>0,0600</b>	<b>2,4906E-05</b>	<b>-7,1469E-05</b>	<b>-4,0066E-05</b>	<b>2,7505E-04</b>	<b>5,5551E-04</b>	<b>-2,1549E-04</b>	<b>8,7711E-05</b>	<b>3,2770E-02</b>	<b>0,1104</b>
0,0800	3,3208E-05	-9,5291E-05	-5,3421E-05	3,6673E-04	7,4067E-04	-2,8732E-04	1,1695E-04	4,3693E-02	0,1471
0,1000	4,1510E-05	-1,1911E-04	-6,6776E-05	4,5841E-04	9,2584E-04	-3,5915E-04	1,4619E-04	5,4617E-02	0,1839
0,1500	6,2264E-05	-1,7867E-04	-1,0016E-04	6,8761E-04	1,3888E-03	-5,3872E-04	2,1928E-04	8,1925E-02	0,2759
0,2000	8,3019E-05	-2,3823E-04	-1,3355E-04	9,1682E-04	1,8517E-03	-7,1830E-04	2,9237E-04	1,0923E-01	0,3678

Cuadro 3.16. “Iteraciones y coeficientes de  $\dot{h}$ ”

Donde los valores resaltados en negritas son los seleccionados para el diseño del calentador.

Para evaluar el flujo másico de aire en la entrada del calentador se utilizó la ecuación 3.41, en donde el valor de velocidad a la entrada del calentador fue medido lo que dio como resultado  $V_e = 0,2798$  m/s, el área de entrada está definida con un valor de  $A = b \cdot h = 0,033$  m<sup>2</sup>, y la densidad se evaluó mediante la ecuación 3.41 a  $T_1$ , luego:

$$\dot{m} = 0,0151 \text{ Kg/s}$$

El valor de la gravedad se tomó como  $g = 9,782$  m/s<sup>2</sup> por estar Venezuela situada a una latitud de 10° Norte [4].

Se tomó un ángulo de inclinación  $\theta = 17,75^\circ$  por ser éste ángulo el óptimo (ver APÉNDICE C).

La humedad por ser un calentamiento sensible se mantiene constante, para hallar su valor nos ubicamos en la carta psicrométrica (ver APÉNDICE B) con  $T_1 = 302,6$  K y  $\phi_1 = 70,1\%$

$$w = 0,01825 \text{ kg}_w / \text{kg}_s$$

$$h_1 = 76,239 \text{ Kj/kg}$$

Para hallar el valor de  $h_2$ , sabiendo que  $w_2 = w = 0,01825 \text{ kg}_w / \text{kg}_s$  y  $T_2 = 312,6 \text{ K}$  y  $\phi_2 = 40,3\%$ .

Tenemos de la carta psicrométrica:

$$h_2 = 86,616 \text{ Kj/kg}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 3.48 obtenemos:

$$\Delta \dot{H}_o(L) = 2.4906 * 10^{-5} L^8 - 7.1469 * 10^{-5} L^7 - 4.0066 * 10^{-5} L^6 + 2.7505 * 10^{-4} L^5 + 5.5551 * 10^{-4} L^4 - 2.1549 * 10^{-4} L^3 + 8.7711 * 10^{-5} L^2 + 3.2770 * 10^{-2} L + 0,1104$$

Ec. 3.49

Por lo tanto

$$\dot{H}_o(L) - q_T(L) = 0 \quad \text{Ec. 3.50}$$

$$2.4906 * 10^{-5} L^8 - 7.1469 * 10^{-5} L^7 - 80,2449 L^6 + 348,0111 L^5 - 480,2451 L^4 + 212,2433 L^3 - 47,2353 L^2 + 6,6793 L + 0,1104 = 0$$

Ec 3.51

Graficando esta función con la finalidad de hallar las raíces del polinomio tenemos:

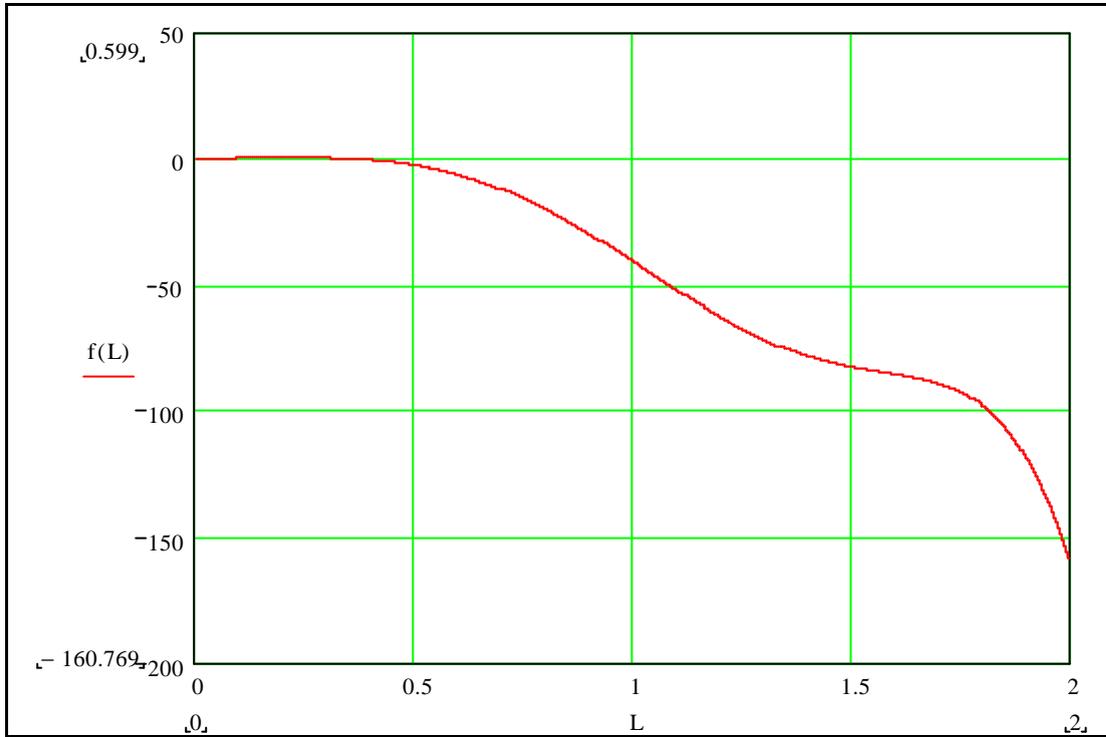


Figura 3.17. “Gráfica de la función  $\dot{H}_0(L) - q_T(L) = 0$ ”

Para observar mejor la raíz se grafica en un rango menor

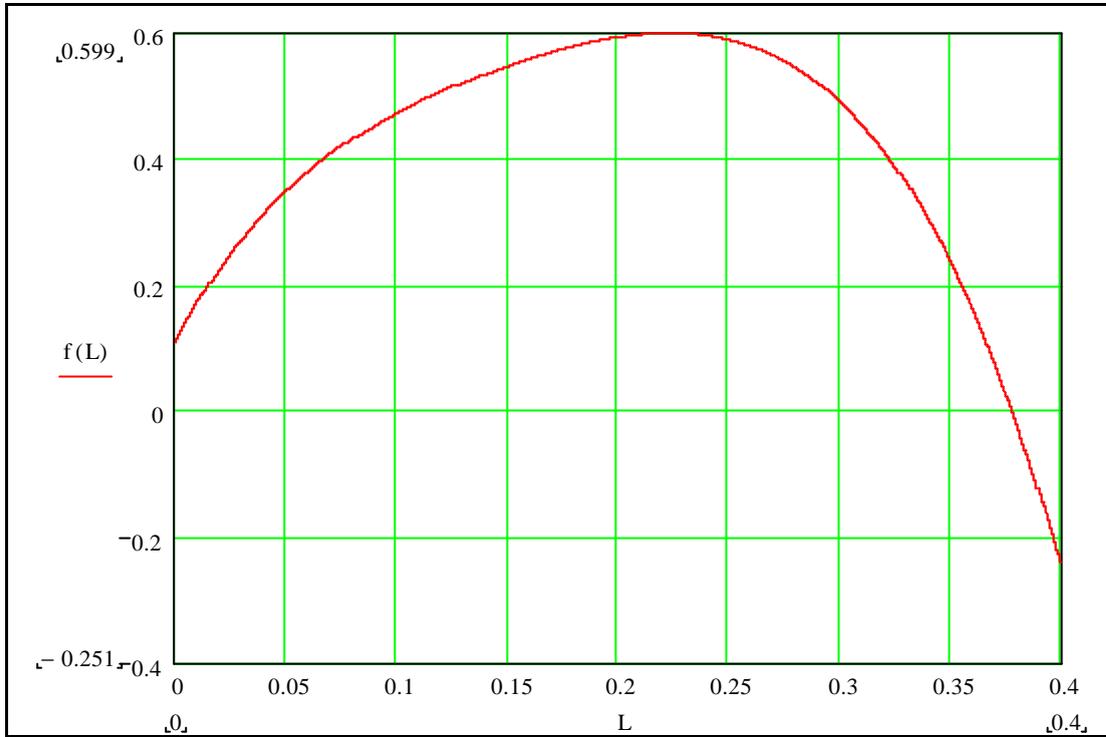


Figura 3.18. “Ampliación de la Gráfica de la función  $\dot{H}_o(L) - q_T(L) = 0$ ”

De donde podemos observar que el valor de  $L \approx 0,38m$ . Luego el área de la placa absorbadora quedaría definida ya con toda su geometría conocida.

Sustituyendo el valor de “L” en las ecuaciones 3.12 y 3.13 obtenemos los valores de los coeficientes locales de conveccion natural para la placa absorbadora y la

superficie selectiva;  $h_{v,i} = 0,4246 \frac{w}{m^2K}$  y  $h_p = 2,0362 \frac{w}{m^2K}$ , respectivamente. El

flujo de calor por conveccion total en el calentador solar plano se evalúa mediante la ecuación 3.29,  $q_T = 0,1467 w$ . La velocidad a la salida del calentador viene dada por

la ecuación 3.45  $V_2 = 0,3355 \frac{m}{s}$ . La metalpía entre la entrada y salida del calentador

se calcula mediante la ecuación 3.49,  $\Delta\dot{H}_0 = 0,1226 w$ .

### 3.7. CÁMARA DE SECADO

Como se ha explicado en líneas anteriores, una de las formas más eficientes para la eliminación de agua del cacao es hacer circular aire caliente a través de él, para ello es necesario la cámara de secado que es donde va a ocurrir este proceso. Ya sabemos que el aire tiende a elevarse por efectos de cambios de densidades por lo que es necesario colocar las bandejas con el contenido de cacao una arriba de otra, dejando una separación entre ellas para que exista una circulación libre del aire de secado.

Para el diseño de la cámara de secado se tomarán los valores obtenidos en el calentador solar, es decir, con el flujo de aire necesario para deshidratar cierta cantidad de producto y a una temperatura óptima para el proceso. Las condiciones a la cual el aire entra a la cámara de secado  $T_2 = 312,6 \text{ K}$ ,  $\phi_2 = 40,3 \%$ ,  $V_2 = 0,3355 \text{ m/s}$  y  $\dot{m} = 0,0151 \text{ Kg/s}$ , que son valores obtenidos experimentalmente del calentador solar y del túnel de secado.

Basándonos en el túnel de secado se pueden estimar las condiciones a la cual el aire sale de la cámara de secado sabiendo que entre el punto 2 y el punto 3 del túnel de secado (Ver figura 3.1) se obtuvo un  $\Delta T = -2,2 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $\Delta\phi = 18,4\%$ . Entonces la temperatura y humedad relativa a la salida de la cámara de secado viene dado por  $T_3 = T_2 + \Delta T$  y  $\phi_3 = \phi_2 + \Delta\phi$

$$T_3 = 310,4 \text{ K}$$

$$\phi_3 = 58,7 \%$$

En la siguiente figura se puede observar el proceso psicrométrico del aire dentro de la cámara de secado:

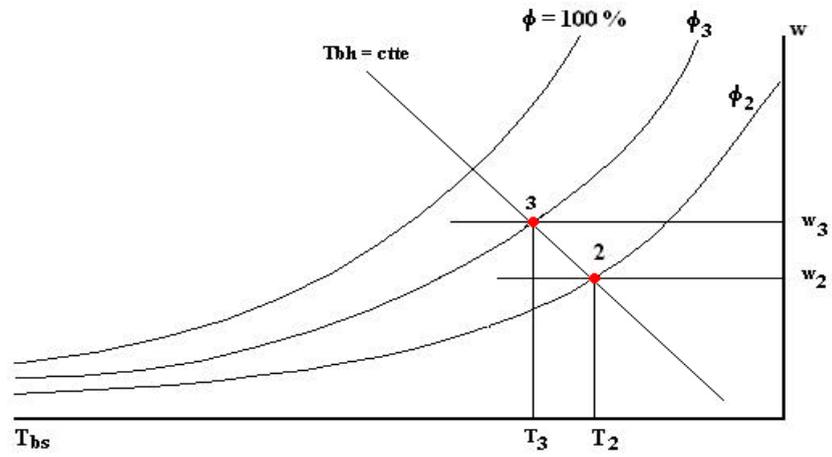


Figura 3.19. “Psicrometría del aire dentro de la cámara de secado”

El aire luego de salir del calentador (punto 2) entra a la cámara de secado perdiendo temperatura y ganando humedad relativa al pasar por los granos húmedos (punto 3) para luego ser liberado al exterior.

## CAPITULO IV

En el siguiente capítulo se dan a conocer las dimensiones propuestas para el deshidratador solar indirecto de cacao, según las ecuaciones y análisis hechos en capítulos anteriores; también se indican los materiales que se recomiendan para su construcción así como sus costos. Por último se discutirá y se concluirá acerca de los resultados obtenidos.

### **4.1. DIMENSIONAMIENTO DEL CALENTADOR SOLAR Y DE LA CÁMARA DE SECADO, MATERIALES Y COSTOS**

#### **4.1.1. Dimensionamiento del calentador solar**

A partir del análisis energético descrito en el capítulo anterior, se obtuvo una ecuación polinómica en función de “L” cuya resolución arrojó un valor de  $L \cong 0,38$  m, pero para el diseño del calentador solar se tomó un  $L = 0,8$  m. con la finalidad de aumentar el flujo de aire caliente dentro de la cámara de secado con los valores de  $a = 0,50$  m,  $b = 0,55$  m y  $h = 0,06$  m que se consideraron anteriormente; por lo que queda totalmente definida el área de la placa absorbadora del calentador solar de aire, como  $A_p = 0,42$  m<sup>2</sup> mediante la ecuación 3.44 cuando  $x = L$ , en la figura 4.1 se hace un esquema de la placa absorbadora.

Por otra parte, una vez que tenemos el área de la placa absorbadora podemos dimensionar también el área de la superficie selectiva, así como también las medidas necesarias para la base del calentador solar como se mostrará en líneas posteriores.

Es importante destacar que la sección transversal del calentador solar tendrá forma trapezoidal, esto con la finalidad de disminuir la cantidad de sombra reflejada sobre la placa absorbadora durante el día debido al movimiento descrito por el sol. La

inclinación óptima del calentador solar es de  $\theta = 17,75^\circ$  con respecto a la horizontal, éste se calculó como se explica en el APÉNDICE C.

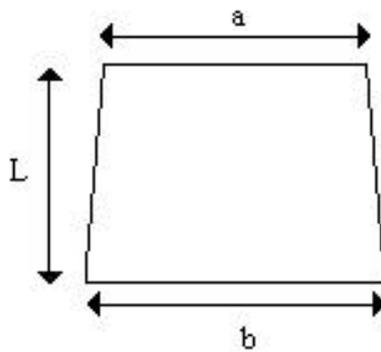


Figura 4.1 “Esquema de la placa absorbidora”

Tomamos una inclinación de  $\theta = 3$

$0^\circ$  para la sección transversal del calentador solar de aire (ver figura 4.2), con la finalidad de disminuir el efecto de la sombra reflejada sobre la placa absorbidora, además es importante destacar que en los cálculos realizados en el capítulo anterior se tomó como supuesto que el área de la placa absorbidora era igual al área de la superficie selectiva, esto con la finalidad de simplificar los cálculos.

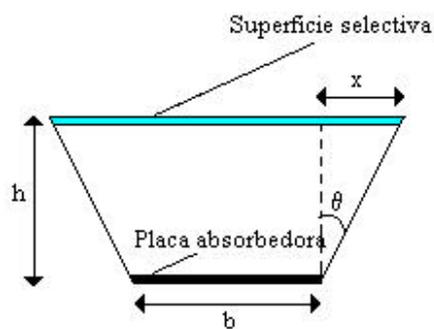


Figura 4.2. “Esquema de la sección transversal del calentador de aire, detalle inclinación”

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{x}{h}, \quad \text{luego} \quad x = h * \operatorname{tg}(\theta)$$

Considerando  $h = 0,06 \text{ m}$  y  $\theta = 30^\circ$  da como resultado  $x = 3,46 \text{ cm} = 0,0346 \text{ m}$ . El ángulo de inclinación se mantiene constante en toda la longitud del calentador.

Finalmente el área de la superficie selectiva viene expresada según la ecuación 3.44 sumándole a los valores de  $a$  y  $b$  el doble del valor de  $x$  dado anteriormente, luego  $A_{SS} = 0,476 \text{ m}^2$ , un esquema de la superficie selectiva se muestra en la siguiente figura

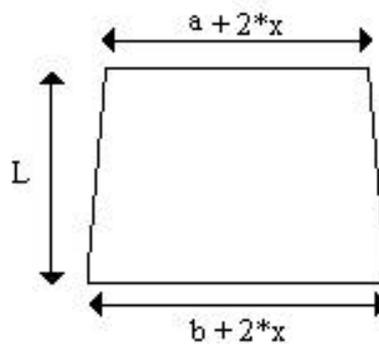
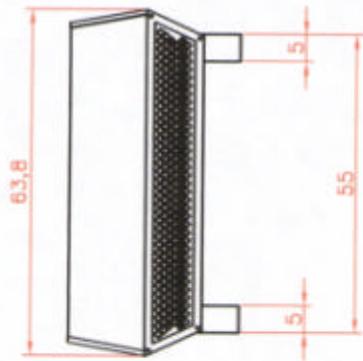
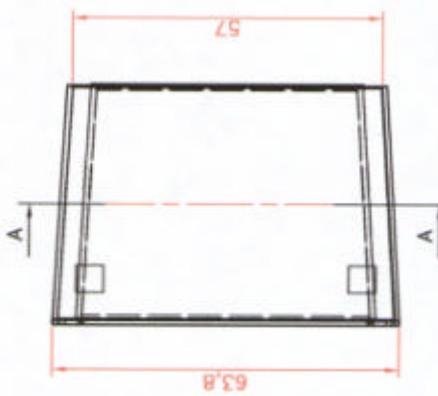
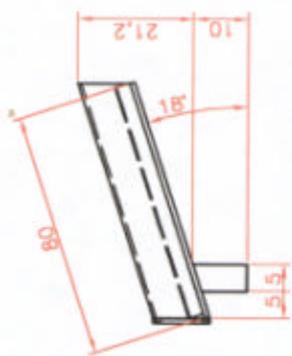


Figura 4.3. “Esquema de la superficie selectiva”

Colocar el aislante térmico (fibra de vidrio) en las paredes laterales del calentador y pintar de negro mate la protección de aluminio que trae la fibra de vidrio aprovechándola como una extensión de la placa absorbadora (ver plano del calentador solar de aire).



DETALLE DE LA REJILLA



CORTE A-A



ISOMETRÍA

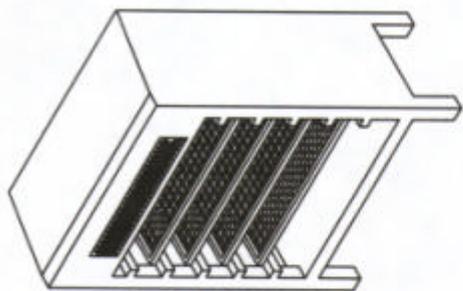
DESHIDRATADOR SOLAR INDIRECTO DE CACAO		TÍTULO:	CALENTADOR SOLAR
DISEÑO:		JUAN MANUEL TEIXEIRA LUIS ANGEL LARIOS	
ESCALA:	1:10	FECHA:	03 JUN 2004

#### **4.1.2. Dimensionamiento de la cámara de secado**

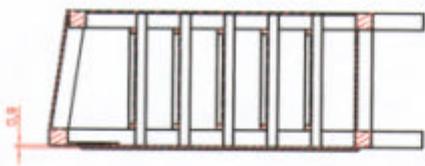
A partir de las dimensiones del calentador solar se diseñó la cámara de secado tomando como punto de partida la parte posterior del calentador. Conociendo las dimensiones del vidrio a la salida del calentador se obtuvo el ancho de la cámara de secado, el largo de la cámara de secado se obtuvo a partir de la cantidad de cacao necesaria por bandeja. Para secar 10 kg. de cacao se dispuso en la cámara de secado de cinco bandejas donde cada una cargaría un peso de 2 kg. ocupando un área de 0,2 m<sup>2</sup> para cada bandeja; conociendo el área y el ancho de la cámara de secado mediante un despeje se puede calcular el largo que tiene un valor de 0,3 m. para un ancho de 0,67 m (ver plano de la cámara de secado).

Se propuso una separación entre bandejas de 10 cm. para dejarle un espacio suficiente para la circulación del aire de secado y el movimiento de la bandeja cuando se carguen y descarguen dichas bandejas.

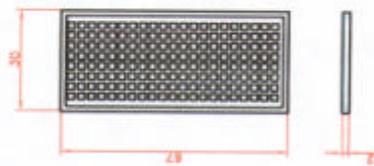
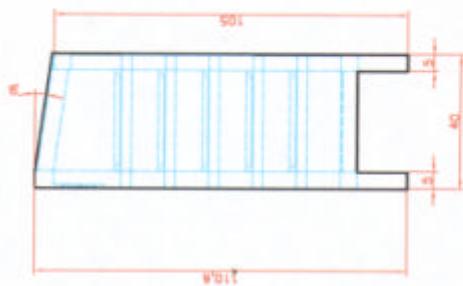
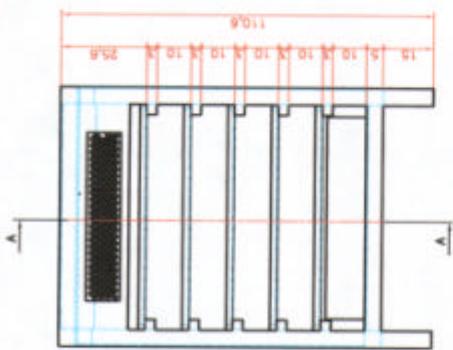
En la parte superior de la cámara de secado se le colocó una abertura para que el aire caliente pueda ser liberado al exterior, garantizando de esta manera que no va a quedar confinada dentro de la cámara de secado.



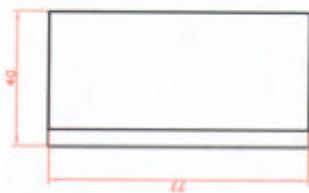
ISOMETRÍA



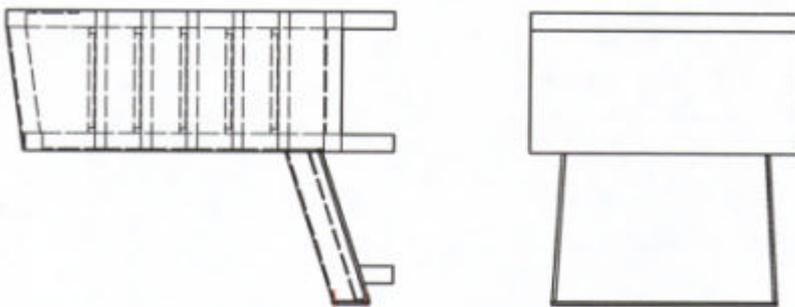
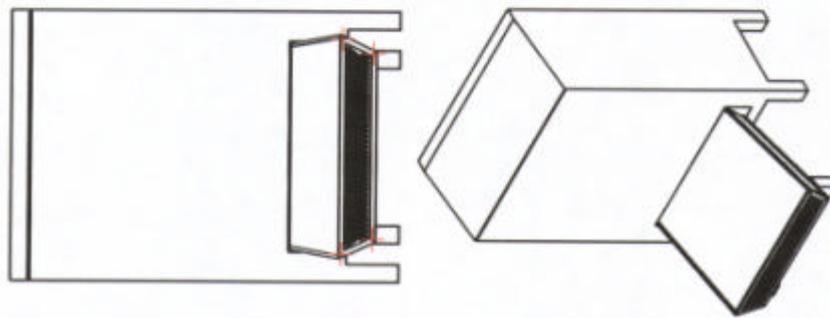
CORTE A-A



DETALLE DE LAS BANDEJAS



<b>DESHIDRATADOR SOLAR INDIRECTO DE CACAO</b>	
DISEÑO: JUAN MANUEL TEIXEIRA LUIS ANGEL LARIOS	TÍTULO: CÁMARA DE SECAD
ESCALA: 1:10	FECHA: 03 JUN 2004



<b>DESHIDRATADOR SOLAR INDIRECTO DE CACAO</b>	
DISEÑO	TÍTULO
JUAN MANUEL TENDERA	DOMESTICA
LUIS A NOLLA LARRO	DESHIDRATADOR SOLAR
ESCALA 1:10	FECHA 08/05/2008

### 4.1.3. Materiales

Es recomendable utilizar una lámina de aluminio de 3 mm. de espesor. Ésta se pinta de negro mate con la finalidad de que absorba toda la irradiación solar incidente sobre ella.

Para la superficie selectiva se recomienda la utilización de vidrio no coloreado de 6 mm. de espesor. Es importante destacar que a medida que el espesor del vidrio aumenta, también aumenta el tiempo necesario en el proceso de transferencia de calor por conducción a través del vidrio desde su cara externa (en contacto directo con la radiación solar) hasta la cara interna (en contacto con el medio de trabajo, en este caso aire); por lo tanto al aumentar el tiempo de transferencia de calor por conducción, habrá un incremento en el tiempo necesario para el calentamiento del aire por convección natural.

Se supuso por falta de información específica que este vidrio en particular (6 mm.) tiene una absorptividad del 15%, una reflectividad de 8% y una transmisividad de 77% [12]. También a mayores espesores la transmisividad disminuye, aumentando así la absorptividad y la reflectividad de éste.

La madera es la mejor opción para el estructura ya que es económico y de fácil manejo, el espesor seleccionado es de 9 mm. ya que es uno de lo más comerciales y se adaptan a las requerimientos del deshidratador; para prevenir su desgaste por la exposición continua a los rayos solares y agua debe ser tratada con anterioridad con productos que la protejan tales como: selladores, poliuretano, etc. Para unir las piezas de madera es recomendable la utilización de tornillos en conjunto con cemento de contacto, esto para evitar daños en el estructura con el movimiento y transporte del mismo.

Para evitar filtraciones o escape de aire caliente entre la unión de la superficie selectiva y la base de madera se debe sellar con silicona.

Con la finalidad de disminuir las pérdidas de calor hacia el exterior del calentador, se recomienda el uso de fibra de vidrio (de 25,4 mm de espesor) [12]

como aislante entre la placa absorbadora y la base de madera, se utiliza éste material por tener una baja conductividad térmica.

#### **4.1.4. Costos**

##### **4.1.4.1. Costos generales o comerciales**

A continuación se dará una lista de materiales con sus respectivos costos para la fecha (Junio 2004), con la finalidad de establecer el precio del deshidratador.

- \* Compuesto Mijao (madera) de 9 mm. de espesor de 1,22 m. x 2,44 m.  
Bs. 46.000
- \* Lámina lisa de aluminio de 3 mm. de espesor de 1,22 m x 2,44 m  
Bs. 220.000
- \* Vidrio translucido de 6 mm. de espesor  
Bs. 60.000 el m<sup>2</sup>
- \* Aislante térmico (fibra de vidrio) con forro de aluminio  
Bs. 13.528 el m<sup>2</sup>
- \* ¼ de galón de sellador para madera  
Bs. 12.000
- \* ¼ de galón de poliuretano  
Bs. 12.000
- \* ¼ de galón de cemento de contacto  
Bs. 9.040
- \* Atomizador negro mate  
Bs. 5.950
- \* Tubo de silicona transparente (cartucho)  
Bs. 12.000
- \* Tornillos

- Bs. 50 c/u
- \* Malla metálica  
Bs. 9.000 el metro
- \* Listones de madera  
Bs. 4.800 el metro
- \* Bisagras  
Bs. 1.000 el par
- \* Seguro y tirador para puerta  
Bs. 4.000

#### 4.1.4.2. Costos específicos para la construcción del deshidratador

* 3 m <sup>2</sup> de madera.....	Bs. 46.000
* 0,45 m <sup>2</sup> de aluminio de 3 mm.....	Bs. 35.000
* 0,5 m <sup>2</sup> de vidrio traslucido de 6 mm.....	Bs. 30.000
* Aislante térmico.....	Bs. 9.500
* 2 ¼ de sellador para madera.....	Bs. 24.000
* 2 ¼ de poliuretano.....	Bs. 24.000
* ¼ de cemento de contacto.....	Bs. 9.040
* Atomizador negro mate.....	Bs. 5.950
* Tubo de silicona transparente (cartucho).....	Bs. 12.000
* 50 Tornillos.....	Bs. 2.500
* 1,1 m <sup>2</sup> Malla metálica.....	Bs. 11.000
* 10 m. de listones de madera .....	Bs. 48.000
* 2 pares de bisagras.....	Bs. 2.000
* Seguro y tirador para puerta.....	Bs. 4.000
Costo total de materiales.....	Bs. 262.990
Mano de obra.....	Bs. 262.990
Total.....	Bs. 525.980

## 4.2. Conclusiones

Se puede decir que con la cantidad de radiación solar que llega a Venezuela es viable el secado de alimentos mediante el uso de energía solar.

Al realizar las pruebas de humedad inicial se verificó la diferencia existente entre las diversidades de cacao existentes en Chuao. Es importante destacar que el secado se realiza mezclando todas las variedades de cacao existentes en la zona bajo estudio. El valor de la humedad inicial de las muestras fermentadas en Chuao es 55,9 %.

Se realizaron cuatro pruebas iniciales (cacao fresco) con la finalidad de referenciar el proceso de secado dentro del túnel de secado.

En las últimas tres pruebas (cacao fermentado) se variaron las condiciones de secado (variación de: temperatura y velocidad de aire); con la finalidad de observar la mayor pérdida de humedad del producto con los parámetros establecidos en las experiencias. Observando mediante estas pruebas que la que mejor resultado aportó fue la prueba # 7 (una resistencia y el ventilador a menos de 700 r.p.m), cuyos valores de humedad crítica, tiempo crítico, tiempo teórico de secado, tiempo real de secado son 1,1645 kgw/kgs, 6 min., 21,22 min. y 11,13 min. respectivamente. Por lo tanto, que se deduce que con menos potencia y menos flujo másico de aire se deshidrata a un porcentaje mayor el producto empleando un tiempo total del proceso menor.

Las temperaturas promedio de la placa absorbadora es de 41,1 °C, de la superficie selectiva (lado superior) 29,7 °C y de la superficie selectiva (lado inferior) 33,9 °C.

Se determinó que la velocidad del aire en convección natural a la entrada de un calentador solar de aire con las dimensiones  $L = 1,25$  m.,  $a = b = 0,20$  y en condiciones climáticas adversas es de 0.2798 m/s. El flujo másico de aire en el calentador de aire propuesto para el deshidratador solar de cacao es  $\dot{m} = 0,0151$  Kg/s y la velocidad del de aire a la entrada de la cámara de secado es  $V_2 = 0,3355$  m/s.

El día más desfavorable para la irradiación solar sobre una superficie inclinada es el 21 de Septiembre a las 9am; y el día más favorable es el 21 de Junio. También se demostró que el ángulo de incidencia óptimo para el calentador es  $17.75^\circ$ .

El valor final de la longitud del calentador solar plano es  $L = 0,80\text{m}$ . Luego el área de la placa absorbadora es de  $A_p = 0,42 \text{ m}^2$  y el área de la superficie selectiva  $A_{SS} = 0,476 \text{ m}^2$ .

#### **4.3. Recomendaciones**

Se recomienda la utilización de mejores instrumentos de control en futuras pruebas en túnel de secado; esto con la finalidad de controlar de forma más eficiente la variación de la temperatura por medio de las resistencias y la velocidad del aire dentro del túnel por medio del ventilador.

Para el calentador solar plano de aire, si por motivos de disponibilidad y de costos, no es posible la utilización de aluminio, podemos sustituir la lámina, por una lámina de zinc o latón.

También se recomienda la realización del experimento del calentador solar plano de aire, pero variando los espesores de la placa absorbadora y de la superficie selectiva, con la finalidad de comprobar las temperaturas alcanzadas por diversos materiales al estar bajo la influencia de la radiación solar.

La continuación del estudio para el deshidratador solar de cacao, mediante la realización de experiencias para la cámara de secado, con la finalidad de representar la deshidratación por convección natural de los granos de cacao utilizando los datos obtenidos previo a la construcción del calentador solar plano de aire que se propone.

Una vez realizadas y completadas las pruebas para el deshidratador solar, comparar los resultados entre el proceso realizado tradicionalmente en la zona de Chuao (secado directo en patio de cemento), con el secado indirecto (deshidratador solar), para verificar la optimización del proceso de secado.

## APÉNDICE A

### **DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD INICIAL PRESENTE EN LOS DIFERENTES TIPOS DE CACAO**

Para poder determinar la humedad inicial de los diferentes tipos de cacao se utilizó la ecuación 2.1, en el siguiente cálculo tipo se da un ejemplo.

Para este cálculo tipo se va a utilizar el cacao #1 con sus respectivos datos como sigue:

$$\%H_o = \frac{3,6069 - 2,4613}{3,6069 - 1,6083} * 100 = 57,3201\%$$

Ese cálculo nos da el valor de la humedad para la primera prueba, este procedimiento se realiza por triplicado y para los otros tipos de cacao. Luego se promedian los tres valores obtenidos en el cacao #1 y ese es el valor final de humedad, lo mismo se repite para los otros tipos de cacao.

Los resultados se muestran en el siguiente cuadro resumen:

Cacao	Triplicado	Tara (g)	Tara + muestra (g)	masa final (g)	% Ho	% Ho,prom.
# 1	1	1,6083	3,6069	2,4613	<b>57,3201</b>	
	2	1,2967	3,2948	2,1444	57,5747	<b>56,8222</b>
	3	1,2681	3,2693	2,1572	55,5717	
# 2	1	1,2652	3,2667	2,2965	48,4736	
	2	1,2375	3,234	2,2754	48,0140	<b>49,0859</b>
	3	1,3307	3,3372	2,3185	50,7700	
# 3	1	1,3333	3,3328	2,2664	53,3333	
	2	1,2753	3,2708	2,2394	51,6863	<b>52,8679</b>
	3	1,2512	3,2503	2,1791	53,5841	
# 4	1	1,3284	3,3292	2,1956	56,6573	
	2	1,2457	3,2451	2,0953	57,5073	<b>56,6949</b>
	3	1,3114	3,3164	2,1952	55,9202	
# 5	1	1,5855	3,5816	2,3116	63,6241	
	2	1,3118	3,3171	2,0497	63,2025	<b>63,2421</b>
	3	1,5916	3,5932	2,3342	62,8997	
# 6	1	1,3109	3,3149	2,1816	56,5519	
	2	1,585	3,5909	2,5258	53,0984	<b>55,9427</b>
	3	1,5906	3,5991	2,4306	58,1777	

Cuadro A.1. “Determinación de humedad (método de desecación en estufa)”

Después de haber determinado la humedad en los diferentes tipos de cacao se procedió a realizar las pruebas en el túnel de secado.

Las pruebas se realizaron con cada uno de los tipos de cacao siendo el de mayor importancia para nuestro estudio el cacao #6 que era el cacao fermentado y ya listo para el proceso de secado.

Primero se tomaron unos granos de cacao y se introdujeron en la cesta que estaba dentro del túnel y que a su vez estaba colocada sobre una balanza, la cual iba registrando la disminución de masa experimentada por el cacao a medida que éste perdía humedad. Luego se prendieron las resistencias y el ventilador y se comenzó con las pruebas; a medida que iba pasando el tiempo se registraron variaciones en el peso del cacao por lo que se tomó un registro de su peso cada media hora, haciéndose más notable esta variación en las primeras tres horas del experimento. A la vez que registrábamos el peso de la muestra para ese instante, también se midió las

temperaturas y las humedades relativas en la entrada al túnel, a la salida de la tobera (ya calentado el aire por las resistencias) y al final de la cesta donde estaban las muestras. Las pruebas se detuvieron cuando notamos que ya no habían cambios significativos de peso en el cacao, por lo que supusimos que pasado cierto tiempo más el cacao ya no era capaz de perder más humedad.

En los siguientes cuadros se darán los resultados de las diferentes pruebas para cada tipo de cacao, en ella se dan los valores de temperatura ( $T_1$ ) y humedad relativa ( $\phi_1$ ) a la entrada del túnel, temperatura ( $T_2$ ) y humedad relativa ( $\phi_2$ ) a la salida de la tobera, temperatura ( $T_3$ ) y humedad relativa ( $\phi_3$ ) a la salida de la cesta, velocidad del aire ( $V$ ) dentro del túnel, intervalos de tiempo ( $t$ ) en que se realizaron las mediciones y por último la variación del peso que marcaba la balanza,

Prueba #1 (Cacao #2; 2 Resistencias)							<b>%Ho =</b>	<b>49,0858</b>
$T_1$ (°C)	$\phi_1$ (%)	$T_2$ (°C)	$\phi_2$ (%)	$T_3$ (°C)	$\phi_3$ (%)	$V$ (m/s)	$t$ (min.)	mw (gr.)
32,5	61,0	50,0	38,0			2,4	0	286,0
35,0	57,6	49,3	36,0	58,0	30,8	2,4	30	277,5
35,0	57,6	50,4	32,3	60,0	30,1	2,4	60	275,0
32,7	57,8	50,4	32,2	60,1	30,4	2,4	90	274,0
32,8	56,2	52,7	32,5	61,3	29,4	2,4	120	272,5
32,1	60,9	52,2	35,3	60,1	32,5	2,4	150	271,5
31,7	63,9	50,8	37,0	59,4	33,3	2,4	180	271,0
31,7	64,5	51,0	36,5	60,2	33,9	2,4	210	270,0
30,9	65,8	47,8	38,9	58,5	32,7	2,4	240	269,5
31,3	66,4	47,5	40,7	57,8	35,2	2,4	270	269,3
28,8	74,2	44,6	42,6	55,0	35,5	2,4	300	269,0
29,8	70,8	46,4	41,3	56,5	32,3	2,4	330	269,0

Cuadro A.2. "Resumen de la prueba #1"

Prueba #2 (Cacao #1; 2 Resistencias)							%Ho =	<b>56,8221</b>
T <sub>1</sub> (°C)	φ <sub>1</sub> (%)	T <sub>2</sub> (°C)	φ <sub>2</sub> (%)	T <sub>3</sub> (°C)	φ <sub>3</sub> (%)	V (m/s)	t (min.)	mw (gr.)
26,5	78,4	46,6	42,7			2,4	0	328,00
27,7	72,9	48,2	40,2	59,2	33,3	2,4	30	315,50
28,4	70,1	47,5	38,0	59,6	32,2	2,4	60	306,00
29,1	66,1	47,8	37,0	59,2	31,2	2,4	90	300,50
30,2	64,8	48,3	37,2	58,9	31,3	2,4	120	297,50
30,3	64,4	48,8	36,3	60,5	30,6	2,4	150	295,00
31,5	64,8	49,1	37,1	60,7	30,8	2,4	180	293,00
36,4	53,3	49,8	36,1	61,6	30,8	2,4	210	291,25
32,0	62,2	49,4	36,9	60,9	31,6	2,4	240	289,75
31,9	61,3	50,4	34,2	61,9	30,4	2,4	270	288,50
31,2	67,9	48,5	38,6	61,2	31,9	2,4	300	287,25
32,8	61,3	53,5	34,5	64,2	30,5	2,4	330	286,25
33,3	56,1	52,7	33,1	64,5	29,9	2,4	360	285,25
33,6	57,3	53,4	34,1	64,3	30,8	2,4	390	284,25
36,3	54,3	53,0	32,8	64,3	29,5	2,4	420	283,25
33,6	58,0	52,6	35,4	63,3	30,6	2,4	450	283,25

Cuadro A.3. “Resumen de la prueba #2”

Prueba #3 (Cacao #4; 2 Resistencias)							%Ho =	<b>56,6949</b>
T <sub>1</sub> (°C)	φ <sub>1</sub> (%)	T <sub>2</sub> (°C)	φ <sub>2</sub> (%)	T <sub>3</sub> (°C)	φ <sub>3</sub> (%)	V (m/s)	t (min.)	mw (gr.)
25,8	83,1	42,8	46,4			2,4	0	273,00
26,6	81,6	46,4	43,5	57,4	38,3	2,4	30	268,50
27,7	79,3	46,2	46,4	57,2	38,5	2,4	60	266,50
27,8	78,5	47,2	43,6	58,5	37,4	2,4	90	264,75
28,3	73,5	47,4	43,0	58,2	37,7	2,4	120	264,00
28,8	70,5	46,8	38,6	58,7	33,7	2,4	150	263,00
29,6	68,4	47,8	38,6	58,6	33,0	2,4	180	262,25
29,6	66,8	48,0	37,2	59,3	33,0	2,4	210	261,50
30,2	63,8	49,6	36,9	60,1	33,1	2,4	240	261,00
31,0	61,3	48,4	35,8	60,2	32,8	2,4	270	260,50
31,3	61,3	48,8	37,8	59,4	31,7	2,4	300	260,00
31,3	57,8	48,9	34,2	60,1	29,9	2,4	330	259,25
31,8	56,9	48,3	35,1	60,1	30,3	2,4	360	258,75
31,7	55,9	48,2	35,0	60,2	30,9	2,4	390	258,25
31,5	56,3	48,0	35,3	60,1	30,6	2,4	420	258,25

Cuadro A.4. “Resumen de la prueba #3”

Prueba #4 (Cacao #5; 2 Resistencias)							%Ho =	63,242
T <sub>1</sub> (°C)	φ <sub>1</sub> (%)	T <sub>2</sub> (°C)	φ <sub>2</sub> (%)	T <sub>3</sub> (°C)	φ <sub>3</sub> (%)	V (m/s)	t (min.)	mw (gr.)
30,8	60,7	47,6	39,4			2,4	0	254,50
32,2	60,2	53,0	30,0	63,3	29,9	2,4	30	251,75
32,0	59,3	53,5	31,5	63,5	29,9	2,4	60	250,75
31,2	64,0	52,3	36,5	61,1	32,4	2,4	90	250,00
31,4	66,0	51,3	36,0	60,3	32,6	2,4	120	249,50
31,6	65,8	50,6	37,0	32,1	32,7	2,4	150	249,25
31,6	65,4	50,3	36,8	31,4	32,8	2,4	180	249,00
30,2	69,3	52,3	33,9	31,2	32,5	2,4	210	248,50
30,1	69,8	49,9	34,3	59,7	329,0	2,4	240	248,50

Cuadro A.5. “Resumen de la prueba #4”

Prueba #5 (Cacao #6; 2 Resistencias)							%Ho =	55,9426
T <sub>1</sub> (°C)	φ <sub>1</sub> (%)	T <sub>2</sub> (°C)	φ <sub>2</sub> (%)	T <sub>3</sub> (°C)	φ <sub>3</sub> (%)	V (m/s)	t (min.)	mw (gr.)
25,8	81,7	43,7	42,4			2,4	0	575,00
26,6	78,1	46,9	40,1	51,2	41,5	2,4	30	548,25
28,1	78,9	51,1	42,0	55,0	39,1	2,4	60	521,75
27,3	76,4	49,0	41,1	54,7	39,6	2,4	90	502,25
27,3	75,7	48,9	40,1	52,2	36,8	2,4	120	488,50
25,9	79,1	48,7	40,4	54,6	36,1	2,4	150	478,50
25,8	80,6	46,3	41,0	54,2	38,1	2,4	180	471,00
26,8	75,8	48,7	39,4	56,0	38,3	2,4	210	465,25
26,6	76,2	48,7	41,0	56,0	38,5	2,4	240	459,50
27,1	73,9	47,5	38,2	56,3	38,5	2,4	270	454,00
27,7	69,9	51,7	34,7	56,8	34,0	2,4	300	449,00
28,6	67,3	51,7	35,3	59,9	34,1	2,4	330	444,00
28,6	69,7	51,3	40,4	56,3	34,7	2,4	360	439,75
28,7	71,8	51,7	38,3	58,6	34,8	2,4	390	435,00
28,9	70,4	51,2	37,6	58,7	34,6	2,4	420	431,00
26,8	79,4	49,9	38,6	56,6	34,6	2,4	450	428,00
27,2	76,5	48,6	40,0	57,2	35,0	2,4	480	425,50
27,2	75,0	48,3	39,2	57,6	34,3	2,4	510	423,00
27,0	76,1	48,9	39,3	56,4	36,0	2,4	540	421,00
26,1	80,0	48,2	41,3	55,4	36,5	2,4	570	419,00
25,8	80,0	48,9	40,7	52,1	36,3	2,4	600	417,00
26,0	79,4	49,2	41,3	51,8	35,7	2,4	630	417,00

Cuadro A.6. “Resumen de la prueba #5”

PRUEBA #6 (CACAO #6; 1 Resistencia)							%Ho =	55,9426
T <sub>1</sub> (°C)	φ <sub>1</sub> (%)	T <sub>2</sub> (°C)	φ <sub>2</sub> (%)	T <sub>3</sub> (°C)	φ <sub>3</sub> (%)	V (m/s)	t (min.)	mw (gr.)
22,2	86,9	32,8	65,3			2,4	0	642,25
23,1	88,6	33,3	62,6	36,8	61,1	2,4	30	624
24,2	84,6	34,4	61,6	38,3	58,9	2,4	60	602,5
25,3	80,6	35,4	58,8	38,9	56,4	2,4	90	583
25,6	78,6	35,3	53,3	40,2	52,3	2,4	120	567,5
26,4	72,8	36,2	52,8	41,3	50,7	2,4	150	554
27,1	71,4	36,8	53,4	41,7	550,4	2,4	180	543
27,4	68,8	37,3	52,5	42,5	50,4	2,4	210	535
28,2	66,7	38,6	51,9	43,4	48,0	2,4	240	527,25
28,6	66,6	41,2	51,5	44,5	47,6	2,4	270	520,25
28,7	67,7	41,7	50,5	44,7	47,4	2,4	300	515
28,4	69,8	40,3	55,2	43,2	48,7	2,4	330	509,75
28,8	68,3	39,6	55,1	43,7	48,3	2,4	360	505
29,4	66,7	40,3	55,0	43,5	47,7	2,4	390	500,25
29,2	67,0	41,2	54,7	43,8	46,3	2,4	420	495,5
29,4	66,5	41,7	55,0	43,5	44,7	2,4	450	490,75
28,9	67,3	42,3	54,8	42,9	45,3	2,4	480	486,25
28,6	67,7	42,3	54,9	43,2	45,9	2,4	510	481,5
27,9	67,2	41,9	55,2	43,5	44,8	2,4	540	477,5
29,3	66,8	42,0	55,0	43,1	44,6	2,4	570	473,25
28,9	66,9	41,3	52,8	42,9	44,6	2,4	600	470
28,7	68,0	42,2	52,6	42,9	44,2	2,4	630	470

Cuadro A.7. "Resumen de la prueba #6"

PRUEBA #7 (CACAO #6; 1 Resistencias; rpm < 700)							%Ho =	55,9426
T <sub>1</sub> (°C)	φ <sub>1</sub> (%)	T <sub>2</sub> (°C)	φ <sub>2</sub> (%)	T <sub>3</sub> (°C)	φ <sub>3</sub> (%)	V (m/s)	t (min.)	mw (gr.)
26,6	79,9	39,9	53,2			2,0	0	845,00
26,5	79,4	39,5	52,9	41,1	51,9	2,0	30	811,25
27,1	77,4	39,1	49,1	37,1	50,1	2,0	60	775,00
27,6	75,3	39,9	47,0	43,8	46,4	2,0	120	732,00
29,0	73,2	40,4	46,7	44,2	45,9	2,0	150	708,00
29,1	75,1	41,1	45,4	45,8	43,7	2,0	180	693,00
29,7	69,3	41,1	47,2	45,8	44,8	2,0	210	681,00
30,2	69,7	40,9	46,3	43,8	44,6	2,0	240	670,00
30,0	70,0	41,0	47,3	44,7	43,3	2,0	270	661,25
30,4	65,1	41,1	46,9	47,3	43,5	2,0	300	652,00
30,5	66,4	42,6	48,5	47,7	46,0	2,0	330	644,00
30,6	65,8	41,1	48,9	46,0	45,5	2,0	360	635,00
30,4	65,7	40,8	48,0	47,5	45,1	2,0	390	629,00
31,0	66,1	40,9	47,9	45,5	45,6	2,0	420	622,00
29,9	69,2	41,3	46,1	44,3	44,7	2,0	480	610,00
29,1	72,4	39,2	51,0	46,5	44,7	2,0	510	605,00
29,9	71,1	39,6	49,3	46,6	44,2	2,0	540	600,00
29,3	73,7	41,3	51,6	46,4	46,4	2,0	570	595,50
29,1	73,5	41,3	51,0	46,2	47,1	2,0	600	591,50
28,9	73,6	41,1	50,6	46,1	48,0	2,0	630	587,50
28,4	74,3	40,6	50,6	44,2	46,7	2,0	660	584,00
28,1	74,7	40,2	50,6	43,9	46,2	2,0	690	580,50
27,8	74,9	39,8	50,2	43,6	45,9	2,0	720	577,25
20,6	76,7	40,3	50,2	45,5	45,7	2,0	750	574,50

Cuadro A.8. "Resumen de la prueba #7"

## CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO

Una vez finalizadas las pruebas en el túnel de secado se procedió a la construcción de la curva de secado para cada una de las pruebas realizadas. Para la elaboración de dichas curvas de secado se aplicó el siguiente procedimiento:

1.- Se multiplicó la masa de la muestra a experimentar por la humedad inicial en base a la unidad. Por ejemplo, en la primera prueba la humedad inicial es de 49,0858% (0,490858 en base unitaria) este valor se multiplicó por la masa de la muestra, en este caso 286 g. dando como resultado  $m_w = 140,3853$  g.

2.- Se multiplicó la masa de la muestra por la diferencia en base unitaria en base seca; siguiendo el ejemplo anterior,  $1 - 0,490858 = 0,509142$  ; dando como resultado  $m_s = 145,6146$  g.

3.- Luego aplicando la ecuación 3.1, para cada una de las mediciones de  $h$

$$\text{prueba, continuando con los datos del ejemplo: } w = \frac{140,3853}{145,6146} = 0,9640 \frac{\text{kgw}}{\text{kgs}}$$

4.- Por último, con todos los valores de “w” en cada prueba y los tiempos de cada una de las mediciones se construyó el gráfico w vs. tiempo, llamada curva de secado. Del ejemplo anterior se obtuvo el siguiente cuadro de datos y la correspondiente curva de secado para la prueba #1.

mw	ms(g.)	m (g)	wj	t (min.)
140,3853	145,6146	286	0,9640	0
136,2130	141,2869	277,5	0,93543	30
134,9859	140,014	275	0,92700	60
134,4950	139,5049	274	0,92363	90
133,7588	138,7411	272,5	0,91858	120
133,2679	138,2320	271,5	0,91520	150
133,0225	137,9774	271	0,91352	180
132,5316	137,4683	270	0,91015	210
132,2862	137,2137	269,5	0,90846	240
132,1635	137,08648	269,25	0,90762	270
132,0408	136,9591	269	0,90678	300
132,0408	136,9591	269	0,90678	330

Cuadro A.9. “Variación de w con respecto al tiempo para la prueba #1”

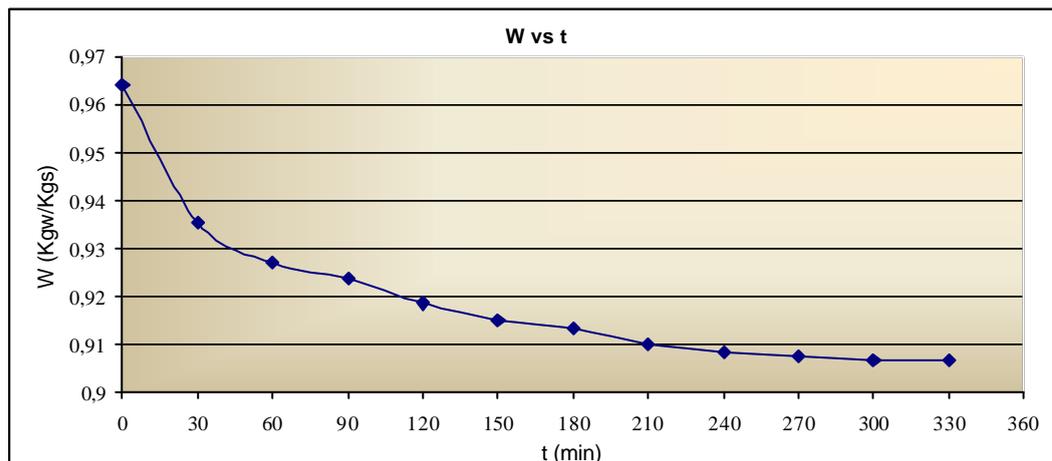


Figura A.1. “Curva de Secado para la prueba #1”

A continuación se muestran los cuadros resúmenes de variación de  $w$  con el tiempo de todas las pruebas con sus respectivas curvas de secado.

Prueba #2

mw	ms (g)	m (g)	wj	t (min.)
186,3765	141,6235	328	1,3160	0
179,2737	136,2263	315,5	1,2658	30
173,8756	132,1244	306	1,2277	60
170,7504	129,7496	300,5	1,2057	90
169,0457	128,4543	297,5	1,1936	120
167,6252	127,3748	295	1,1836	150
166,4888	126,5112	293	1,1756	180
165,4944	125,7556	291,25	1,1686	210
164,6420	125,1080	289,75	1,1625	240
163,9318	124,5682	288,5	1,1575	270
163,2215	124,0285	287,25	1,1525	300
162,6533	123,5967	286,25	1,1485	330
162,0850	123,1650	285,25	1,1445	360
161,5168	122,7332	284,25	1,1405	390
160,9486	122,3014	283,25	1,1365	420
160,9486	122,3014	283,25	1,1365	450

Cuadro A.10. “Variación de  $w$  con respecto al tiempo para la prueba #2”

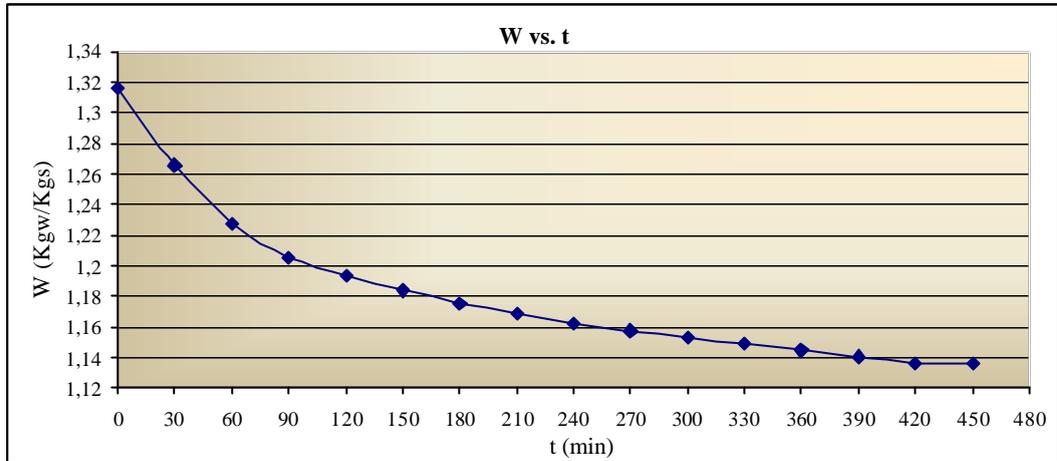


Figura A.2. "Curva de Secado para la prueba #2"

Prueba #3

mw (g)	ms (g)	m (g)	wj	t (min.)
154,7771	118,2229	273	1,3092	0
152,2258	116,2742	268,5	1,2876	30
151,0919	115,4081	266,5	1,2780	60
150,0997	114,6503	264,75	1,2696	90
149,6745	114,3255	264	1,2660	120
149,1076	113,8924	263	1,2612	150
148,6824	113,5676	262,25	1,2576	180
148,2572	113,2428	261,5	1,2540	210
147,9737	113,0263	261	1,2516	240
147,6902	112,8098	260,5	1,2493	270
147,4067	112,5933	260	1,2469	300
146,9815	112,2685	259,25	1,2433	330
146,6981	112,0519	258,75	1,2409	360
146,4146	111,8354	258,25	1,2385	390
146,4146	111,8354	258,25	1,2385	420

Cuadro A.11. "Variación de w con respecto al tiempo para la prueba #3"

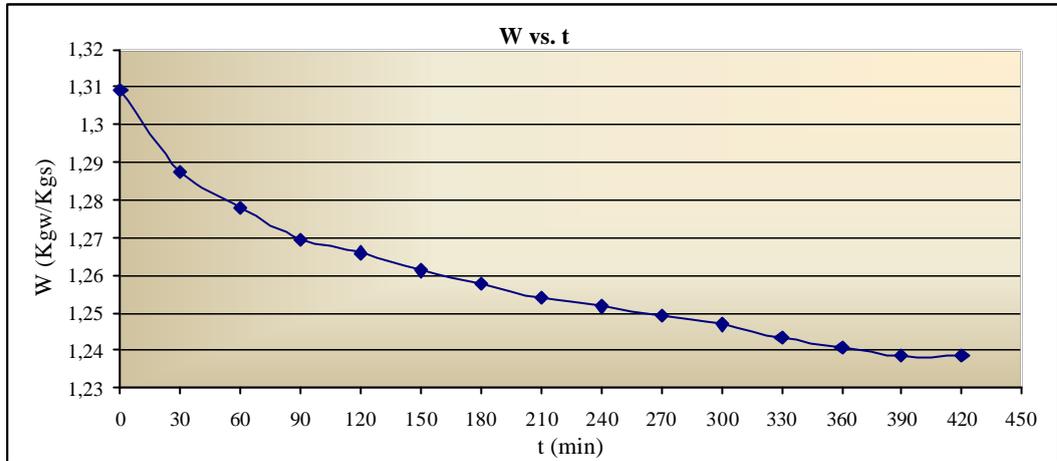


Figura A.3. "Curva de Secado para la prueba #3"

Prueba #4

mw (g)	ms (g)	m (g)	wj	t (min.)
160,9509	93,5491	254,5	1,7205	0
159,2117	92,5383	251,75	1,7019	30
158,5793	92,1707	250,75	1,6951	60
158,1050	91,8950	250	1,6901	90
157,7888	91,7112	249,5	1,6867	120
157,6307	91,6193	249,25	1,6850	150
157,4726	91,5274	249	1,6833	180
157,1564	91,3436	248,5	1,6799	210
157,1564	91,3436	248,5	1,6799	240

Cuadro A.12. "Variación de w con respecto al tiempo para la prueba #4"

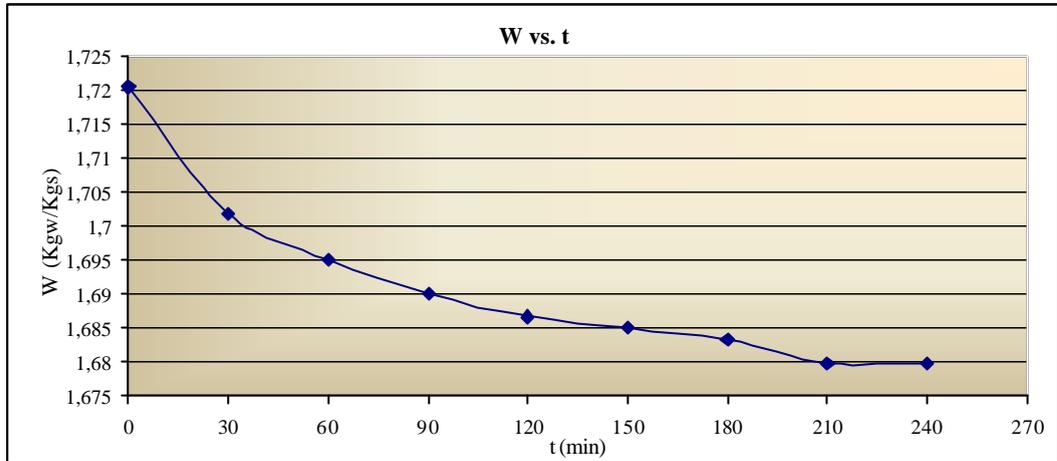


Figura A.4. "Curva de Secado para la prueba #4"

Prueba #5

mw (g)	ms (g)	m (g)	wj	t (min.)
321,6700	253,3301	575	1,2698	0
306,7053	241,5447	548,25	1,2107	30
291,8805	229,8695	521,75	1,1522	60
280,9717	221,2783	502,25	1,1091	90
273,2796	215,2204	488,5	1,0787	120
267,6853	210,8147	478,5	1,0567	150
263,4896	207,5104	471	1,0401	180
260,2729	204,9771	465,25	1,0274	210
257,0562	202,4438	459,5	1,0147	240
253,9794	200,0206	454	1,0026	270
251,1823	197,8177	449	0,9915	300
248,3851	195,6149	444	0,9805	330
246,0076	193,7424	439,75	0,9711	360
243,3503	191,6497	435	0,9606	390
241,1126	189,8874	431	0,9518	420
239,4343	188,5657	428	0,9451	450
238,0358	187,4642	425,5	0,9396	480
236,6372	186,3628	423	0,9341	510
235,5183	185,4817	421	0,9297	540
234,3995	184,6005	419	0,9253	570
233,2806	183,7194	417	0,9209	600
233,2806	183,7194	417	0,9209	630

Cuadro A.13. "Variación de w con respecto al tiempo para la prueba #5"

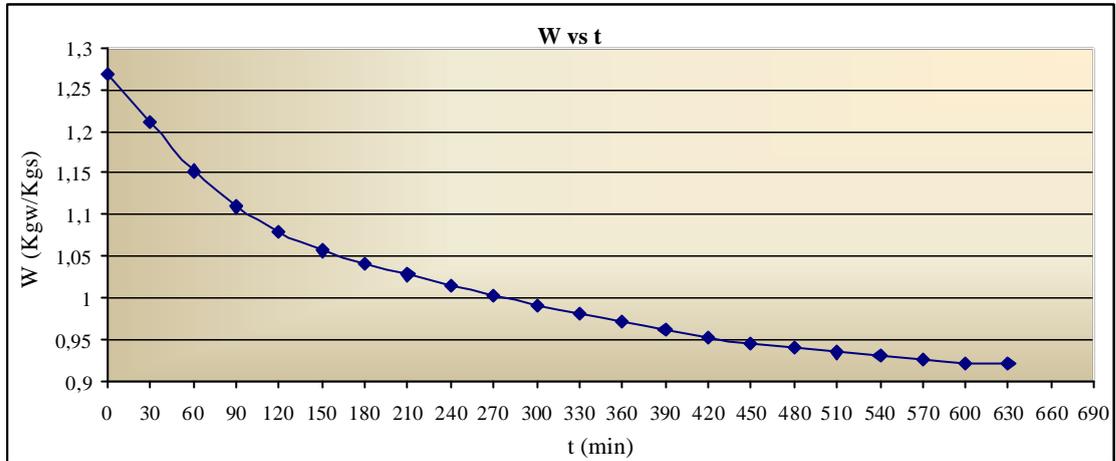


Figura A.5. "Curva de Secado para la prueba #5"

Prueba #6

mw (g)	ms (g)	m (g)	wj	t (min.)
359,2913	282,9587	642,2500	1,2698	0
349,0818	274,9182	624,0000	1,2337	30
337,0542	265,4458	602,5000	1,1912	60
326,1454	256,8546	583,0000	1,1526	90
317,4743	250,0257	567,5000	1,1220	120
309,9220	244,0780	554,0000	1,0953	150
303,7683	239,2317	543,0000	1,0735	180
299,2929	235,7071	535,0000	1,0577	210
294,9574	232,2926	527,2500	1,0424	240
291,0414	229,2086	520,2500	1,0286	270
288,1044	226,8956	515,0000	1,0182	300
285,1674	224,5826	509,7500	1,0078	330
282,5101	222,4899	505,0000	0,9984	360
279,8529	220,3971	500,2500	0,9890	390
277,1956	218,3044	495,5000	0,9796	420
274,5383	216,2117	490,7500	0,9702	450
272,0209	214,2291	486,2500	0,9613	480
269,3636	212,1364	481,5000	0,9520	510
267,1259	210,3741	477,5000	0,9440	540
264,7484	208,5016	473,2500	0,9356	570
262,9302	207,0698	470,0000	0,9292	600
262,9302	207,0698	470,0000	0,9292	630

Cuadro A.14. "Variación de w con respecto al tiempo para la prueba #6"

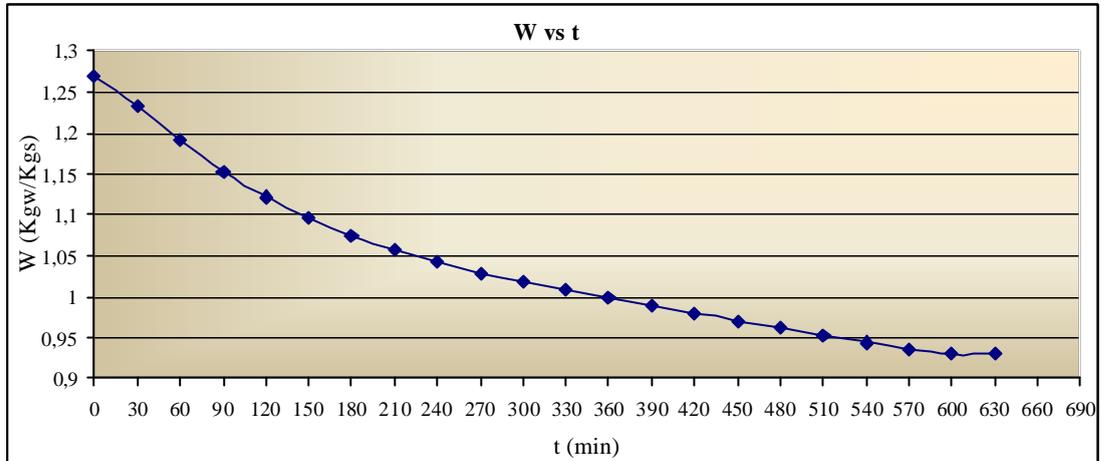


Figura A.6. "Curva de Secado para la prueba #6"

Prueba #7

mw (g)	ms (g)	m (g)	wj	t (min.)
472,7150	372,2850	845,0000	1,2698	0
453,8343	357,4157	811,2500	1,2191	30
433,5552	341,4449	775,0000	1,1646	60
409,4998	322,5002	732,0000	1,1000	120
396,0736	311,9264	708,0000	1,0639	150
387,6822	305,3178	693,0000	1,0414	180
380,9691	300,0309	681,0000	1,0233	210
374,8154	295,1846	670,0000	1,0068	240
369,9204	291,3296	661,2500	0,9936	270
364,7458	287,2542	652,0000	0,9797	300
360,2703	283,7297	644,0000	0,9677	330
355,2355	279,7645	635,0000	0,9542	360
351,8790	277,1210	629,0000	0,9452	390
347,9630	274,0370	622,0000	0,9347	420
341,2499	268,7501	610,0000	0,9166	480
338,4527	266,5473	605,0000	0,9091	510
335,6556	264,3444	600,0000	0,9016	540
333,1382	262,3618	595,5000	0,8948	570
330,9005	260,5995	591,5000	0,8888	600
328,6628	258,8372	587,5000	0,8828	630
326,7048	257,2952	584,0000	0,8776	660
324,7468	255,7532	580,5000	0,8723	690
322,9287	254,3213	577,2500	0,8674	720
321,3902	253,1098	574,5000	0,8633	750

Cuadro A.15. "Variación de w con respecto al tiempo para la prueba #7"

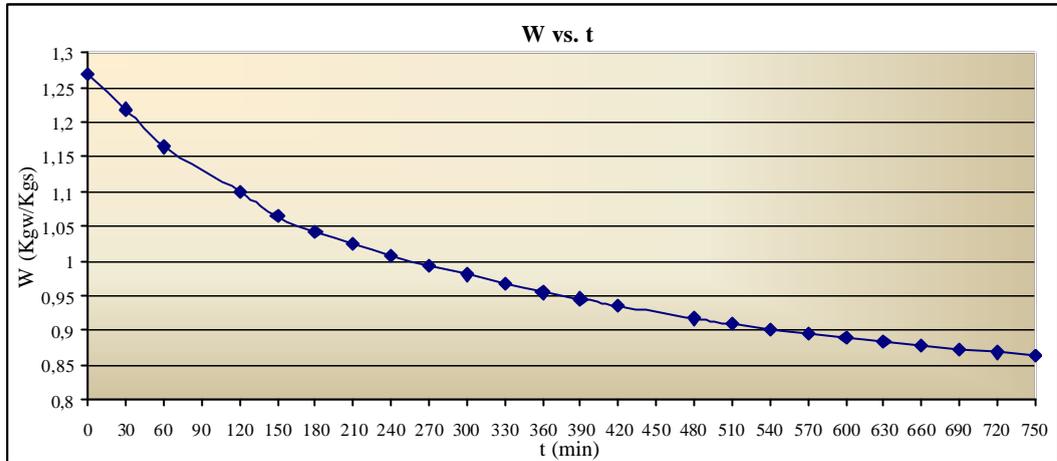


Figura A.7. “Curva de Secado para la prueba #7”

## DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y TIEMPO CRÍTICO

Para la determinación de la humedad y tiempo crítico de las pruebas de secado, siendo la humedad y el tiempo crítico el punto donde existe el cambio más notable de pendiente en la curva de secado, se procedió a estimar para cada prueba dichas variables de la siguiente manera:

1.- Se tomó la curva de secado respectiva a cada prueba y se dividió por aproximaciones lineales en pequeños intervalos.

2.- Una vez conocidas las ecuaciones de estas curvas linealizadas se derivaron, obteniendo así las pendientes respectivas, de esta manera se fueron verificando en que punto se hacia el cambio de pendiente más notable, el cual fue tomado como la humedad crítica ( $w_c$ ) en el tiempo crítico ( $t_c$ ).

A continuación se muestran las curvas de secado con sus respectivas aproximaciones lineales y adjunto a cada una de ellas un cuadro resumen correspondiente a las ecuaciones de las funciones de aproximación, sus derivadas, los intervalos de cambio de pendiente más brusco y por último su respectiva humedad y tiempo crítico.

### Prueba #1

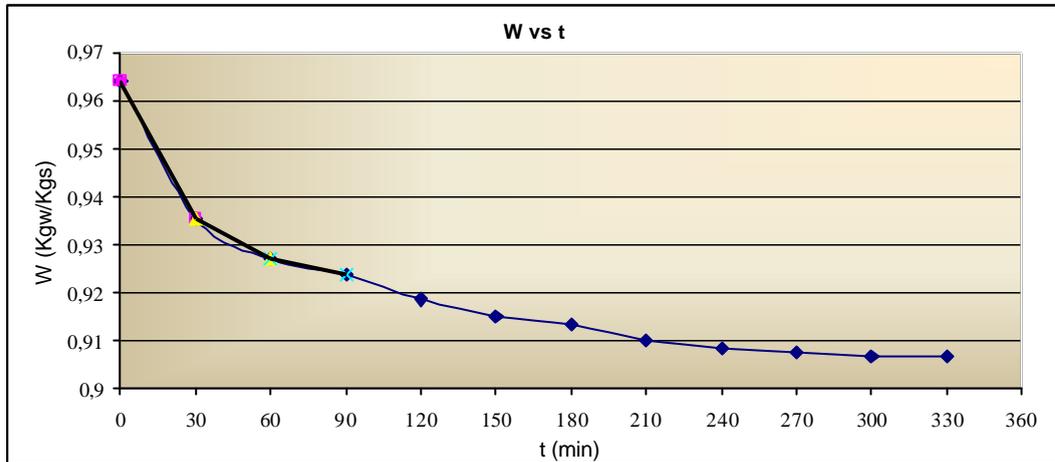


Figura A.8. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #1”

Intervalos (min.)	rectas	pendientes	cambio de pendiente	wc (kgw/kgs)	tc (min.)
	y	y'	$\Delta m$		
0 - 30	$-0,001x + 0,9641$	-0,001		0,9354	30
30-60	$-0,0003x + 0,9439$	-0,0003	<b>-0,0007</b>		
60-90	$-0,0001x + 0,9338$	-0,0001	-0,0002		

Cuadro A.16. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #1”

## Prueba #2

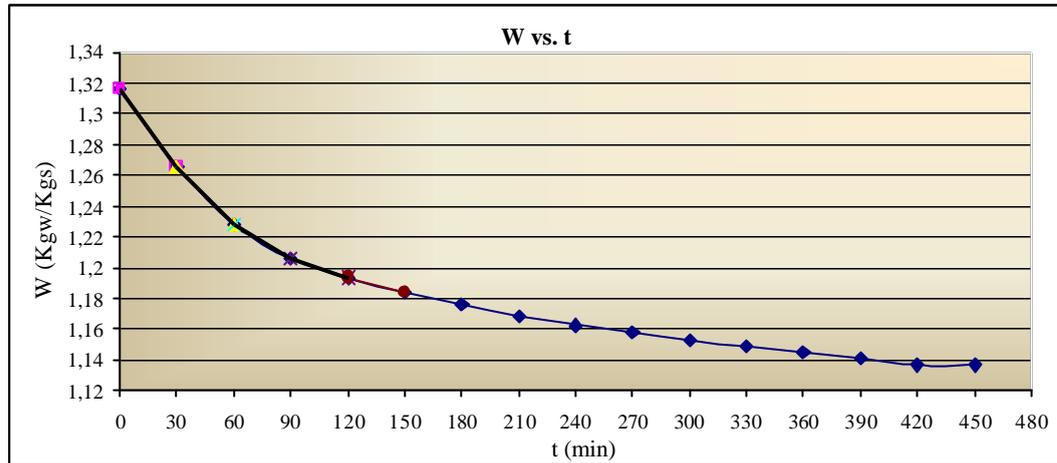


Figura A.9. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #2”

Intervalos (min.)	rectas	pendientes	cambio de pendiente	wc (kgw/kgs)	tc (min.)
	y	y'	$\Delta m$		
0 - 30	$-0,0017x + 1,316$	-0,0017		1,2056	90
30-60	$-0,0013x + 1,304$	-0,0013	-0,0004		
60-90	$-0,0007x + 1,2719$	-0,0007	<b>-0,0006</b>		
90 - 120	$-0,0004x + 1,2418$	-0,0004	-0,0003		

Cuadro A.17. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #2”

### Prueba #3

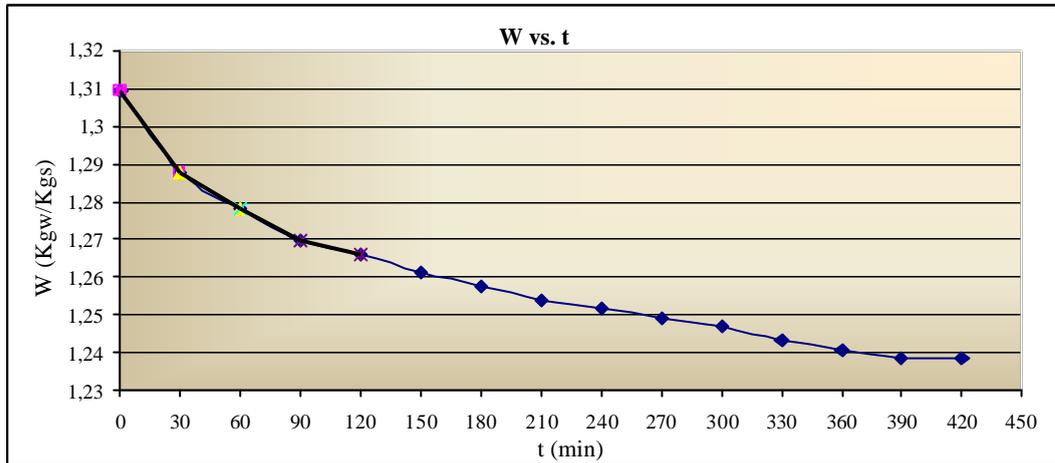


Figura A.10. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #3”

Intervalos (min.)	rectas	pendientes	cambio de pendiente	wc (kgw/kgs)	tc (min.)
	y	y'	$\Delta m$		
0 - 30	$-0,0007x + 1,3092$	-0,0007		1,2876	30
30-60	$-0,0003x + 1,2972$	-0,0003	<b>-0,0004</b>		
60-90	$-0,0003x + 1,2948$	-0,0003	0		
90 - 120	$-0,0001x + 1,2804$	-0,0001	-0,0002		

Cuadro A.18. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #3”

### Prueba #4

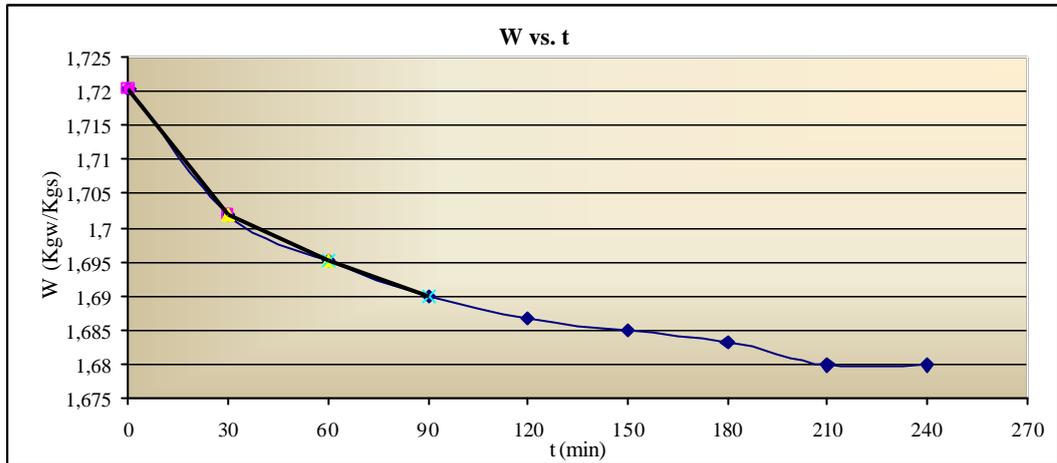


Figura A.11. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #4”

Intervalos (min.)	rectas	pendientes	cambio de pendiente	wc (kgw/kgs)	tc (min.)
	y	y'	$\Delta m$		
0 - 30	-0,0006x + 1,7205	-0,0006		1,7019	30
30-60	-0,0002x + 1,7087	-0,0002	<b>-0,0004</b>		
60-90	-0,0002x + 1,7053	-0,0002	0		

Cuadro A.19. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #4”

### Prueba #5

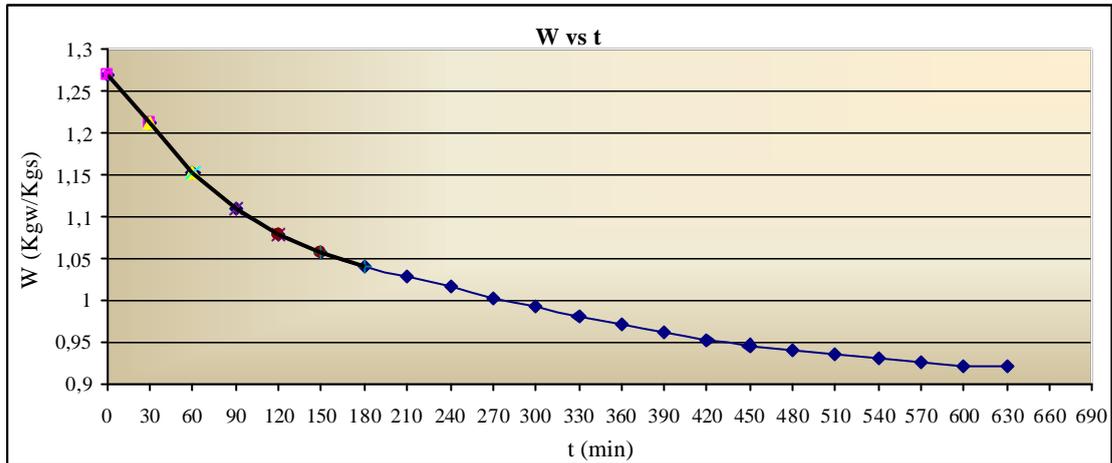


Figura A.12. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #5”

Intervalos (min.)	rectas	pendientes	cambio de pendiente	wc (kgw/kgs)	tc (min.)
	y	y'	$\Delta m$		
0 - 30	$-0,002x + 1,2698$	-0,002		1,1521	60
30-60	$-0,002x + 1,2692$	-0,002	0		
60-90	$-0,0014x + 1,2383$	-0,0014	<b>-0,0006</b>		
90 - 120	$-0,001x + 1,2002$	-0,001	-0,0004		
120 - 150	$-0,0007x + 1,1671$	-0,0007	-0,0003		
150 - 180	$-0,0006x + 1,1395$	-0,0006	-0,0001		

Cuadro A.20. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #5”

### Prueba #6

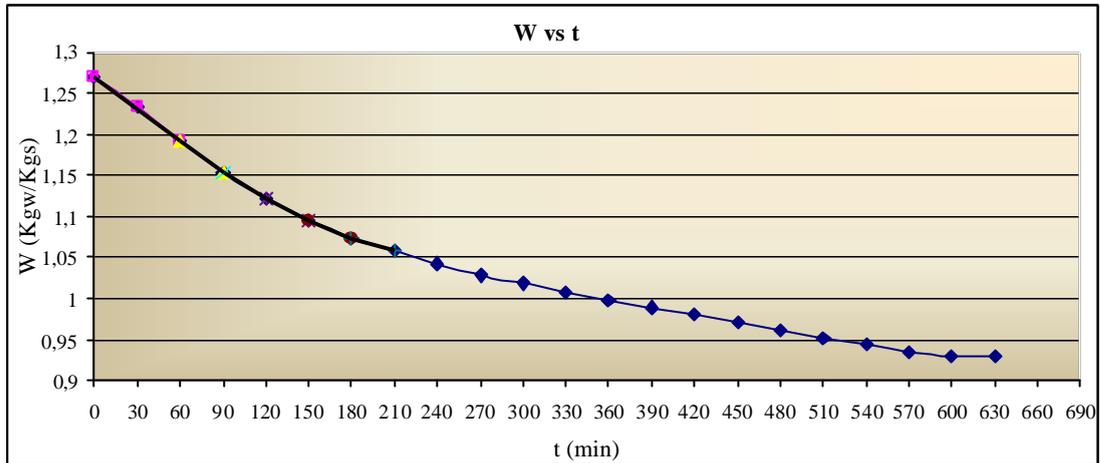


Figura A.13. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #6”

Intervalos (min.)	rectas	pendientes	cambio de pendiente	wc (kgw/kgs)	tc (min.)
	y	y'	$\Delta m$		
0 - 30	$-0,0013x + 1,2708$	-0,0013		1,1526	90
30-60	$-0,0013x + 1,2683$	-0,0013	0		
60-90	$-0,001x + 1,2446$	-0,001	-0,0003		
90 - 120	$-0,0009x + 1,2287$	-0,0009	<b>-0,0001</b>		
120 - 150	$-0,0007x + 1,204$	-0,0007	-0,0002		
150 - 180	$-0,0005x + 1,1684$	-0,0005	-0,0002		

Cuadro A.21. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #6”

### Prueba #7

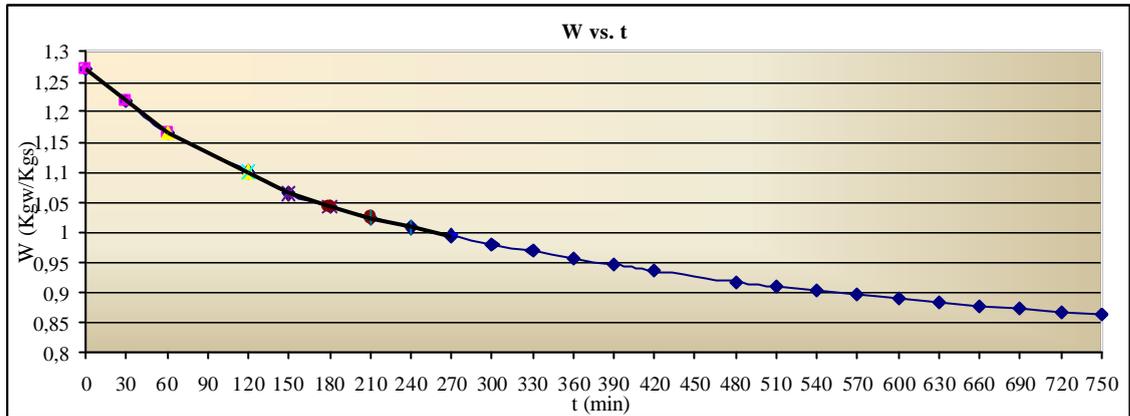


Figura A.14. “Aproximaciones lineales para la curva de Secado para la prueba #7”

Intervalos (min.)	rectas	pendientes	cambio de pendiente	wc (kgw/kgs)	tc (min.)
	y	y'	$\Delta m$		
0 - 30	$-0,0018x + 1,2704$	-0,0018		1,1645	60
30-60	$-0,0011x + 1,2292$	-0,0011	-0,0007		
60-90	$-0,0012x + 1,2442$	-0,0012	<b>1E-04</b>		
90 - 120	$-0,0008x + 1,1766$	-0,0008	-0,0004		
120 - 150	$-0,0006x + 1,1496$	-0,0006	-0,0002		
150 - 180	$-0,0006x + 1,139$	-0,0006	0		
180 - 210	$-0,0004x + 1,112$	-0,0004	-0,0002		

Cuadro A.22. “Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico para prueba #7”

A continuación se resumen en cuadro las humedades críticas con sus respectivos tiempos críticos para todas las pruebas en el túnel de secado.

Prueba	Tipo de cacao	Humedad Crítica (kgw/kgs) "wc"	Tiempo critico tc (min.)
1	Fresco	0.9354	30
2	Fresco	1.2056	90
3	Fresco	1.2876	30
4	Fresco	1.7019	30
5	Fermentado	1.1521	60
6	Fermentado	1.1526	90
7	Fermentado	1.1645	60

Cuadro A.23. "Humedades y tiempos críticos para cada prueba"

### **DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD FINAL REAL**

Para la determinación de la humedad final real de todas las pruebas realizadas se programó una hoja de cálculo donde se aplica la ecuación 2.2, como se expuso en el capítulo II la humedad final teórica es un valor dado. Lo que se muestra a continuación es una corrida del programa nombrado en líneas anteriores, en este caso los valores representados son los valores de la prueba #1.

CÁLCULOS PARA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD FINAL REAL PRUEBA #1		
1.- Cálculo de mw a ser removida		
mi :	masa inicial de la muestra	
mw :	masa de agua en la muestra	
Ho :	humedad inicial	
Hf :	humedad final	
mi (g) =	45	
mw (g) =	20,09631522	"mw a ser removida"
Ho (%) =	49,0858	
Hf (%) =	8	" Dato teórico"
2.- Cálculo de mw removido en el proceso		
mft :	masa final teórica	
mfr :	masa final real	
mft =	24,90368478	
mfr =	28	
mwr =	17	
hfr =	18,17360714	"Humedad final real"

Cuadro A.24. "Estimación de la humedad final real prueba #1"

## DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LAS DIFERENTES PRUEBAS

Para el cálculo de la tasa de secado (de las tres últimas pruebas) durante el período de velocidad constante se utilizó la ecuación 2.3 y para el cálculo de la velocidad en los períodos decreciente se utilizó la ecuación 2.4; estos valores de velocidad se resumen en la siguiente tabla.

Prueba	Rc (kgw/hr*m2)	R1 (kgw/hr*m2)	R2 (kgw/hr*m2)
5	0,052124	0,000355	0,000089
6	0,034602	0,000399	0,000133
7	0,046628	0,000310	0,000133

Cuadro A.25. "Valores de velocidad de secado en los tres períodos"

Donde,  $R_c$  es el período de velocidad constante,  $R_1$  es el primer período de velocidad decreciente y  $R_2$  es el segundo período de velocidad decreciente.

Las gráficas de las curvas de tasa de secado para las tres últimas pruebas se pueden apreciar en la figura 3.6.

### **DETERMINACIÓN DEL TIEMPO TOTAL PARA EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN EN EL TÚNEL DE SECADO**

Los tiempos totales para el proceso de secado calculados en las tres últimas pruebas, se estimaron utilizando las formulas descritas en el capítulo II, y dieron como resultado lo siguiente:

Prueba	Tiempo total teórico (min.)	Tiempo total teórico (Hr.)	Tiempo total real (min.)	Tiempo total real (Hr.)
5	1129,6178	18,8269	714,0746	11,9012
6	1702,2561	28,3709	787,8026	13,1300
7	1273,5060	21,2251	667,9871	11,1331

Cuadro A.26. “Comparación entre tiempo total teórico y tiempo total real”

Expuesto lo anterior, es importante aclarar lo siguiente, para el calculo del tiempo total teórico se basan los cálculos en la suposición de que la muestra varía su humedad desde una humedad inicial hasta la humedad final teórica. Para el calculo del tiempo total real se considera la humedad final alcanzada por la muestra al final del proceso de secado en el túnel y en base a este valor se realizan los cálculos del tiempo total real.

## APÉNDICE B

### CÁLCULOS PSICROMÉTRICOS

Para los cálculos psicrométricos utilizamos el programa de psicrometría del libro de Termodinámica (volumen II, 2<sup>da</sup> edición) del autor Cengel Yunus.

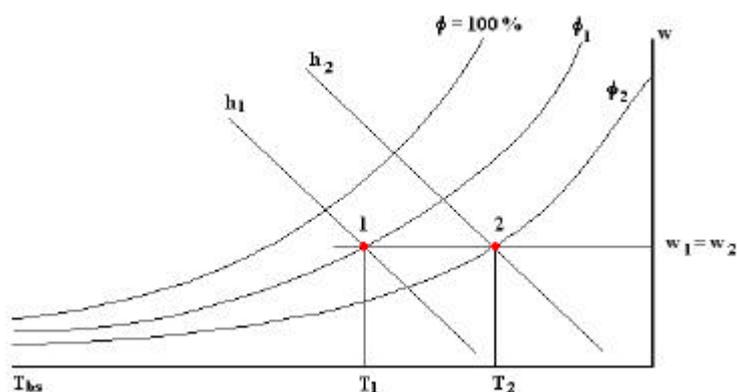


Figura B.1. “Psicrometría del aire dentro del calentador (calentamiento sensible)”

Para obtener los valores de entalpía y humedad absoluta en la entrada del calentador, se introdujeron en el programa los siguientes datos,  $T_1 = 29,4\text{ °C}$  y  $\phi_1 = 70,1\%$ , de los cuales obtuvimos los siguientes resultados:

$$h_1 = 76,239 \text{ kJ/kgs} \quad \text{y} \quad w_1 = 0,01825 \text{ kgw/kgs}$$

Luego como  $w_1 = w_2$  y  $T_2 = T_1 + 10\text{ °C}$ , se introdujeron en el programa con la finalidad de obtener los valores de entalpía y humedad relativa a la salida del calentador, obteniéndose lo siguiente:

$$h_2 = 86,616 \text{ kJ/kg} \quad y \quad \phi_2 = 40,2\%$$

A continuación se muestran las corridas realizadas en el programa

\*\*\*\*\*

SESSION NUMBER = 1

23:44:30 05-12-2004

\*\*\*\*\*

PSYCHROMETRIC ANALYSIS BY CENGEL/BOLES

Case = 2, Tdb and Phi were given

$$T_{ref} = 0.000 \text{ C}$$

$$P_t = 101.325 \text{ kPa} \quad P_v = 2.8892 \text{ kPa}$$

$$T_{db} = 29.438 \text{ C} \quad T_{wb} = 25.009 \text{ C}$$

$$\text{Phi} = 70.129 \% \quad w = \mathbf{0.018254 \text{ kg water/kg dry air}}$$

$$h = \mathbf{76.237 \text{ kJ/kg dry air}} \quad v = 0.8829 \text{ cu m/kg dry air}$$

$$\text{MU} = 0.69252 \quad T_{dp} = 23.422 \text{ C}$$

\*\*\*\*\*

SESSION NUMBER = 2

23:45:39 05-12-2004

\*\*\*\*\*

PSYCHROMETRIC ANALYSIS BY CENGEL/BOLES

Case = 5, Tdb and w were given

$$T_{ref} = 0.000 \text{ C}$$

$P_t = 101.325 \text{ kPa}$                        $P_v = 2.8887 \text{ kPa}$   
 $T_{db} = 39.438 \text{ C}$                        $T_{wb} = 27.440 \text{ C}$   
 **$\Phi = 40.252 \%$**                        $w = 0.018250 \text{ kg water/kg dry air}$   
 **$h = 86.615 \text{ kJ/kg dry air}$**                        $v = 0.9120 \text{ cu m/kg dry air}$   
 $MU = 0.38499$                        $T_{dp} = 23.419 \text{ C}$

## APÉNDICE C

### RADIACIÓN SOLAR

El objetivo del siguiente Apéndice es ampliar las características de la radiación solar y los factores que la afectan al entrar en contacto con atmósfera terrestre.

### RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

#### Constante solar

La constante solar,  $I_{sc}$ , está definida como la cantidad de energía solar que incide perpendicularmente por unidad de tiempo sobre una superficie de área unitaria, colocada fuera de la atmósfera terrestre a una distancia del sol igual a la distancia promedio sol – tierra.

La referencia radiométrica mundial WRR (World Radiometric reference) del WRC (World Radiation Center) es:

$$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2 = 433.3 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) = 1.96 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min.}) \quad \text{Ec. C.1}$$

Con una desviación estándar de  $1.6 \text{ W/m}^2$  y una desviación máxima de  $\pm 7 \text{ W/m}^2$ .

#### Variación de la radiación extraterrestre

Debido a que la intensidad de la radiación solar varía de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, la variación de la distancia tierra – sol durante el año da lugar a una variación de la radiación solar extraterrestre  $G(n)$ :

$$G(n) = I_{sc} * \left[ 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right) \right] \quad \text{Ec. C.2}$$

en donde n es el numero del día ( $1 < n < 365$ ). Esta función tiene una variación de 3,3 %, con el máximo de  $1412 \text{ W/m}^2$  el 1 de enero y el mínimo de  $1322$  el 1 de julio.

### Distribución espectral de la radiación solar extraterrestre

La radiación solar son ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda. La constante solar es la energía total por unidad de área y de tiempo, considerando todas las longitudes de onda de la radiación solar. Para muchos propósitos como por ejemplo fotosíntesis y celdas solares, es conveniente conocer como está distribuida esa energía de acuerdo a su longitud de onda o frecuencia, es decir, su distribución espectral. La siguiente figura muestra el espectro de la radiación solar extraterrestre.

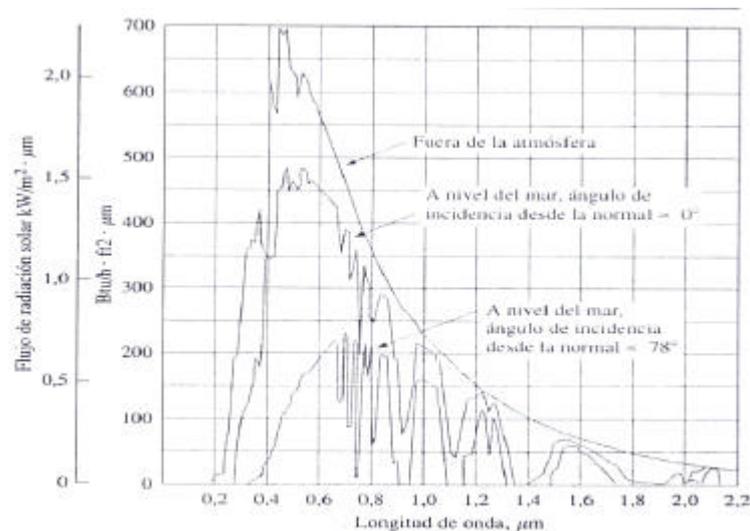


Figura C.1. “Distribución espectral de la radiación solar en función de las condiciones atmosféricas y el ángulo de incidencia”

El espectro se suele dividir en las tres regiones siguientes:

a.- La región llamada visible ( $0,38\mu\text{m} < \lambda < 0,78\mu\text{m}$ ) porque es el rango que puede detectar el ojo humano y dentro del cual están los colores violeta ( $0,42\mu\text{m}$ ), azul ( $0,48\mu\text{m}$ ), verde ( $0,52\mu\text{m}$ ), amarillo ( $0,57\mu\text{m}$ ), anaranjado ( $0,60\mu\text{m}$ ) y rojo ( $0,70\mu\text{m}$ ).

b.- La región invisible más allá del rojo ( $\lambda > 0,78\mu\text{m}$ ), conocido como infrarrojo lejano o región de las ondas de calor.

c.- La región invisible antes del violeta ( $\lambda < 0,38\mu\text{m}$ ), denominada ultravioleta.

De acuerdo a lo anterior, a cada región corresponde una fracción de la constante solar, distribuida así: 7 % al ultravioleta ( $95,7 \text{ W/m}^2$ ), 47,3 % al visible ( $646,6 \text{ W/m}^2$ ), 45,7 % al infrarrojo ( $624,7 \text{ W/m}^2$ ).

## **RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE**

La energía solar es afectada por la atmósfera terrestre tanto en su dirección como en su intensidad.

### **Interacción de la radiación con la atmósfera**

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa de la tierra que se mantiene alrededor de ella por la acción de la fuerza gravitacional. La figura C.2 muestra esquemáticamente los diferentes procesos que sufre la radiación en su interacción con la atmósfera.

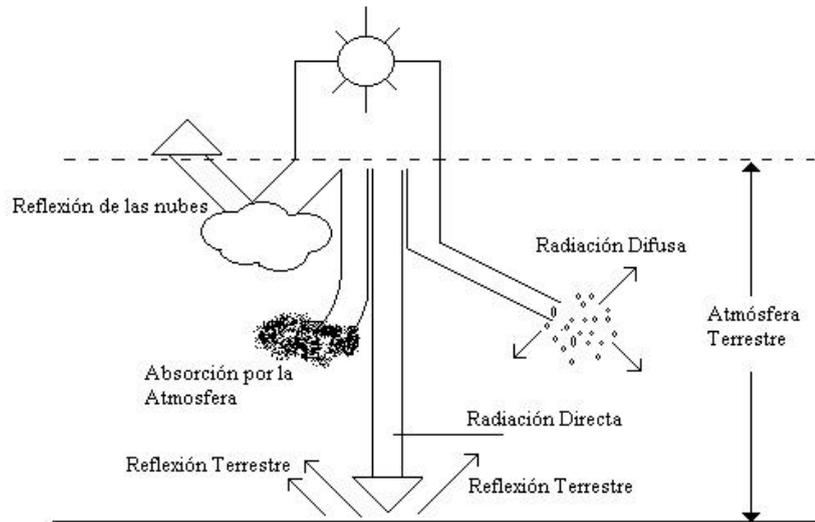


Figura C.2. “Interacción de la radiación con la atmósfera terrestre”

Parte de la radiación directa incidente se transforma en difusa (o radiación sin ninguna dirección preferencial) debido al fenómeno de la dispersión, el cual se debe a la presencia en la atmósfera de vapor de agua, moléculas que componen el aire y partículas de polvo. Otra parte de la radiación solar es absorbida en la atmósfera. La absorción del ultravioleta se debe predominantemente al ozono, la del infrarrojo al vapor de agua y dióxido de carbono, y la del visible nuevamente al ozono.

Como resultado de la interacción con la atmósfera, la radiación solar recibida sobre una superficie horizontal terrestre se compone de radiación solar directa y radiación solar difusa (radiación solar global).

La atenuación y el cambio en el espectro dependen de la masa de aire atravesada. Esta se suele designar por  $A_m$  (Air Mass  $n$ ).  $A_m$  (figura C.3) está dada por:

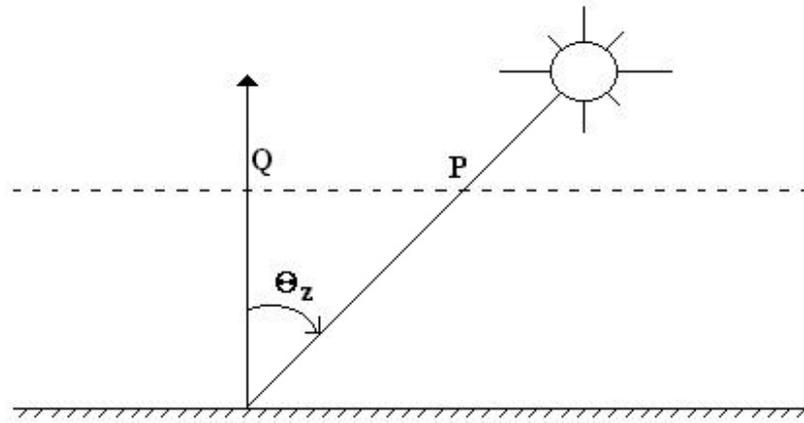


Figura C.3. “Trayectoria de la radiación solar a través de la atmósfera terrestre”

$$AM_n = AM(\sec(\theta_z)) \quad \text{Ec. 3}$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital.

Así, AM0 corresponde a la radiación solar extraterrestre, AM1 a la masa atravesada por la radiación cuando el sol está en el cenit y el observador a nivel de mar a presión atmosférica de 760mm Hg.

### **Dirección de la radiación solar directa**

La dirección de la radiación solar directa sobre una superficie de, orientación arbitraria se puede describir en termino de diferentes ángulos.

$\phi$  Latitud del lugar. Posición angular hacia el norte o hacia el sur del Ecuador.  $\phi$  es positivo en el hemisferio norte ( $0^\circ < \phi < 90^\circ$ ) y negativo en el hemisferio sur ( $-90^\circ < \phi < 0^\circ$ ).

$\delta$  Declinación. Posición angular del sol al mediodía con respecto al plano del Ecuador. Es positivo en el hemisferio norte y varía entre  $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$ .

$\beta$  Inclinación de la superficie. Ángulo entre la superficie en consideración y la horizontal ( $0^\circ < \beta \leq 180^\circ$ ).

$\Gamma$  Ángulo acimutal. Desviación de la proyección de la normal de la superficie del meridiano local ( $-180^\circ \leq \Gamma \leq 180^\circ$ ).  $\Gamma$  es positivo para superficies orientadas hacia el oeste y negativo para superficies orientadas hacia el oriente.

$\Gamma_s$  Ángulo acimutal del sol. Desviación de la proyección de la radiación directa del meridiano local (convenciones como en el caso de  $\Gamma$ ).

$w$  Ángulo horario. Desplazamiento angular del sol hacia el este o al oeste del meridiano local, debido al movimiento de rotación de la tierra alrededor de su eje ( $w < 0^\circ$  para la mañana,  $w > 0^\circ$  para la tarde,  $w = 0^\circ$  para el mediodía).

$\theta$  Ángulo entre la radiación directa sobre la superficie y la normal a la superficie.

$\theta_z$  Ángulo de incidencia de la radiación directa y la normal de la superficie.

$\alpha$  Altitud del sol. Ángulo formado entre la dirección del sol y la horizontal. Por consiguiente  $\alpha + \theta_z = 90^\circ$

La dirección de la radiación solar directa que incide sobre una superficie de cualquier orientación con respecto a las coordenadas locales puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \text{Sen}\delta * \text{Sen}\phi * \text{Cos}\beta - \text{Sen}\delta * \text{Cos}\phi * \text{Sen}\beta * \text{Cos}\Gamma + \text{Cos}\delta * \text{Cos}\phi * \text{Cosw} * \text{Cos}\beta \\ & + \text{Cos}\delta * \text{Sen}\phi * \text{Sen}\beta * \text{Cos}\Gamma * \text{Cosw} + \text{Cos}\delta * \text{Sen}\beta * \text{Sen}\Gamma * \text{Senw} \end{aligned}$$

Ec. C.4

w se calcula como:

$$w = 15^\circ * (12 - h) \quad \text{Ec. C.5}$$

en donde la h es la hora.

La declinación se calcula como:

$$\delta = 23,45^\circ * \text{Sen}\left[360^\circ * \frac{(284 + n)}{365}\right] \quad \text{Ec. C.6}$$

donde n es el numero del día del año, con  $1 \leq n \leq 365$ .

$\theta_z$  puede calcularse mediante la ecuación 4, simplemente haciendo  $\beta = 0^\circ$

$$\cos\theta_z = \text{Sen}\delta * \text{Sen}\phi + \text{Cos}\delta * \text{Cos}\phi * \text{Cosw} \quad \text{Ec. C.7}$$

## **RADIACIÓN SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS**

La radiación solar recibida por una superficie inclinada está compuesta por la radiación directa recibida del sol, la radiación difusa proveniente del cielo y la radiación reflejada por el piso y las superficies vecinas.

### **Irradiancia solar directa sobre superficies inclinadas**

La Irradiancia solar directa recibida por una superficie inclinada  $G_{b,T}$ , depende tanto de las variaciones de la radiación solar directa incidente durante el día  $G_{b,I}$  como el ángulo  $\theta$  que forma ésta con la normal a la superficie.

$$G_{b,T} = G_{b,I} * \text{Cos} \theta_1 \quad \text{Ec. C.8}$$

El  $\text{Cos} \theta_1$  debe expresarse en términos de las coordenadas de la localidad donde se encuentra la superficie, su inclinación y orientación, y los ángulos que caracterizan la posición del sol en cualquier momento del día bien cualquier día del año.

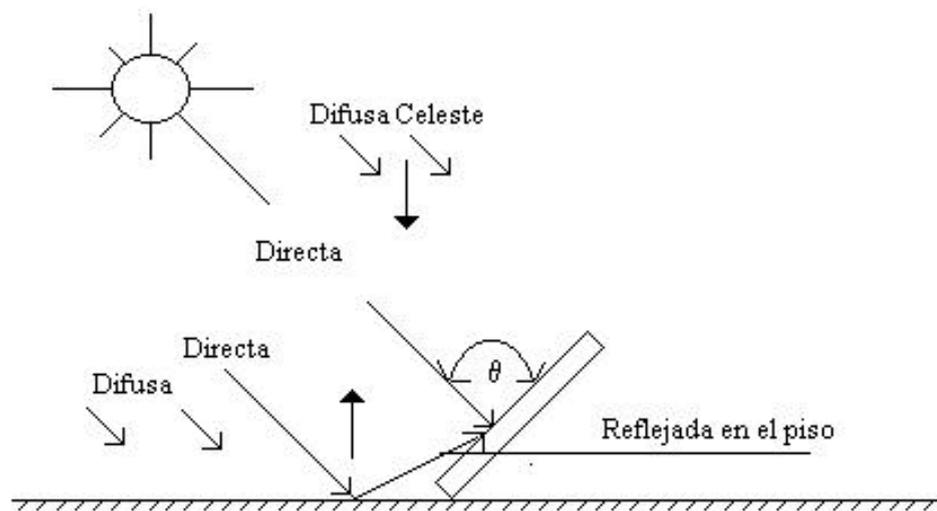


Figura C4. “Irradiación directa, difusa y reflejada sobre una superficie inclinada”

Para una superficie horizontal, la Irradiancia solar directa  $G_b$  se expresa como:

$$G_b = G_{b,I} * \text{Cos} \theta_z \quad \text{Ec. C.9}$$

en donde  $\theta_z$  es el ángulo que forma ésta con la normal de la superficie.

Puesto que para una superficie horizontal la Irradiancia global  $G$  esta dada por  $G = G_b + G_d$ , en donde  $G_d$  es la Irradiancia difusa, eliminando  $G_{b,I}$  entre la ecuación C.8 y la ecuación C.9 se tiene:

$$G_{b,T} = (G - G_d) * \frac{\text{Cos}\theta_I}{\text{Cos}\theta_Z} \quad \text{Ec. C.10}$$

o

$$G_{b,T} = (G - G_d) * R_b \quad \text{Ec. C.11}$$

en donde

$$R_b = \frac{\text{Cos}\theta_I}{\text{Cos}\theta_Z} \quad \text{Ec. C.12}$$

### **Irradiancia solar difusa y reflejada sobre una superficie inclinada**

La Irradiancia solar difusa es la radiación difusa proveniente de la parte del cielo que intercepta la superficie. En general, las diferentes partes del cielo pueden tener diferentes radiancias emitiendo diferentes intensidades de radiación. Sin embargo, supondremos un modelo de cielo isotrópico en el cual cada parte del mismo emita la misma intensidad. De acuerdo a lo anterior, una superficie plana con inclinación  $\beta$  y orientación arbitraria recibe la siguiente Irradiancia difusa  $G_{d,T}$  :

$$G_{d,T} = \frac{1}{2} * G_d * (1 + \text{Cos}\beta) \quad \text{Ec. C.13}$$

donde  $G_d$  es la Irradiancia difusa sobre una superficie horizontal.

Las superficies horizontales reflejan la radiación global  $G$  (directa + difusa) que reciben de acuerdo a un coeficiente de reflectancia propio de cada superficie, estos coeficientes se muestran en el siguiente cuadro:

MATERIAL	REFLECTANCIA
Arena húmeda	0.09
Arena seca	0.21
Asbesto, lámina envejecida	0.25

Madera	0.22
Pasto seco	0.15 – 0.25
Pavimento	0.15
Suelo arcilloso seco	0.23

Cuadro C1. “Reflectancia de algunos materiales”

En el caso de que no haya una dirección preferencial para la radiación reflejada, se habla de reflexión isotrópica. Una superficie inclinada intercepta una fracción de esta radiación reflejada de acuerdo con u inclinación:

$$G_{r,T} = \frac{1}{2} * \sigma * G_d * (1 - \text{Cos}\beta) \text{ Ec. C.14}$$

en donde  $\sigma$  es el coeficiente de reflectancia de la superficie y  $G$  es la Irradiancia solar global sobre una superficie horizontal.

### **Irradiancia solar total sobre una superficie inclinada**

La Irradiancia solar total sobre una superficie inclinada  $G_T$  está entonces dada por la suma de las tres componentes:

$$G_T = (G - G_d) * R_b + \frac{1}{2} * G_d * (1 + \text{Cos}\beta) + \frac{1}{2} * \sigma * G * (1 - \text{Cos}\beta) \text{ Ec. C.15}$$

Todo lo expuesto en el Apéndice C, se programo en una hoja de calculo con la finalidad de realizar los cálculos anteriores variando las horas del día, el mes, el día y el ángulo de inclinación de la superficie. Lo que se muestra a continuación es una corrida del programa para el día 21 de septiembre a las 9 a.m.

**“Programa para el calculo de la Irradiancia solar directa, difusa y reflejada sobre una superficie inclinada”**

$\beta$	It (b) (W/m <sup>2</sup> )	$\beta$	It (b) (W/m <sup>2</sup> )	$\beta$	It (b) (W/m <sup>2</sup> )	$\beta$	It (b) (W/m <sup>2</sup> )
35	823,4527658	10	<b>940,9574875</b>	9	733,6268454	17	<b>972,5500481</b>
21-Dic		21-Mar		21-Sep		21-Jun	
			bp	It (b) (W/m <sup>2</sup> )			
			<b>17,75</b>	<b>867,6467867</b>			

**Datos:**

$\Phi =$	10,2912
$\Theta =$	45,4463
$\Theta_i =$	45,4464
$\Theta_z =$	45,9651
$\delta =$	-0,2024
$\beta =$	<b>17,75</b>
$\alpha =$	44,0349
$\Gamma =$	<b>0</b>
$\Gamma_s =$	-79,5992
W =	-45
Isc (w/m <sup>2</sup> ) =	1367
n (1 - 365 ) =	264
Hora local (Hr) =	9
Día critico =	21-Sep
Horas Insolación =	8



W(-):para la mañana		45
W(+):para la tarde		
W = 0 al mediodía		
<b>Ws =</b>	<b>89,9630</b>	

**1.- Variación de radiación solar extraterrestre :**

Ge (W/m <sup>2</sup> ) =	1359,4646
--------------------------	-----------

**2.- Radiación solar extraterrestre diaria**

$\sigma =$	0,2750
Ho (Wh/m <sup>2</sup> ) =	10208,0878
It (Wh/m <sup>2</sup> ) =	5815,0000
kt =	0,5696
Id (Wh/m <sup>2</sup> ) =	2071,8823
Id (W/m <sup>2</sup> ) =	258,9853
ID (W/m <sup>2</sup> ) =	467,8897
ID (b) (W/m <sup>2</sup> ) =	472,2514
Id (b) (W/m <sup>2</sup> ) =	252,8209
R (b) (W/m <sup>2</sup> ) =	1,6952
It (b) (W/m <sup>2</sup> ) =	726,7675

Donde:  $I_d$  es la irradiación difusa para una superficie horizontal,  $I_D$  es la irradiación directa para una superficie horizontal,  $I_d(\beta)$  es la irradiación difusa para una superficie inclinada,  $I_D(\beta)$  es la irradiación directa para una superficie inclinada,  $R(\beta)$  es la irradiación reflejada que es interceptada por la superficie inclinada y por último  $I_t(\beta)$  es la irradiación total para una superficie inclinada.

Es importante destacar lo siguiente:

1.-  $\Gamma = 0$  debido a que la superficie inclinada va a estar orientada al sur franco.

2.- El ángulo  $\beta = 17,75$  debido a que para todas las corridas del programa realizadas éste resulto ser el valor del ángulo óptimo de inclinación para la superficie, tomando en cuenta los valores más desfavorables con respecto a los valores de irradiación solar se refiere; con la finalidad de garantizar el funcionamiento del calentador durante todo el año, la mayor cantidad de horas al día posible y bajo circunstancias desfavorables.

## GLOSARIO

**Calentamiento sensible:** es el proceso mediante el cual aumenta la temperatura de bulbo seco y la disminuye la humedad relativa; a humedad absoluta constante.

**Case hardening:** ocurre cuando el flujo de agua líquida arrastra solutos que se depositan en la superficie obstruyendo los poros y los capilares del producto evitando así la migración de agua hacia el exterior.

**Conveccion natural:** es un mecanismo de transferencia de calor en el que el fluido es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionados por variaciones de temperatura en el fluido.

**Desecador:** aparato que se utiliza para eliminar la humedad residual de un producto.

**Deshidratación:** proceso de pérdida de agua de un compuesto.

**Difusión de humedad:** proceso que propicia la homogeneización del contenido de humedad originada por una diferencia de concentraciones.

**Entalpía:** magnitud termodinámica de un cuerpo físico o material que es igual a la suma de su energía interna más el producto de su volumen por la presión.

**Fuerza de campo:** son fuerzas externas que actúan sobre el fluido, estas pueden ser campo gravitacional, fuerza centrífuga, fuerza centrípeta.

**Humedad absoluta del aire atmosférico:** es la relación de la masa de vapor entre la masa de los gases no condensables contenidos en un volumen.

**Humedad crítica del cacao:** es el contenido de humedad del producto al final de la primera etapa de secado. La humedad crítica coincide con el punto de intersección de la recta de velocidad de secado constante con la del primer tramo de velocidad de secado decreciente.

**Humedad relativa:** es la relación entre la presión parcial del vapor en el aire atmosférico y la presión del vapor saturado, a la temperatura del bulbo seco del aire.

**Humedad residual:** es aquella que porción de humedad que queda en un cuerpo.

**Irradiación:** cantidad de radiación que incide sobre la unidad de superficie.

**Isotropía:** característica de los cuerpos que tienen las mismas propiedades en todas las direcciones.

**Material Higroscópico:** es un material que en su estado natural presenta cierta humedad y es capaz de absorber y exhalar la humedad según las circunstancias del ambiente en que se encuentran.

**Número de Grashof:** proporciona una medida de la razón de las fuerzas de empuje a las fuerzas viscosas en la capa límite hidrodinámica.

**Número de Nusselt:** es el gradiente de temperatura adimensional en la superficie y proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie.

**Número de Prandtl:** proporciona una medida de la efectividad relativa del transporte del momento y energía por difusión en las capas límite hidrodinámica y térmica.

**Número de Reynolds:** es un número adimensional que relaciona las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas de un fluido.

**Psicrometría:** es el estudio de la mezcla de aire y vapor de agua.

**Radiación solar:** es una forma particular de radiación térmica con una distribución particular de longitudes de onda.

**Radiación:** fenómeno físico que implica una transmisión de energía por vía electromagnética.

**Reóstato:** instrumento que sirve para hacer variar la resistencia de un circuito eléctrico.

**Tasa de secado:** : variación de la humedad con respecto del tiempo.

**Temperatura de bulbo húmedo:** es la temperatura que indicaría un termómetro cuyo bulbo esta cubierto con una gasa empapada en agua.

**Temperatura de bulbo seco:** es la temperatura que se registra con un termómetro normal.

**Tiempo Crítico:** es el tiempo en el que se alcanzada crítica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ajit, K. M., 1997, Parameter sensitivity analysis of a directly irradiated solar dryer with integrated collector, Solar Energy Elsevier Science Ltd., Gran Bretaña.
2. Akwasi, A., 1997, Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow, Solar Energy Elsevier Science Ltd., Gran Bretaña.
3. Álvarez, C., 2 000, Caracterización físico – química de granos de cacao, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
4. Avallone, E. y Baumeister III, T., 2000, Manual del ingeniero mecánico, McGraw – Hill, México.
5. Badillo, V., Schnee, L. y Benitez de Rojas, C., 1985, Clave de las Familias de Plantas Superiores de Venezuela, Espasande s.r.l., Caracas Venezuela.
6. Belitz, H. y Gras, W., 1992, Química de los Alimentos, Acribia, Zaragoza España.
7. Berna, A. y Rosselló, A., 1988, Deshidratación de alimentos por energía solar. I Descripción de un prototipo experimental y ensayos exploratorios con zanahorias, Universitat de les Illes Balears, Mallorca España.
8. Braudedau, J., 1970, El cacao, Blumg, Barcelona.
9. Carbonell, J. V. y Madarro, F., 1987, Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente. IV Cinética de adsorción y desorción del agua en la zanahoria, Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, Valencia España.
10. Casp, A. y Abril, J., 1999, Procesos de conservación de alimentos, Mundi – prensa, Madrid España.

11. Ciappini, M. y Masciarelli, R., 1986, Cinética del secado de maíz (*Zea mays*). Ecuación empírica para el secado en lecho fluidizado, Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina.
12. Cohen, M., 1999, Apuntes de Aire Acondicionado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
13. Fuerza Aérea Comando logístico., 1984, Atlas Climatológico, Servicio meteorológico.
14. Hollman, J. P. 1998, Transferencia de calor, McGraw – Hill, Madrid.
15. Horwitz, W., 1980, Official methods of analysis (AOAC), A.O.A.C., Washington.
16. Incropera, F. y Dewitt, D., 1999, Fundamentos de transferencia de calor, PRENTICE HALL México.
17. Kreith, F. y Kreider, J. F., 1978, Principles of solar engineering, McGraw – Hill, Nueva York.
18. Lindorf, H., De parisca, L. y Rodríguez, P., 1999, Botánica, De la Biblioteca, Caracas Venezuela.
19. Manual Silvo Agropecuario, Transformación secundaria y almacenamiento, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
20. Owen, F., Química de los Alimentos, Acribia, Zaragoza España.
21. Salvador, B. D., 1997, Química de alimentos, Universidad, México.
22. Shigley, E. y Mischke, C., 2001, Diseño en ingeniería mecánica, McGraw – Hill, México.
23. Singh, R. P., 1998, Introducción a la ingeniería de alimentos, Acribia S.A., Zaragoza España.
24. Van Wylen, J., 2000, Fundamentos de termodinámica, LIMUSA WILEY, México.

**SITIOS WEB:**

25. <http://www.cacao.fundacite.arg.gov.ve/historia.html>
26. <http://www.redpav-fpolar.info.ve/entomol/v15-2/1502b0010.html>
27. <http://www.tierramerica.net/2001/1125/noticias3.shtml>

## ANEXOS

M.A.R.N. FECHA: 27/05/2003  
 D.G.A.S.  
 DIRECCION DE HIDROLOGIA Y METEOROLOGIA  
 SISTEMA NACIONAL DE INFORMACION HIDROLOGICA Y METEOROLOGICA  
 S I N A I H M E

ESTACION: CHUAO-PASAGUACA TIPO: PR SERIAL: 0408  
 ESTADO: AR LATITUD: 102912 LONGITUD: 673127 ALTITUD: 35 M.S.N.M  
 ORG.: MA INSTALADA: 12/1973 ELIMINADA: 01/1995

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1974	33,6	4,6	38,2	0,6	39,2	4,4	100,6	40,6	55,6	78,4	33,,8	5,4	435
1975	11,6	1,2	0	10	99,6	46,6	35	42,6	66,8	70,6	24	221,2	629,2
1976	3,8	36,4	4,4	7,4	39,4	80	-	42,2	18,4	53	41,6	1,6	-
1977	0	0	10,2	0	52,4	108	19,4	223	21	36	21,1	1,4	492,5
1978	3	0,2	31,6	54,4	16,2	145,2	135,6	52,6	53,8	187,2	3,5	15,2	698,5
1979	7	0	21	26	37,8	66,8	63,8	31,4	56,4	-	-	-	-
1980	23,6	31,2	0	-	40,3	53,3	103,8	80,8	92,6	45,8	26,2	-	-
1981	15,4	49,6	0	125,7	37,7	32,8	93	79	-	-	-	-	-
1982	29	3,8	-	-	54,3	21,2	23	24	74,4	29,2	16,4	39,6	-
1983	7,3	0,5	0,5	18,4	33,6	39	62,6	58,3	44,2	41,8	33,2	25,6	365,1
1984	6,9	0,5	10,8	25	45,6	53,1	85,2	66	86,8	62,6	115,5	29,8	587,8
1985	9,2	5,9	6,6	15,2	27,7	52,1	83,6	77,7	52,7	49,9	39,6	30,6	450,6
1986	8,3	2,4	6	8,9	88,1	102,5	24,1	10	42	31,8	25,2	19,5	368,8
1987	0	0	2,9	5,2	128,8	12	170	110,3	45,7	47,3	47,6	33,2	603
1988	0	3,6	4,7	0,5	5,8	9,4	120,2	100,9	117,4	111,1	40,6	31,4	545,6
1989	8	3,3	3,7	1,9	333,3	38,8	62,2	16,5	57,2	24,9	32,6	0,1	282,5
1990	18,3	19	4,8	21,3	38,7	96,1	154,4	83,9	77,9	65,1	62,6	41,5	683,6
1991	13	2	21,4	20,1	3,3	38,3	23,8	141,7	38	27,9	121,2	14	464,7
1992	0,7	5	0,2	41,9	69,1	65,7	175,9	177,6	99,4	28,7	37,4	25	726,6
1993	1,9	22,5	13,9	42	55,4	64,4	103,4	96,2	73	26,1	36,8	17,3	552,9
1994	0	0	19,9	46	3,7	46,3	-	-	-	-	-	-	-

Promedio :	9,6	9,1	10	24,8	45,2	56	86,3	77,8	61,8	56,5	42,2	32,5	511,7
------------	-----	-----	----	------	------	----	------	------	------	------	------	------	-------

Porc:	1,9	1,8	2	4,8	8,8	10,9	16,9	15,2	12,1	11	8,2	6,4
-------	-----	-----	---	-----	-----	------	------	------	------	----	-----	-----

D. STD :	9,7	14,2	11	29,6	31,1	35,3	49,8	54,1	25,8	39,6	30,5	50,4
----------	-----	------	----	------	------	------	------	------	------	------	------	------

CV :	101,5	155,1	110	119	68,7	63	57,7	69,5	41,7	70	72,4	155
------	-------	-------	-----	-----	------	----	------	------	------	----	------	-----

Anexo 1. "Datos mensuales de precipitación (mm) CHUAO-PASAGUACA"

M.A.R.N. FECHA: 27/05/2003  
 D.G.A.S.  
 DIRECCION DE HIDROLOGIA Y METEOROLOGIA  
 SISTEMA NACIONAL DE INFORMACION HIDROLOGICA Y METEOROLOGICA  
 SINAIHME

ESTACION: CHUAO-PASAGUACA TIPO: PR SERIAL: 0408  
 ESTADO: AR LATITUD: 102912 LONGITUD: 673127 ALTITUD: 35 M.S.N.M  
 ORG.: MA INSTALADA: 12/1973 ELIMINADA: 01/1995

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1977	-	-	-	-	-	-	-	-	164,7	144,3	134,2	144,8	-
1978	160	157,8	157,3	122,8	158,9	149,5	162,2	152	150,8	143	137,9	148,4	1800,6
1979	156,1	146,7	176,1	146,3	141,9	143,1	154,6	152,8	171,3	141	129,9	124,1	1783,9
1980	112,7	139,3	175,5	-	152,6	155,4	158,2	143,4	148,9	140,7	121,6	-	-

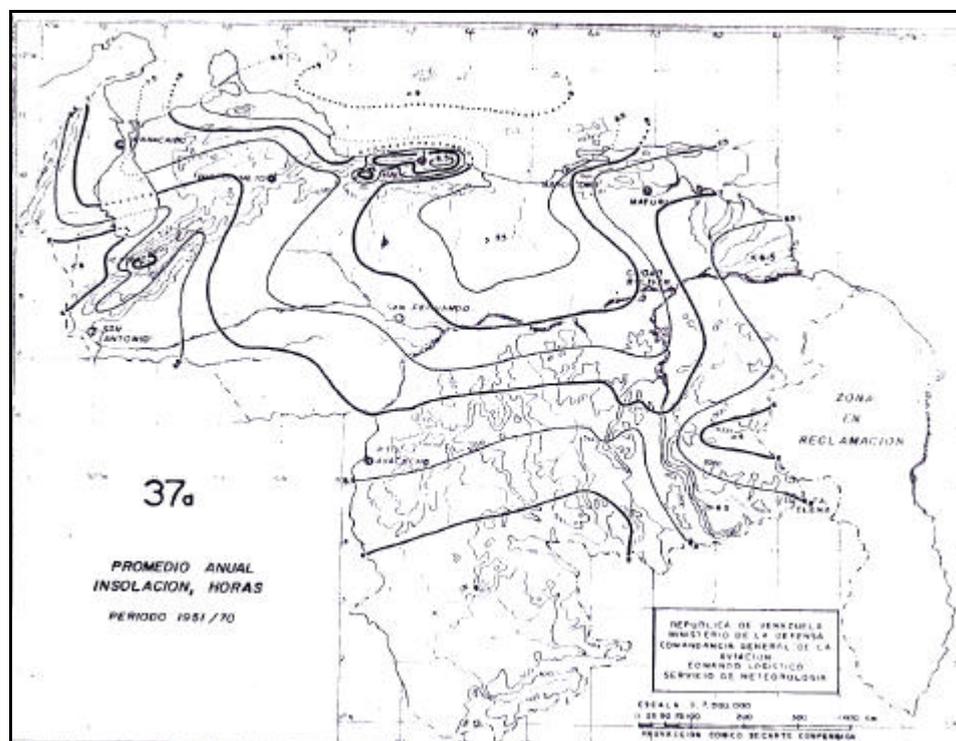
Promedio :	142,9	147,9	169,6	134,6	151,1	149,3	158,3	149,,4	158,9	142,3	130,9	139,1	1774,4
------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------

Porc:	8,1	8,3	9,6	7,6	8,5	8,4	8,9	8,4	9	8	7,4	7,8
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---	---	-----	-----

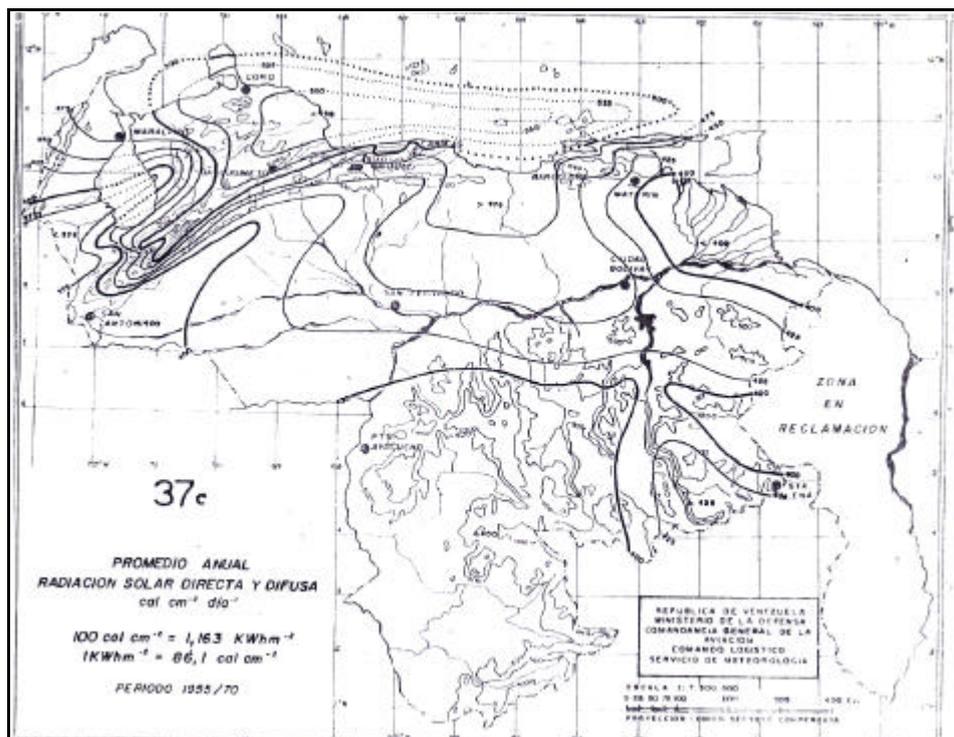
D. STD :	26,3	9,3	10,7	16,6	8,6	6,2	3,8	5,2	10,8	1,7	7	13,1
----------	------	-----	------	------	-----	-----	-----	-----	------	-----	---	------

CV :	18,4	6,3	6,3	12,4	5,7	4,1	2,4	3,5	6,8	1,2	5,4	9,4
------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

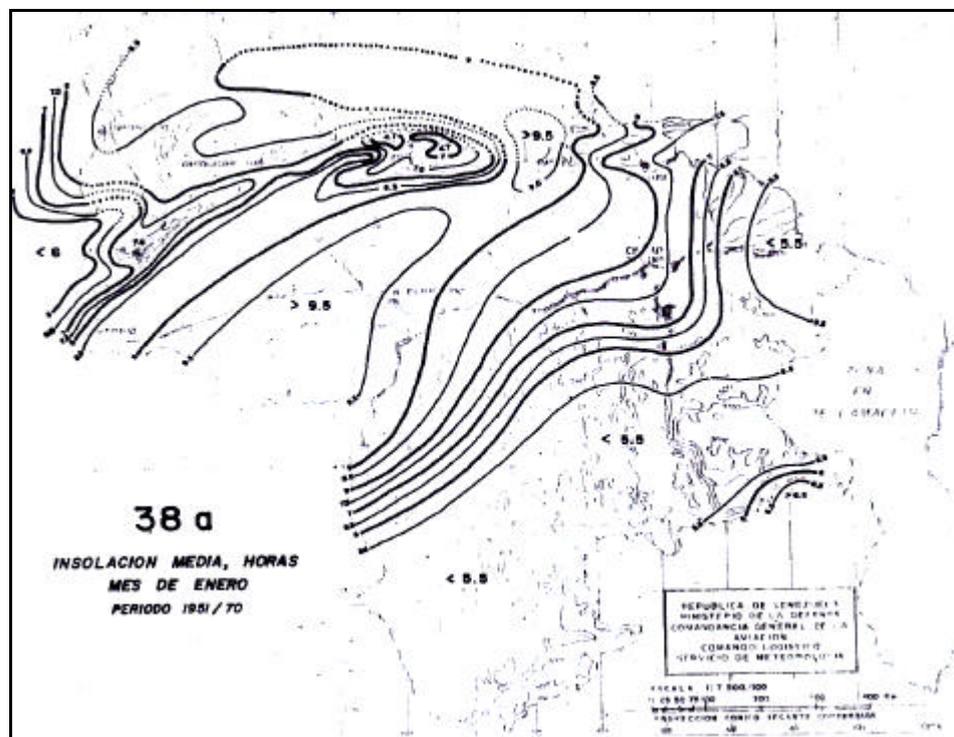
Anexo 2. "Datos mensuales de evaporación (mm) CHUAO-PASAGUACA"



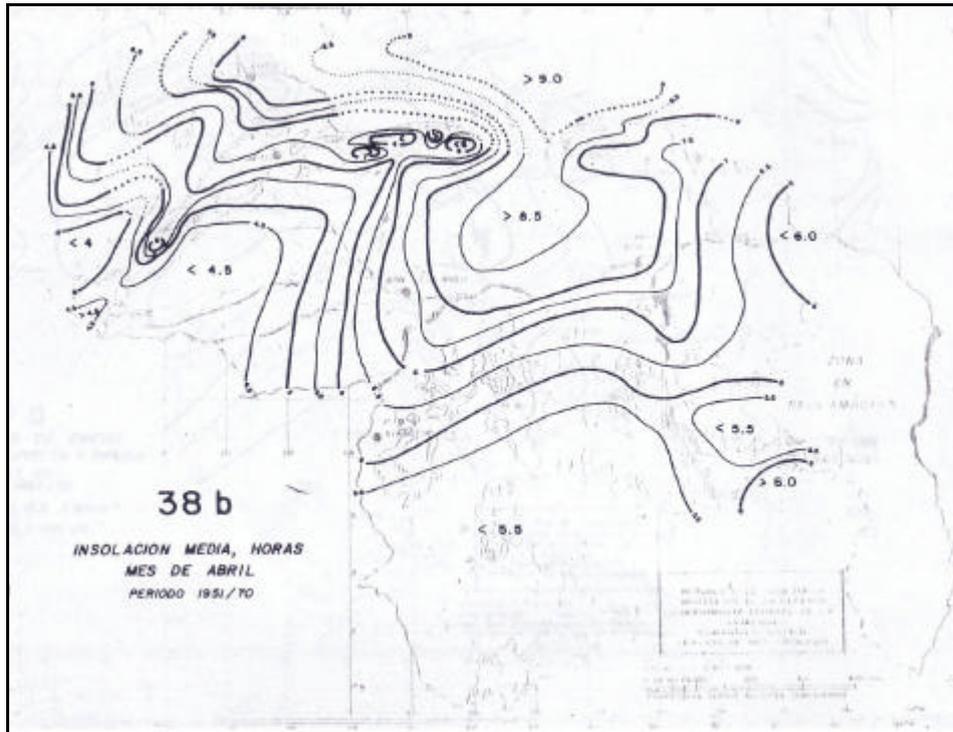
Anexo 3. "Promedio anual insolación, horas (período 1951 - 1970)"



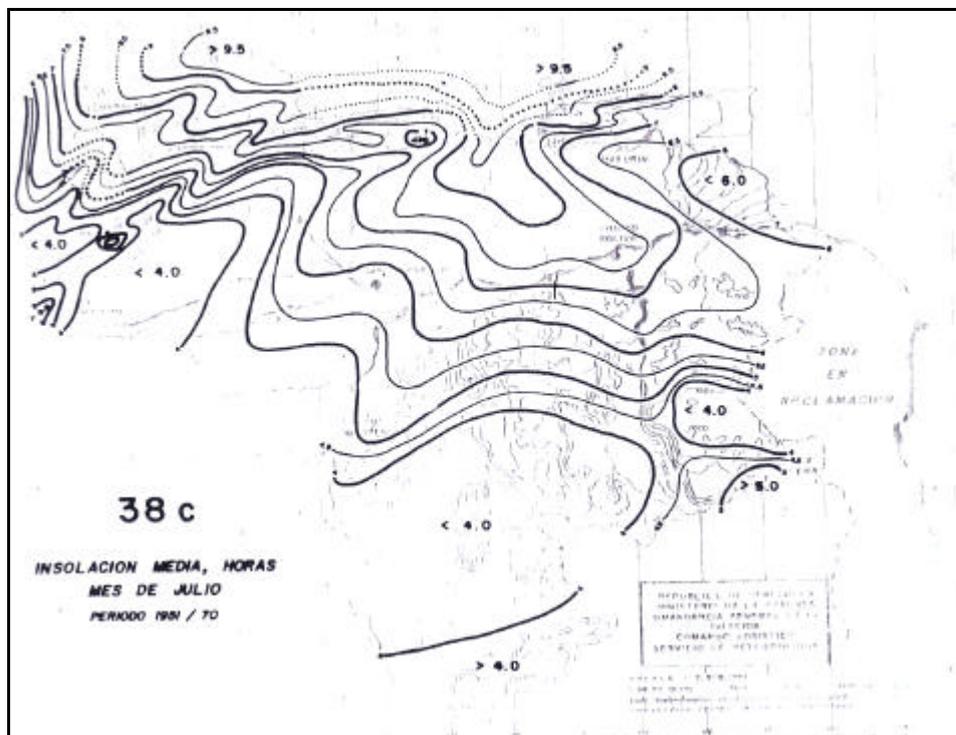
Anexo 4. "Promedio anual radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



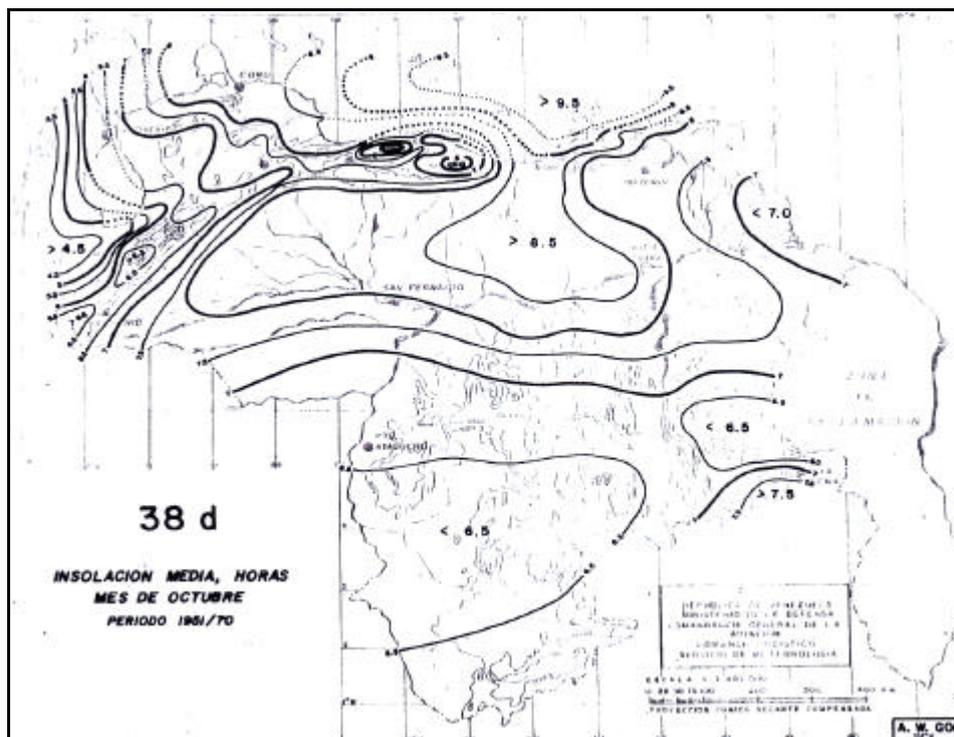
Anexo 5. "Insolación media, mes de Enero, horas (período 1951 - 1970)"



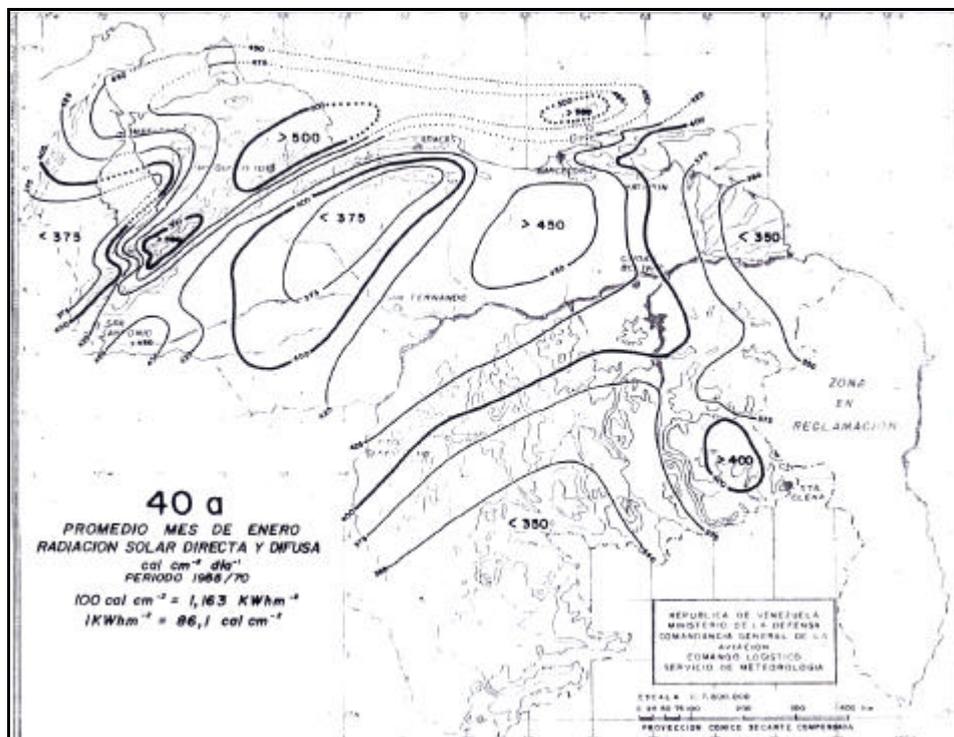
Anexo 6. "Insolación media, mes de Abril, horas (período 1951 - 1970)"



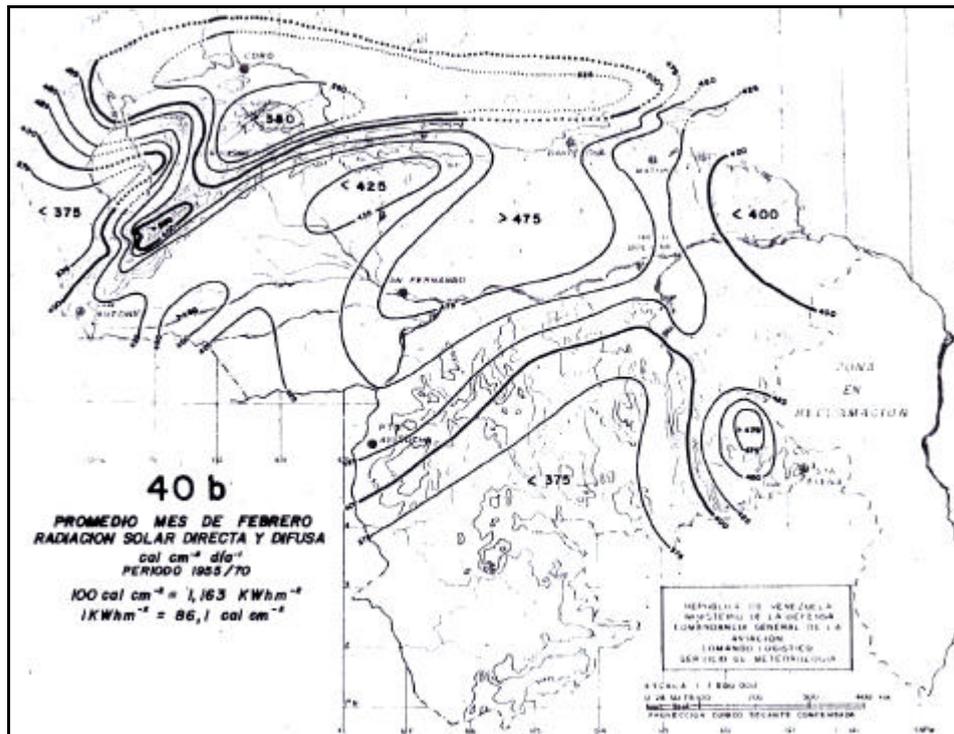
Anexo 7. "Insolación media, mes de Julio, horas (período 1951 - 1970)"



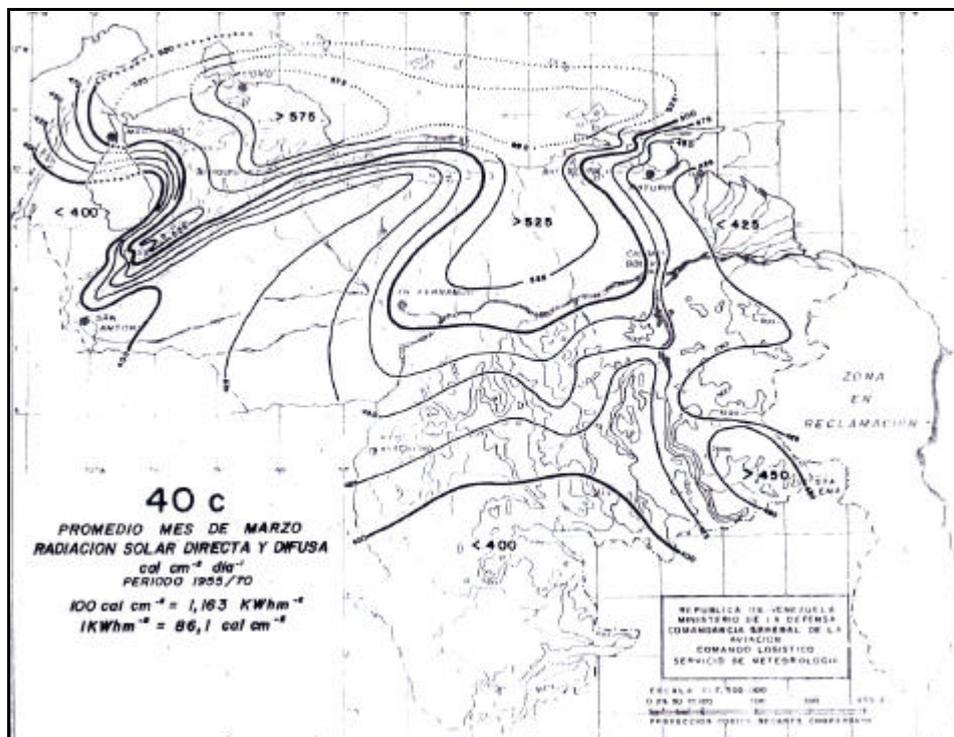
Anexo 8. "Insolación media, mes de Octubre, horas (período 1951 - 1970)"



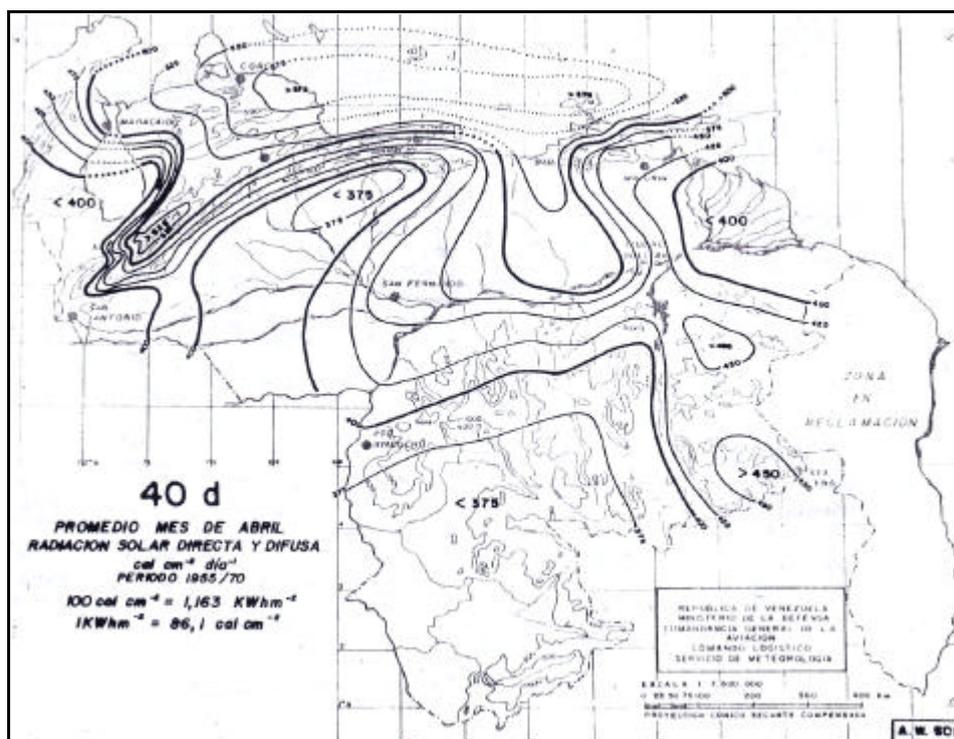
Anexo 9. "Promedio mes de Enero radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



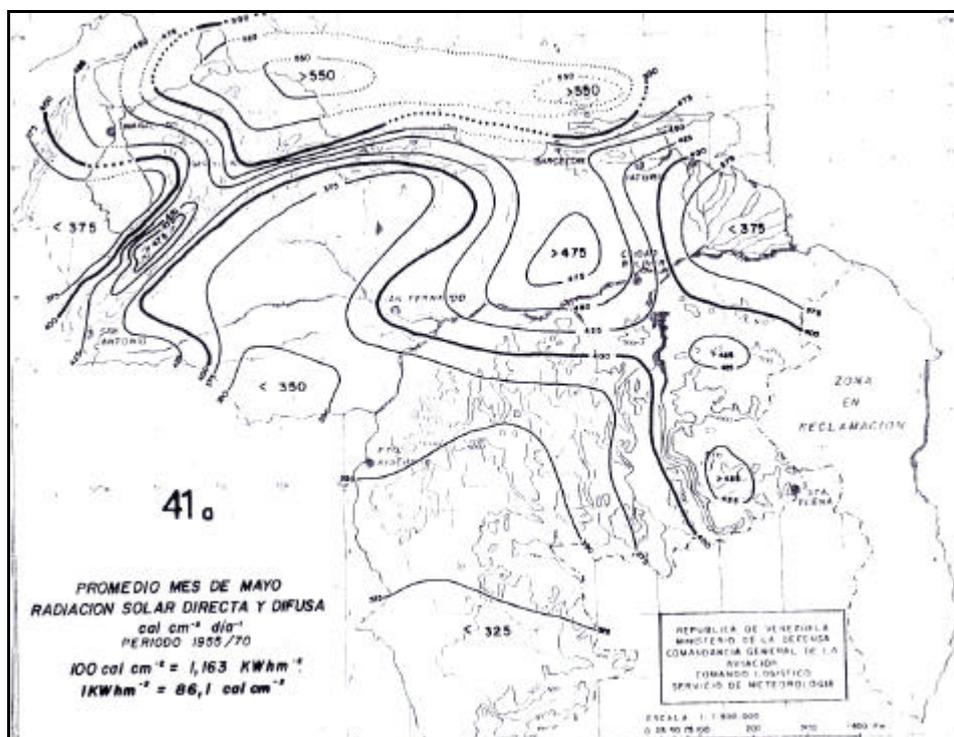
Anexo 10. “Promedio mes de Febrero radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”



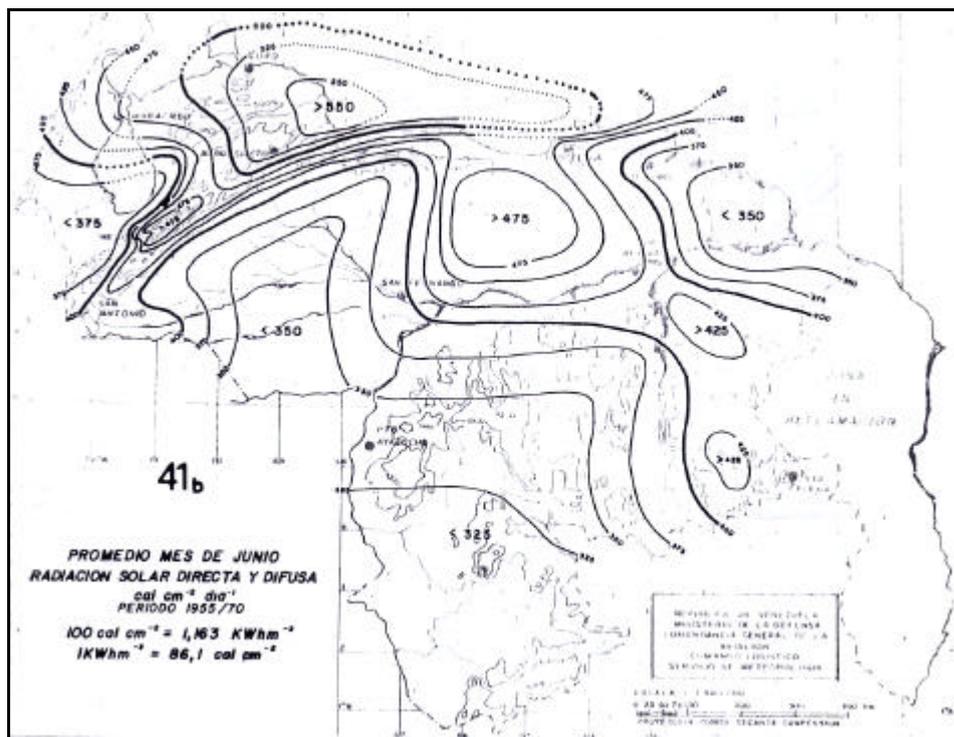
Anexo 11. “Promedio mes de Marzo radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”



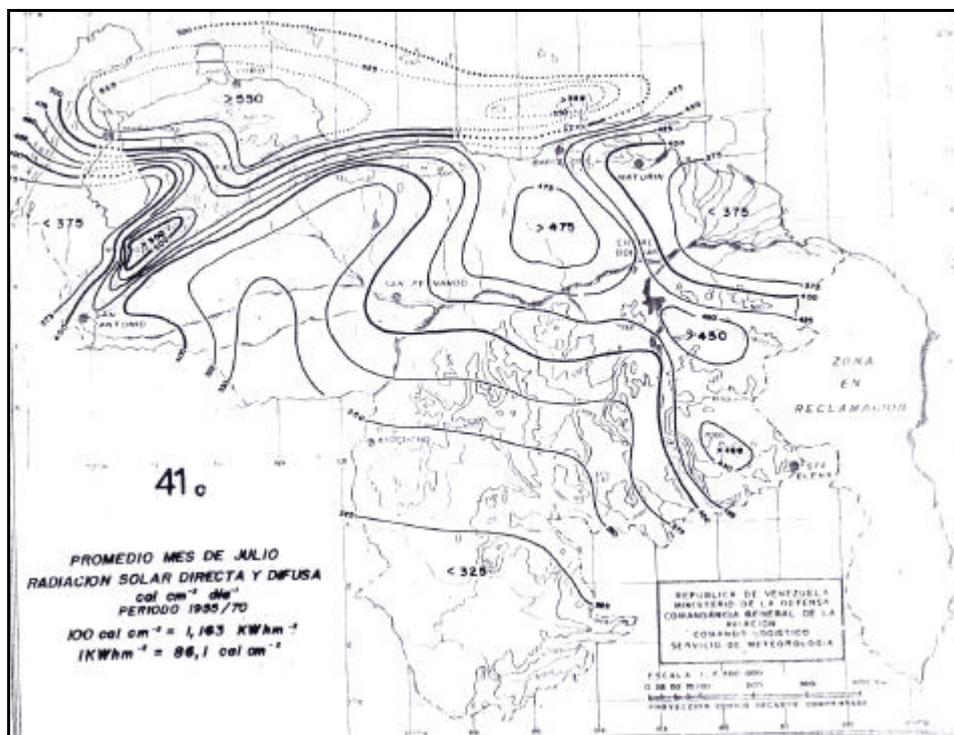
Anexo 12. "Promedio mes de Abril radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



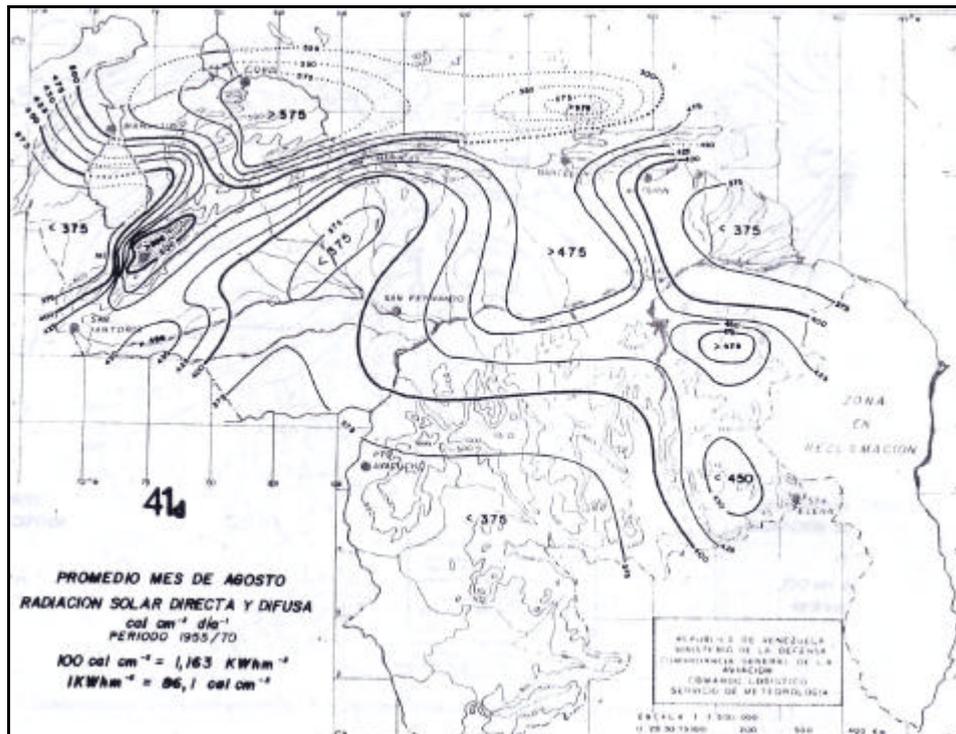
Anexo 13. "Promedio mes de Mayo radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



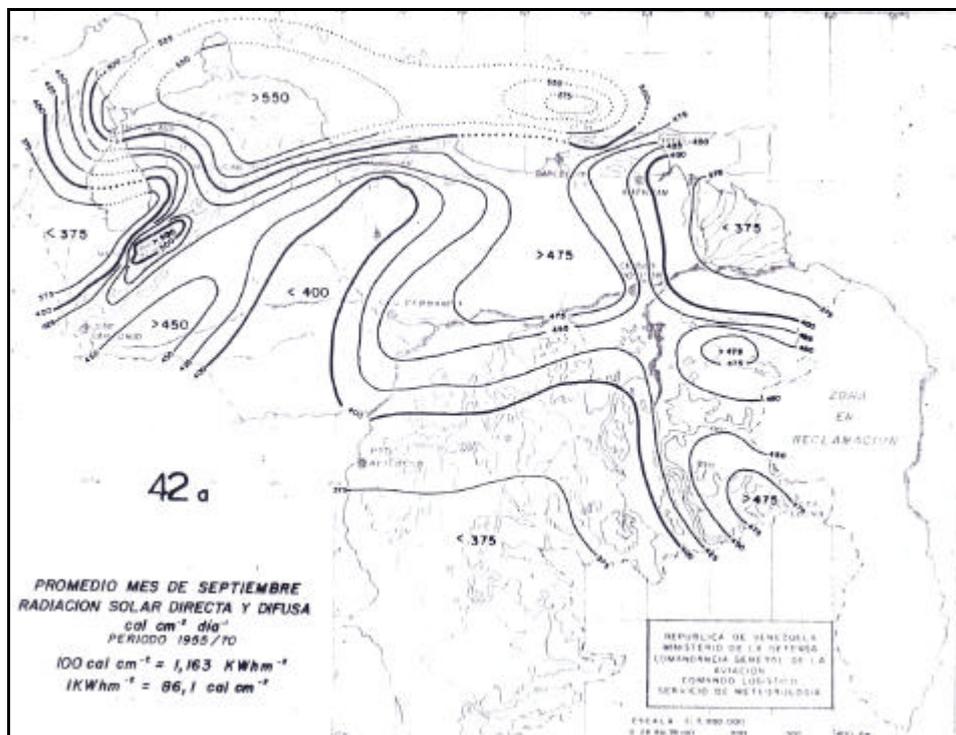
Anexo 14. "Promedio mes de Junio radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



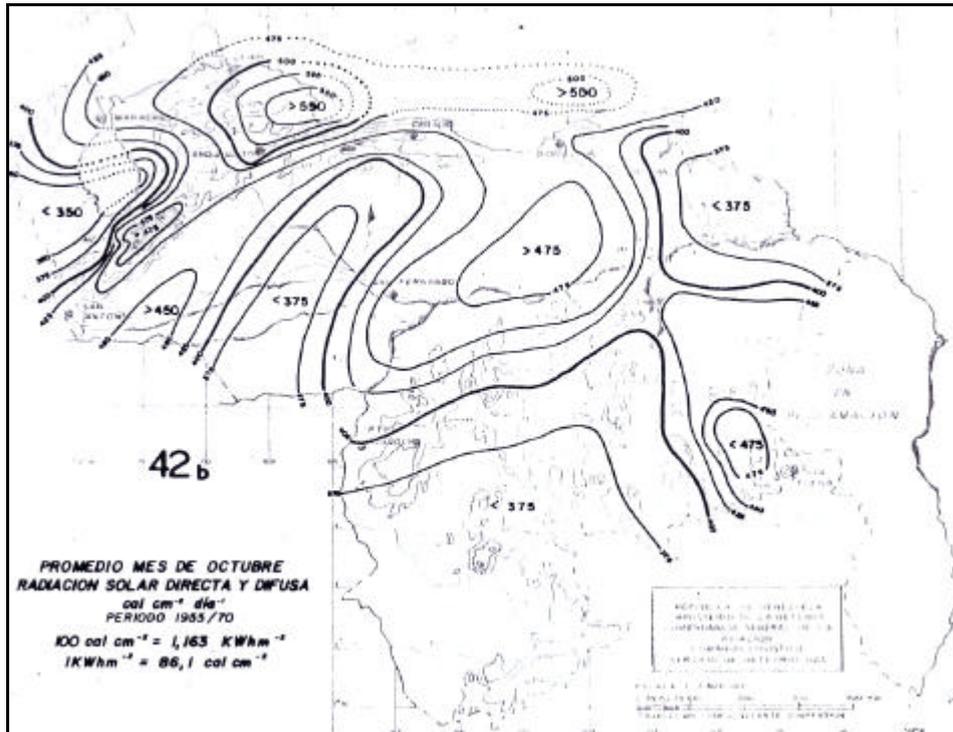
Anexo 15. "Promedio mes de Julio radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



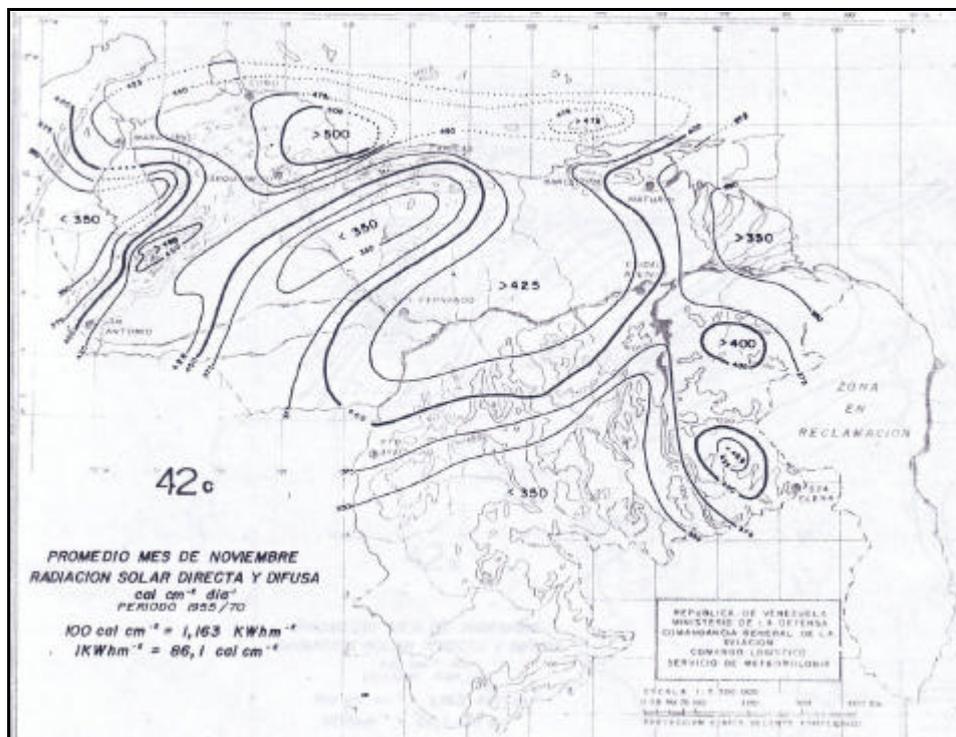
Anexo 16. “Promedio mes de Agosto radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”



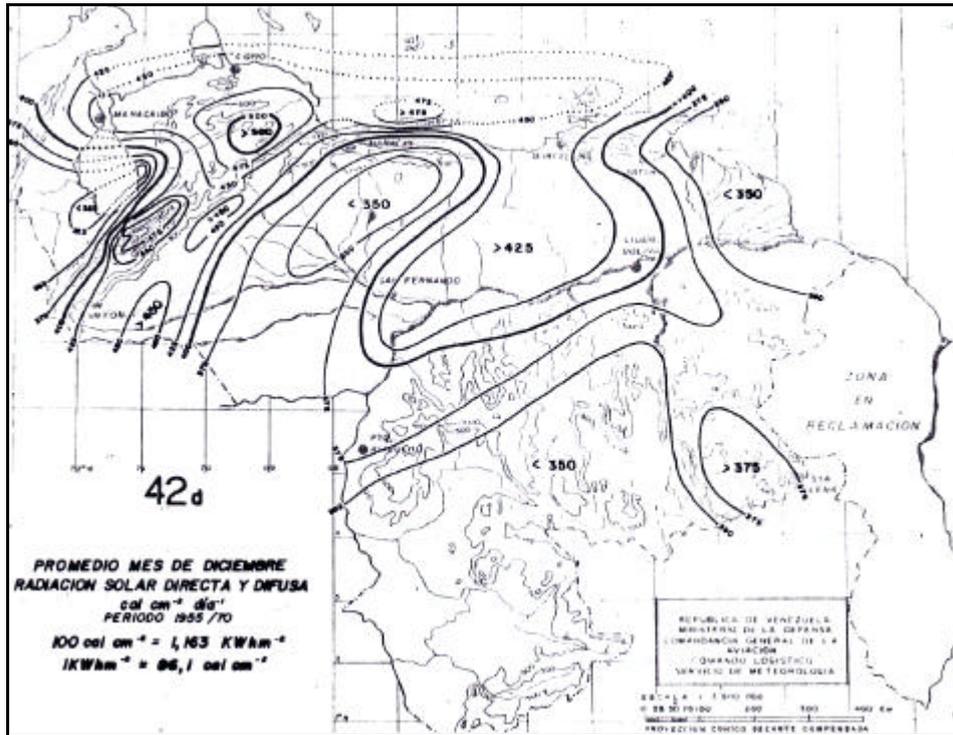
Anexo 17. “Promedio mes de Septiembre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”



Anexo 18. "Promedio mes de Octubre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



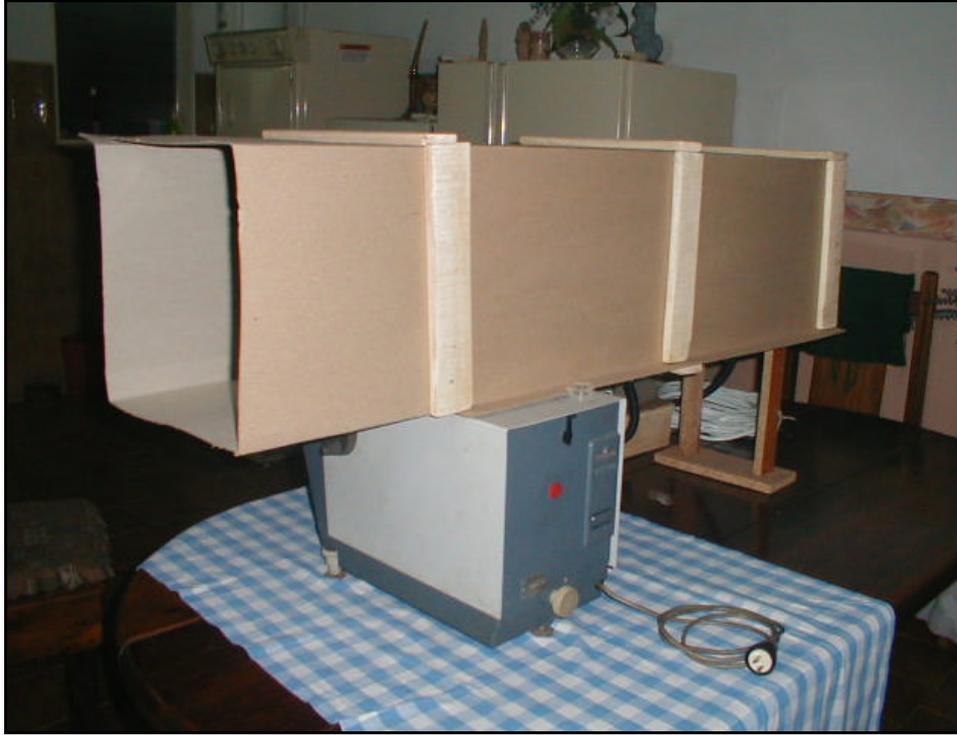
Anexo 19. "Promedio mes de Noviembre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)"



Anexo 20. “Promedio mes de Diciembre radiación solar directa y difusa (período 1955 - 1970)”



Anexo 21. “Túnel de secado (vista frontal)”



Anexo 22. "Túnel de secado (vista trasera)"



Anexo 23. "Túnel de secado, detalle interno, balanza, ventilador, tobera, resistencias"



Anexo 24. "Túnel de secado, detalle resistencias"



Anexo 25. "Túnel de secado, ventilador"



Anexo 26. “Túnel de secado, tablero de control, suiches individuales para las resistencias con sus respectivos potenciómetros y potenciómetro del ventilador”



Anexo 27. “Túnel de secado, instrumentos utilizados en la medición de las propiedades del aire (Tri-sense)”



Anexo 28. “Túnel de secado, instrumentos utilizados en la construcción y medición de variables en el túnel, pinza amperimétrica, voltímetro y cuenta revoluciones”



Anexo 29. “Túnel de secado, detalle de cesta para la colocación de las muestras”



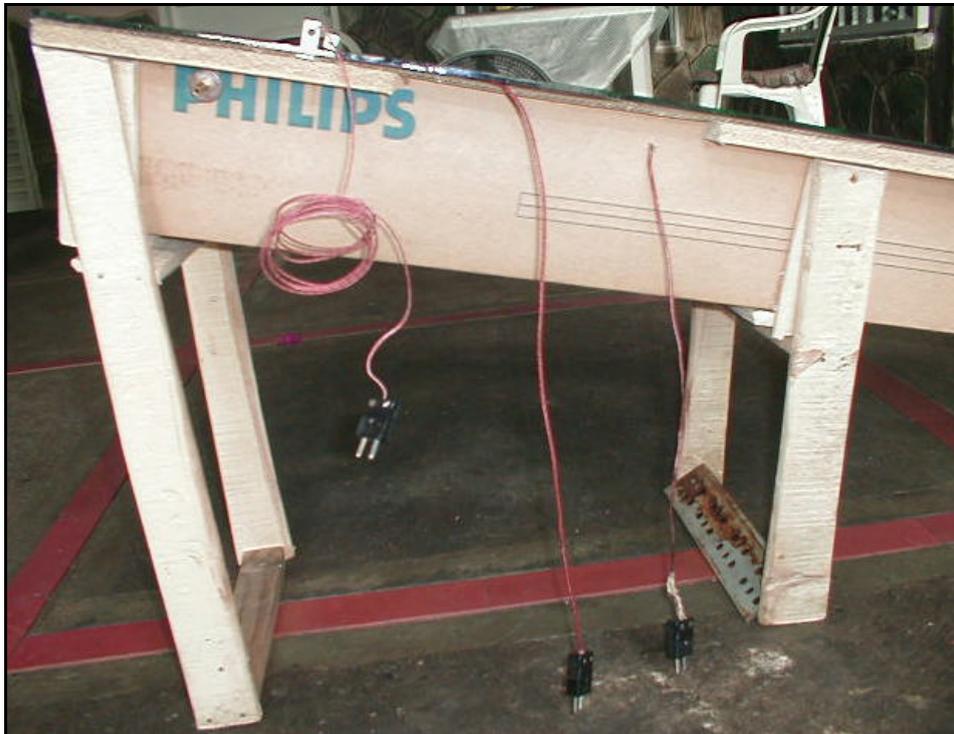
Anexo 30. "Túnel de secado en funcionamiento con muestras de cacao"



Anexo 31. "Túnel de secado, detalle de medición en prueba"



Anexo 32. “Calentador solar plano de aire (vista frontal)”



Anexo 33. “Calentador solar plano de aire, detalle de termocuplas en vista lateral”



Anexo 34. "Calentador solar plano de aire, vista de sección transversal y detalle de termocuplas"



Anexo 35. "Calentador solar plano de aire termocuplas"