



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

“Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Agroindustrial”

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Título del proyecto

DETERMINACIÓN DEL RADIO DE SECADO EN PINO Y EUCALIPTO PARA
LOGRAR LA EFICIENCIA DEL PRODUCTO FINAL EN LA PROVINCIA DE
CHIMBORAZO

Autor: Josué David Bonifaz Nieto

Director: Ing. Luis Arboleda Álvarez

Riobamba – Ecuador

2015

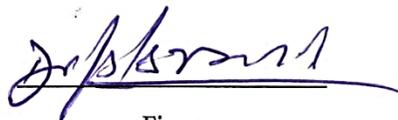
PÁGINA DE REVISIÓN

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: DETERMINACIÓN DEL RADIO DE SECADO EN PINO Y EUCALIPTO PARA LOGRAR LA EFICIENCIA DEL PRODUCTO FINAL EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO presentado por: Josue David Bonifaz Nieto y dirigida por: Ing. Luis Arboleda

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

Dr. Mario Salazar
Presidente



Firma

Ing. Luis Arboleda
Director



Firma

Dra. Anita Mejía
Miembro



Firma

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, nos corresponde exclusivamente a: Josue David Bonifaz Nieto e Ing. Luis Arboleda director del proyecto; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Josue David Bonifaz Nieto
C.I. 060358251-1

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo, a la Escuela de Ingeniería Agroindustrial.

Al Ing. Luis Arboleda, Dra. Anita Mejía y Dr. Mario Salazar por su acertada colaboración en el desarrollo de esta investigación.

A mis padres, hermanos y tíos quienes en cada etapa de mi vida me han guiado con sencillez, responsabilidad y paciencia para salir adelante.

A mi pollita María Fernanda que con amor y dulzura me ha acompañado en todo momento y ha sido un pilar esencial en mi vida.

DEDICATORIA

Primero a Dios por la salud, la vida y las innumerables bendiciones recibidas.

A mi madre Myriam por su sacrificio, lucha y amor diario por precautelar siempre darme lo mejor y ser mi fortaleza en todo. A mi padre Euclides por su amor, apoyo incondicional y enseñanzas valiosas.

A mis tíos Raúl y Grace por las enésimas veces que me extendieron su mano de apoyo.

A mis hermanos Maryela, Juan Carlos y Luis que me han motivado a conseguir mis metas con constancia, buen ejemplo y sencillez.

Josué David Bonifaz Nieto

ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
ÍNDICE DE CUADROS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
RESUMEN.....	xxi

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
 CAPÍTULO I	
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	3
1.1. Pino.....	3
1.1.1. Taxonomía del pino.....	3
1.1.2. Descripción botánica del pino.....	4
1.1.3. Requerimientos edafoclimáticos del pino.....	4
1.1.4. Condiciones climáticas óptimas del pino.....	5
1.1.5. Características y tratamiento de la semilla del pino.....	5
1.1.6. Crecimiento del pino.....	5
1.1.7. Manejo silvicultural del pino.....	5
1.1.8. Producción en viveros del pino.....	5
1.1.9. Riesgos o peligros en plantaciones de pino.....	6
1.2. Eucalipto.....	7
1.2.1. Taxonomía del eucalipto.....	7
1.2.2. Descripción botánica del eucalipto.....	7
1.2.3. Requerimientos edafoclimáticos del eucalipto.....	8
1.2.4. Condiciones climáticas óptimas del eucalipto.....	9
1.2.5. Preparación del terreno y plantación de eucalipto.....	9
1.2.6. Crecimiento del eucalipto.....	9

1.2.7.	Manejo silvicultural del eucalipto.....	10
1.2.8.	Producción en viveros del eucalipto.....	10
1.2.9.	Riesgos o peligros en plantaciones de eucalipto.....	10
1.3.	La madera.....	11
1.3.1.	Definición de la madera.....	11
1.3.2.	Clasificación de las maderas.....	11
1.3.3.	Componentes principales de la madera.....	12
1.3.4.	Estructura de la madera.....	12
1.3.4.1.	El tronco.....	12
1.3.4.2.	Corteza exterior.....	13
1.3.4.3.	Corteza interior.....	13
1.3.4.4.	Cambium.....	13
1.3.4.5.	Madera o xilema.....	13
1.3.4.6.	Albura.....	14
1.3.4.7.	Duramen.....	14
1.3.4.8.	Médula.....	14
1.3.5.	Propiedades de la madera del pino.....	14
1.3.5.1.	Propiedades organolépticas de la madera del pino.....	14
1.3.5.2.	Propiedades físicas de la madera del pino.....	15
1.3.5.3.	Propiedades mecánicas de la madera del pino.....	15
1.3.6.	Propiedades de la madera del eucalipto.....	16
1.3.6.1.	Propiedades organolépticas de la madera del eucalipto.....	16
1.3.6.2.	Propiedades físicas y mecánicas de la madera del eucalipto.....	16
1.4.	Secado de la madera.....	17
1.4.1.	Definición.....	17
1.4.2.	Propiedades básicas para el secado de la madera.....	17
1.4.2.1.	Higroscopicidad.....	17
1.4.2.2.	Anisotropía.....	17
1.5.	Importancia del secado de la madera.....	17
1.5.1.	Peso de la madera.....	17

1.5.2.	Estabilidad dimensional.....	18
1.5.3.	Resistencia mecánica.....	18
1.5.4.	Pudrición y manchas.....	18
1.5.5.	Tratamientos de preservación.....	18
1.5.6.	Adhesión.....	19
1.5.7.	Acabados.....	19
1.5.8.	Trabajabilidad.....	19
1.5.9.	Aislamiento térmico.....	19
1.5.10.	Aislamiento eléctrico.....	19
1.6.	La humedad en la madera.....	20
1.6.1.	Agua fija.....	20
1.6.2.	Agua de constitución.....	21
1.6.3.	Agua libre.....	21
1.7.	Equilibrio de la humedad en la madera.....	21
1.8.	Determinación del contenido de humedad en la madera.....	24
1.9.	Métodos de secado en la madera.....	25
1.9.1.	Secado natural.....	25
1.9.1.1.	Tiempos de secado en el sistema natural.....	26
1.9.1.2.	Ventajas y desventajas del secado natural.....	26
1.9.2.	Secado artificial.....	27
1.9.2.1.	Ventajas del secado artificial con respecto al secado natural.....	27
1.9.2.2.	Métodos de secado artificial.....	28
1.9.2.2.1.	Secado por condensación.....	28
1.9.2.2.2.	Secado por convección.....	29
1.10.	Movimiento de agua en la madera.....	30
1.10.1.	Fuerzas capilares.....	31
1.10.2.	Fuerzas debidas a diferencias en la presión de vapor.....	32
1.10.3.	Fuerzas debidas a diferencias en el contenido de humedad.....	32
1.11.	Gradiente de secado.....	33
1.11.1.	La clase de la madera.....	34

1.11.2.	El estado de secado.....	34
1.11.3.	La temperatura de secado.....	34
1.11.4.	Espesor de la madera.....	34
1.12.	Punto de saturación de las fibras.....	35
1.13.	Proceso de secado en la madera.....	35
1.13.1.	Periodo de calentamiento.....	36
1.13.2.	Periodo de secado.....	36
1.13.3.	Periodo de tratamiento posterior.....	37
1.14.	Tiempos de secado en la madera.....	37
1.14.1.	Calculo del tiempo de secado en la madera.....	40
1.15.	Bases físicas del secado de madera.....	40
1.15.1.	Temperatura.....	41
1.15.2.	Velocidad del aire.....	42
1.15.3.	Contenido de humedad de equilibrio.....	44
1.15.4.	Leyes del proceso de secado de la madera.....	44
1.16.	Modelos matemáticos para el secado de madera.....	46
1.16.1.	Modelos empíricos.....	46
1.16.1.1.	Modelado del secado-Método de la curva característica de secado.....	47
1.16.2.	Modelos difusivos.....	48
1.16.3.	Modelos fenomenológicos.....	49

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA.....	50	
2.1.	Tipo de estudio.....	50
2.2.	Población y muestra.....	51
2.3.	Operacionalización de variables.....	52
2.4.	Procedimientos.....	54
2.5.	Procesamiento y análisis.....	55
2.5.1.	Secado del pino y el eucalipto.....	55

2.5.1.1.	Caracterización del secado en industrias madereras locales.....	55
2.5.1.2.	Recepción de la madera del pino y eucalipto.....	55
2.5.1.2.1.	Selección y preparación de muestras.....	56
2.5.1.3.	Secado del pino y eucalipto.....	58
2.5.1.4.	Determinación del contenido de humedad en la madera.....	60
2.5.1.4.1.	Método gravimétrico.....	60
2.5.1.4.2.	Método termobalanza.....	61
2.5.1.4.3.	Método estufa.....	62
2.5.1.5.	Modelamiento del radio de secado del pino y eucalipto.....	63
 CAPÍTULO III		
	RESULTADOS.....	64
3.1.	Madera del pino.....	64
3.1.1.	Pesos promedio de secado del pino.....	64
3.1.2.	Determinación del porcentaje de humedad en pino.....	65
3.1.3.	Determinación de la masa relativa y el antilogaritmo de la masa relativa en pino.....	66
3.1.4.	Curvas de secado del pino.....	69
3.1.4.1.	Curva de secado de la masa relativa en función al tiempo en el pino.....	70
3.1.4.2.	Curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa en función al tiempo en el pino.....	72
3.1.5.	Determinación de las constantes A y B en pino.....	73
3.1.5.1.	Determinación de la constante A en pino.....	73
3.1.5.2.	Determinación de la constante B en pino.....	74
3.1.6.	Radio de secado en pino.....	76
3.1.7.	Análisis de varianza del pino.....	77
3.2.	Madera de eucalipto.....	78
3.2.1.	Peso promedio de secado del eucalipto.....	78

3.2.2.	Determinación del porcentaje de humedad en eucalipto.....	80
3.2.3.	Determinación de la masa relativa y el antilogaritmo de la masa relativa en eucalipto.....	82
3.2.4.	Curvas de secado del eucalipto.....	84
3.2.4.1.	Curva de secado de la masa relativa en función al tiempo en el eucalipto.....	84
3.2.4.2.	Curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa en función al tiempo en el eucalipto.....	86
3.2.5.	Determinación de las constantes A y B en eucalipto.....	87
3.2.5.1.	Determinación de la constante A en eucalipto.....	87
3.2.5.2.	Determinación de la constante B en eucalipto.....	88
3.2.6.	Radio de secado en eucalipto.....	90
3.2.7.	Análisis de varianza del eucalipto.....	91
 CAPÍTULO IV		
	DISCUSIÓN.....	93
 CAPÍTULO V		
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
5.1.	Conclusiones.....	94
5.2.	Recomendaciones.....	95
 CAPÍTULO VI		
	PROPUESTA.....	96
6.1.	Título de la propuesta	96
6.2.	Introducción.....	96
6.3.	Objetivos.....	97
6.3.1.	General.....	97
6.3.2.	Específicos.....	97
6.4.	Fundamentación científico –técnica.....	97

6.4.1.	Radio de secado basado en el modelo de la curva característica...	97
6.4.1.1.	Definición del radio de secado.....	98
6.4.1.2.	Materiales y equipo requerido.....	98
6.4.1.3.	Muestreo.....	98
6.4.1.4.	Factores y niveles de los experimentos de secado.....	99
6.4.1.5.	Contenido de humedad en la madera.....	99
6.5.	Descripción de la propuesta.....	100
6.6.	Diseño organizacional.....	101
6.7.	Monitoreo y evaluación de la propuesta.....	102

CAPÍTULO VI		
BIBLIOGRAFÍA.....		103

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1	Experimentos de secado del pino (por repetición).....	107
Anexo N° 2	Experimentos de secado del eucalipto (por repetición).....	125
Anexo N° 3	Determinación de humedad inicial en pino y eucalipto.....	144
Anexo N° 4	Programa de secado europeo CTBA.....	146

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 1	Propiedades físicas de la madera del pino.....	15
Cuadro N° 2	Propiedades mecánicas de la madera del pino.....	15
Cuadro N° 3	Propiedades físicas y mecánicas de la madera del eucalipto.....	16
Cuadro N° 4	Equilibrio higroscópico de la madera.....	22
Cuadro N° 5	Absorción de agua en la madera.....	23
Cuadro N° 6	Tiempos de secado en maderas.....	39

Cuadro N° 7	Operacionalización de las variables.....	53
Cuadro N° 8	Pesos promedio de pino a 60° C.....	65
Cuadro N° 9	Pesos promedio de pino a 70° C.....	66
Cuadro N° 10	Pesos promedio de pino a 80° C.....	66
Cuadro N° 11	Humedad del pino a 60° C.....	67
Cuadro N° 12	Humedad del pino a 70° C.....	67
Cuadro N° 13	Humedad del pino a 80° C.....	68
Cuadro N° 14	Determinación de m_r y $\ln m_r$ del pino a 60° C.....	69
Cuadro N° 15	Determinación de m_r y $\ln m_r$ del pino a 70° C.....	69
Cuadro N° 16	Determinación de m_r y $\ln m_r$ del pino a 80° C.....	70
Cuadro N° 17	Radio de secado en pino a 60° C.....	76
Cuadro N° 18	Radio de secado en pino a 70° C.....	76
Cuadro N° 19	Radio de secado en pino a 80° C.....	76
Cuadro N° 20	Análisis de varianza del pino a 60° C.....	77
Cuadro N° 21	Análisis de varianza del pino a 70° C.....	78
Cuadro N° 22	Análisis de varianza del pino a 80° C.....	78
Cuadro N° 23	Pesos promedio de eucalipto a 60° C.....	79
Cuadro N° 24	Pesos promedio de eucalipto a 70° C.....	79
Cuadro N° 25	Pesos promedio de eucalipto a 80° C.....	79
Cuadro N° 26	Humedad del eucalipto a 60° C.....	80
Cuadro N° 27	Humedad del eucalipto a 70° C.....	81
Cuadro N° 28	Humedad del eucalipto a 80° C.....	81
Cuadro N° 29	Determinación de m_r y $\ln m_r$ del eucalipto a 60° C.....	83
Cuadro N° 30	Determinación de m_r y $\ln m_r$ del eucalipto a 70° C.....	83
Cuadro N° 31	Determinación de m_r y $\ln m_r$ del eucalipto a 80° C.....	83
Cuadro N° 32	Radio de secado en eucalipto a 60° C.....	90
Cuadro N° 33	Radio de secado en eucalipto a 70° C.....	90
Cuadro N° 34	Radio de secado en eucalipto a 80° C.....	90
Cuadro N° 35	Análisis de varianza del eucalipto a 60° C.....	91
Cuadro N° 36	Análisis de varianza del eucalipto a 70° C.....	92

Cuadro N° 37	Análisis de varianza del eucalipto a 80° C.....	92
Cuadro N° 38	Monitoreo y evaluación de la propuesta.....	102
Cuadro N° 39	Pino a 60° C Repetición # 1.....	107
Cuadro N° 40	Pino a 60° C Repetición # 2.....	107
Cuadro N° 41	Pino a 60° C Repetición # 3.....	107
Cuadro N° 42	Pino a 60° C Repetición # 4.....	107
Cuadro N° 43	Pino a 60° C mr Repetición # 1.....	108
Cuadro N° 44	Pino a 60° C ln mr Repetición # 1.....	108
Cuadro N° 45	Pino a 60° C mr Repetición # 2.....	109
Cuadro N° 46	Pino a 60° C ln mr Repetición # 2.....	110
Cuadro N° 47	Pino a 60° C mr Repetición # 3.....	110
Cuadro N° 48	Pino a 60° C ln mr Repetición # 3.....	111
Cuadro N° 49	Pino a 60° C mr Repetición # 4.....	112
Cuadro N° 50	Pino a 60° C ln mr Repetición # 4.....	112
Cuadro N° 51	Pino a 70° C Repetición # 1.....	113
Cuadro N° 52	Pino a 70° C Repetición # 2.....	113
Cuadro N° 53	Pino a 70° C Repetición # 3.....	113
Cuadro N° 54	Pino a 70° C Repetición # 4.....	114
Cuadro N° 55	Pino a 70° C mr Repetición # 1.....	114
Cuadro N° 56	Pino a 70° C ln mr Repetición # 1.....	114
Cuadro N° 57	Pino a 70° C mr Repetición # 2.....	115
Cuadro N° 58	Pino a 70° C ln mr Repetición # 2.....	116
Cuadro N° 59	Pino a 70° C mr Repetición # 3.....	116
Cuadro N° 60	Pino a 70° C ln mr Repetición # 3.....	117
Cuadro N° 61	Pino a 70° C mr Repetición # 4.....	117
Cuadro N° 62	Pino a 70° C ln mr Repetición # 4.....	118
Cuadro N° 63	Pino a 80° C Repetición # 1.....	119
Cuadro N° 64	Pino a 80° C Repetición # 2.....	119

Cuadro N° 65	Pino a 80° C Repetición # 3.....	119
Cuadro N° 66	Pino a 80° C Repetición # 4.....	119
Cuadro N° 67	Pino a 80° C mr Repetición # 1.....	120
Cuadro N° 68	Pino a 80° C In mr Repetición # 1.....	120
Cuadro N° 69	Pino a 80° C mr Repetición # 2.....	121
Cuadro N° 70	Pino a 80° C In mr Repetición # 2.....	122
Cuadro N° 71	Pino a 80° C mr Repetición # 3.....	122
Cuadro N° 72	Pino a 80° C In mr Repetición # 3.....	123
Cuadro N° 73	Pino a 80° C mr Repetición # 4.....	124
Cuadro N° 74	Pino a 80° C In mr Repetición # 4.....	124
Cuadro N° 75	Eucalipto a 60° C Repetición # 1.....	125
Cuadro N° 76	Eucalipto a 60° C Repetición # 2.....	125
Cuadro N° 77	Eucalipto a 60° C Repetición # 3.....	126
Cuadro N° 78	Eucalipto a 60° C Repetición # 4.....	126
Cuadro N° 79	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 1.....	126
Cuadro N° 80	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 1.....	127
Cuadro N° 81	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 2.....	127
Cuadro N° 82	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 2.....	128
Cuadro N° 83	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 3.....	129
Cuadro N° 84	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 3.....	129
Cuadro N° 85	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 4.....	130
Cuadro N° 86	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 4.....	131
Cuadro N° 87	Eucalipto a 70° C Repetición # 1.....	131
Cuadro N° 88	Eucalipto a 70° C Repetición # 2.....	132
Cuadro N°89	Eucalipto a 70° C Repetición # 3.....	132
Cuadro N° 90	Eucalipto a 70° C Repetición # 4.....	132
Cuadro N° 91	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 1.....	132
Cuadro N° 92	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 1.....	133

Cuadro N° 93	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 2.....	134
Cuadro N° 94	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 2.....	134
Cuadro N° 95	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 3.....	135
Cuadro N° 96	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 3.....	136
Cuadro N° 97	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 4.....	136
Cuadro N° 98	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 4.....	137
Cuadro N° 99	Eucalipto a 80° C Repetición # 1.....	138
Cuadro N° 100	Eucalipto a 80° C Repetición # 2.....	138
Cuadro N° 101	Eucalipto a 80° C Repetición # 3.....	138
Cuadro N° 102	Eucalipto a 80° C Repetición # 4.....	138
Cuadro N° 103	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 1.....	139
Cuadro N° 104	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 1.....	139
Cuadro N° 105	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 2.....	140
Cuadro N° 106	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 2.....	141
Cuadro N° 107	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 3.....	141
Cuadro N° 108	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 3.....	142
Cuadro N° 109	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 4.....	143
Cuadro N° 110	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 4.....	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1	Pino.....	3
Figura N° 2	Producción en viveros.....	6
Figura N° 3	Plantación de pino.....	6
Figura N° 4	Eucalipto.....	7
Figura N° 5	Requerimientos edáficos del eucalipto.....	8
Figura N° 6	Plantación de eucalipto.....	11

Figura N° 7	Estructura de la madera.....	12
Figura N° 8	Principio de funcionamiento del método de secado por condensación.....	28
Figura N° 9	Principio de funcionamiento del método de secado por convección.....	29
Figura N° 10	Acción de la temperatura en el secado de madera.....	42
Figura N° 11	Curva teórica del secado de madera.....	45
Figura N° 12	Procedimientos del radio de secado de pino y eucalipto.....	54
Figura N° 13	Adquisición de materia prima.....	56
Figura N° 14	Selección de madera de pino y eucalipto.....	56
Figura N° 15	Descortezado y serrado principal.....	57
Figura N° 16	Canteado y retestado.....	57
Figura N° 17	Clasificado.....	57
Figura N° 18	Medición y cortado de muestras.....	58
Figura N° 19	Disposición de las muestras de pino y eucalipto.....	58
Figura N° 20	Secador eléctrico de bandejas.....	59
Figura N° 21	Secado de pino.....	59
Figura N° 22	Secado de eucalipto.....	60
Figura N° 23	Pesaje de muestras de pino y eucalipto.....	60
Figura N° 24	Muestras de pino y eucalipto en desecador.....	61
Figura N° 25	Termobalanza.....	61
Figura N° 26	Pesaje de muestras en termobalanza.....	62
Figura N° 27	Pesado de muestras en crisol.....	62
Figura N° 28	Secado de crisol en estufa.....	63
Figura N° 29	Humedad del pino a 60° C.....	67
Figura N° 30	Humedad del pino a 70° C.....	68
Figura N° 31	Humedad del pino a 80° C.....	68
Figura N° 32	MR en función al tiempo del pino a 60° C.....	71
Figura N° 33	MR en función al tiempo del pino a 70° C.....	71

Figura N° 34	MR en función al tiempo del pino a 80° C.....	71
Figura N° 35	LN MR en función al tiempo del pino a 60° C.....	72
Figura N° 36	LN MR en función al tiempo del pino a 70° C.....	72
Figura N° 37	LN MR en función al tiempo del pino a 80° C.....	73
Figura N° 38	Determinación de A en pino.....	74
Figura N° 39	Determinación de B en pino.....	75
Figura N° 40	Humedad del eucalipto a 60° C.....	80
Figura N° 41	Humedad del eucalipto a 70° C.....	81
Figura N° 42	Humedad del eucalipto a 80° C.....	82
Figura N° 43	MR en función al tiempo del eucalipto a 60° C.....	84
Figura N° 44	MR en función al tiempo del eucalipto a 70° C.....	85
Figura N° 45	MR en función al tiempo del eucalipto a 80° C.....	85
Figura N° 46	LN MR en función al tiempo del eucalipto a 60° C....	86
Figura N° 47	LN MR en función al tiempo del eucalipto a 70° C....	86
Figura N° 48	LN MR en función al tiempo del eucalipto a 80° C....	87
Figura N° 49	Determinación de A en eucalipto.....	88
Figura N° 50	Determinación de B en eucalipto.....	89
Figura N° 51	Diseño organizacional de la propuesta.....	101
Figura N° 52	Pino a 60° C mr Repetición # 1.....	108
Figura N° 53	Pino a 60° C ln mr Repetición # 1.....	109
Figura N° 54	Pino a 60° C mr Repetición # 2.....	109
Figura N° 55	Pino a 60° C ln mr Repetición # 2.....	110
Figura N° 56	Pino a 60° C mr Repetición # 3.....	111
Figura N° 57	Pino a 60° C ln mr Repetición # 3.....	111
Figura N° 58	Pino a 60° C mr Repetición # 4.....	112
Figura N° 59	Pino a 60° C ln mr Repetición # 4.....	113
Figura N° 60	Pino a 70° C mr Repetición # 1.....	114
Figura N° 61	Pino a 70° C ln mr Repetición # 1.....	115
Figura N° 62	Pino a 70° C mr Repetición # 2.....	115

Figura N° 63	Pino a 70° C In mr Repetición # 2.....	116
Figura N° 64	Pino a 70° C mr Repetición # 3.....	116
Figura N° 65	Pino a 70° C In mr Repetición # 3.....	117
Figura N° 66	Pino a 70° C mr Repetición # 4.....	118
Figura N° 67	Pino a 70° C In mr Repetición # 4.....	118
Figura N° 68	Pino a 80° C mr Repetición # 1.....	120
Figura N° 69	Pino a 80° C In mr Repetición # 1.....	121
Figura N° 70	Pino a 80° C mr Repetición # 2.....	121
Figura N° 71	Pino a 80° C In mr Repetición # 2.....	122
Figura N° 72	Pino a 80° C mr Repetición # 3.....	123
Figura N° 73	Pino a 80° C In mr Repetición # 3.....	123
Figura N° 74	Pino a 80° C mr Repetición # 4.....	124
Figura N° 75	Pino a 80° C In mr Repetición # 4.....	125
Figura N° 76	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 1.....	126
Figura N° 77	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 1.....	127
Figura N° 78	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 2.....	128
Figura N° 79	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 2.....	128
Figura N° 80	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 3.....	129
Figura N° 81	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 3.....	130
Figura N° 82	Eucalipto a 60° C mr Repetición # 4.....	130
Figura N° 83	Eucalipto a 60° C In mr Repetición # 4.....	131
Figura N° 84	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 1.....	133
Figura N° 85	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 1.....	133
Figura N° 86	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 2.....	134
Figura N° 87	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 2.....	135
Figura N° 88	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 3.....	135
Figura N° 89	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 3.....	136
Figura N° 90	Eucalipto a 70° C mr Repetición # 4.....	137

Figura N° 91	Eucalipto a 70° C In mr Repetición # 4.....	137
Figura N° 92	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 1.....	139
Figura N° 93	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 1.....	140
Figura N° 94	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 2.....	140
Figura N° 95	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 2.....	141
Figura N° 96	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 3.....	142
Figura N° 97	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 3.....	142
Figura N° 98	Eucalipto a 80° C mr Repetición # 4.....	143
Figura N° 99	Eucalipto a 80° C In mr Repetición # 4.....	144
Figura N° 100	Determinación de humedad inicial en pino.....	145
Figura N° 101	Determinación de humedad inicial en eucalipto.....	145
Figura N° 102	Secado de muestras en termobalanza.....	145

RESUMEN

El objetivo del trabajo de investigación fue la determinación de constantes del radio de secado en maderas de pino y eucalipto, con esto se satisface la inexistencia de este modelo el cual describe el óptimo tiempo de secado al que deben someterse estas maderas.

Se efectuaron secados experimentales de las maderas en un secador eléctrico tipo túnel de bandejas a temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C, manteniendo la velocidad y el flujo de aire caliente de circulación en 2m/s. Los experimentos de secado en pino tuvieron una duración de 19 horas para la temperatura de 60 °C, 18 horas para 70 °C y 16 horas para 80 °C, en eucalipto la duración fue de 21 horas para la temperatura de 60 °C, 19 horas para 70 °C y 17 horas para 80 °C; cada uno de los experimentos realizados con 4 réplicas.

A partir de los datos experimentales se obtuvo un modelo basado en el método de la curva característica de secado (CCS), teniendo en cuenta la dinámica del contenido de humedad en la madera respecto al tiempo, obteniendo valores en eucalipto $A=-0,0001x^2+0,0184x-0,6956$ y $B=-0,0006x-0,0229$; para el caso del pino $A=-0,0002x^2+0,0248x-0,851$ y $B=-0,0014x+0,0189$ en todas las ecuaciones x representa la temperatura de secado. Estas ecuaciones resueltas numéricamente obtuvieron valores de los cuales se formuló el radio de secado con ecuación $RS=\ln (mr)-A/B$; siendo mr la masa relativa de las maderas secas que llega a un rango del 12% al 18%.

Para la validar los datos experimentales se aplicó un análisis estadístico de varianza, el cual determinó que los datos del secado en pino y eucalipto son significativos, ya que su probabilidad estadística superó el 0,05 con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO DE IDIOMAS

Lic. Geovanny Armas

16 de Marzo del 2015

SUMMARY

The aim of the research work was the determination of drying radius constants for pine and eucalyptus wood, this satisfies the absence of this model which describes the optimum drying time for these woods.

The experimental drying of wood was carried out, it was developed in a tunnel type electric drier with trays at temperatures of 60°C, 70°C and 80°C, maintaining the speed and flow of hot air circulating in 2m/s. The experiments for drying pine lasted 19 hours at 60°C, 18 hours at 70°C and 16 hours at 80°C, in eucalyptus the duration was 21 hours at 60°C, 19 hours at 70°C and 17 hours 80°C; each of the experiments with 4 repetitions. From the experimental data, a model based on the drying characteristic curve was gotten bearing in mind the dynamics of the moisture content in the wood over time, obtaining values for eucalyptus $A=-0,0001x^2+0,0184x-0,6956$ and $B=-0,0006x-0,0229$; and for pine $A=-0,0002x^2+0,0248x-0,851$ and $B=-0,0014x+0,0189$. In all equations x represents the drying temperature. These equations solved numerically obtained values from which the drying radius was formulated with this equation $RS=\ln(mr)-A/B$; mr corresponds to the relative mass of dry wood that reaches a range of 12% to 18%.

In order to validate the experimental data, a statistical analysis of variance was applied; it determined that the data of dried pine and eucalyptus are significant since their statistical probability exceeded 0.05 with a confidence level of 95% and a margin of error reaching 5%.

CENTRO DE IDIOMAS



COORDINACION

INTRODUCCIÓN

El Ecuador posee grandes recursos forestales ya que cuenta con una amplia variedad de especies maderables y una gran superficie aprovechable en esta rama industrial.

Hoy en día los procesos de secado de la madera son de importancia fundamental dentro de la industria maderera, un idóneo secado determina valores de humedad apropiados en el material que previene defectos de agrietamiento, rajaduras, colapso, falta de adhesión, torceduras, etc. más bien el secado garantiza productos terminados de alta calidad y durabilidad.

Existen procesos de secado de madera como el secado al aire libre que es un proceso con un alto grado de efectividad a largo plazo, con un tiempo de ejecución amplio, que depende de la especie maderera a secarse y con poca eficacia en el material final propenso a sufrir múltiples defectos. El secado artificial que es otro proceso aplicado en la madera demuestra un alto rendimiento de la materia prima, reducción significativa en el tiempo de secado así como un tratamiento diferente a cada especie maderera a secar, tal vez el impedimento más importante de este sistema sea el factor económico el cual es limitante para su implementación.

Ante lo mencionado se propone la determinación del radio de secado en pino y eucalipto el cual estableció el grado de variación de humedad en función del tiempo, la temperatura y los pesos iniciales y finales.

Es por eso que el desarrollo de la investigación consta de 6 capítulos; el primer capítulo contiene fundamentación teórica sobre la fisiología, estructura, humedad, secado, métodos de secado y radio de secado en el pino y eucalipto.

En el segundo capítulo se explica la metodología utilizada en la investigación, la cual consiste en técnicas, métodos, operacionalización de variables y procedimientos realizados.

El tercer y cuarto capítulo abarca los resultados obtenidos y la discusión de cada uno de ellos en la investigación.

En el quinto capítulo se determinan conclusiones y recomendaciones que se comprobaron en la realización de la investigación.

En el sexto capítulo contiene la propuesta que se desarrolló para referenciar el estudio de futuras investigaciones similares a formular un radio de secado en maderas de la provincia de Chimborazo.

En el séptimo capítulo se menciona la bibliografía utilizada en el desarrollo de esta investigación.

Entonces, la idea de esta investigación es garantizar a pequeñas, medianas y grandes industrias madereras que manejen condiciones de secado similares a las expuestas, la seguridad de implementar el modelo de radio de secado en pino y eucalipto para estandarizar sus procesos, optimizar recursos y procurar obtener después de su manufacturación productos madereros de calidad.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1. ESPECIES MADERERAS

1.1. PINO



Figura # 1 Pino
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

1.1.1. Taxonomía del pino

La taxonomía del pino está dispuesta así:

- Familia: Pinaceae
- Nombre Científico: *Pinus radiata* D. Don
- Nombre Común: Pino [26]

1.1.2. Descripción botánica del pino

- **Árbol:** Alcanza hasta 60 m de altura y 100 cm de DAP (Diámetro a la altura del pecho).
- **Tronco:** Cónico y recto.
- **Corteza externa:** Café agrietada.
- **Corteza interna:** Crema- rosáceo, segrega una resina transparente.
- **Copa:** Alargada y cónica.
- **Hojas:** Aciculares en fascículos de tres.
- **Flores:** Masculinas con estambres peltados, las femeninas se encuentran en conos o estróbilos.
- **Fruto:** Cono o estróbilo leñoso, grande parecido a una piña, contiene semillas aladas. [26]

1.1.3. Requerimientos edafoclimáticos del pino

Es una especie exigente en fosforo, boro y zinc.

Necesita suelos franco-arenosos, bien drenados, con pH neutro a ligeramente ácido, con profundidades de al menos 25cm para establecerse, y superiores a 1m para alcanzar su altura normal.

En cuanto a luminosidad es una planta heliófita por lo que requiere abundante luz solar. [26]

1.1.4. Condiciones climáticas óptimas del pino

- Altitud: 1.800 – 3.500 msnm
- Precipitación: 800 – 1.300 mm
- Temperatura: 11 – 17 °C [26]

1.1.5. Características y tratamiento de la semilla del pino

La semilla no requiere tratamiento pre-germinativo, sin embargo para favorecer la velocidad de germinación, se sugiere remojar las semillas en agua a temperatura ambiente por 24 horas. [26]

1.1.6. Crecimiento del pino

El incremento medio anual de la especie en altura es de 1,22 m. y de diámetro 1,68 cm. El crecimiento es de aproximadamente 20 m³ /año. [26]

1.1.7. Manejo silvicultural del pino

El manejo consiste en realizar limpieas, podas y raleos sugiriendo la realización de tres raleos: el primero a los 7 años, el segundo a los 12 años y el tercero a los 17 años. La poda se la puede realizar con el primer raleo. [26]

1.1.8. Producción en viveros del pino

La siembra de las semillas se las puede realizar en envase de funda plástica, bandejas multipots fijas o intercambiables, así como también en jiffy mediante siembra directa.

Las plantas podrán ser utilizadas en lugar de plantación cuando hayan alcanzado de 20 – 25 cm. de altura. [26]



Figura # 2 Producción en viveros
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

1.1.9. Riesgos o peligros en plantaciones de pino



Figura # 3 Plantación de pino
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

Es atacado en plantaciones por algunos hongos en los brotes terminales. El ataque del hongo *Diplodiapini* puede llegar a ser severo y causar la muerte del árbol.

En regiones con una humedad atmosférica alta se reportan otras enfermedades micóticas importantes, causadas por *Cronartium cerebrum*, *Fomesannosus*, y *Armillaria mellea*. [26]

1.2. EUCALIPTO



Figura # 4 Eucalipto
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

1.2.1. Taxonomía del eucalipto

La taxonomía del eucalipto está dispuesta así:

- Familia. Myrtaceae
- Nombre Científico. *Eucalyptus globulus* Labill
- Nombre Común. Eucalipto [25]

1.2.2. Descripción botánica del eucalipto

- Tronco cilíndrico, recto, grueso alcanza hasta 2 m de DAP.

- Copa alargada e irregular sobre un fuste limpio de ramas hasta en 2/3 de su altura total.
- Corteza de 3 cm de grosor que desprende en tiras al madurar dejando una segunda corteza lisa dando al árbol un aspecto característica en ocasiones expulsa resina
- Hojas juveniles opuestas, sésiles, de base cordada, de color gris-azulado, de 8-15 cm de longitud y 4-8 cm de anchura. Las adultas alternas, pecioladas, con la base cuneada, linear-lanceoladas, de 15-25 cm de longitud, con el ápice acuminado.
- Flores axilares, solitarias o en grupos de 2-3, de hasta 3 cm de diámetro, con numerosos estambres de color blanco.
- Fruto en cápsula campaniforme de color glauco y cubierta de un polvo blanquecino, de 1.4-2.4 cm de diámetro.
- Semillas fértiles son negras, rugosas y más grandes, los óvulos abortados son, rojizos y livianos. [25]

1.2.3. Requerimientos edafoclimáticos del eucalipto

La especie se desarrolla mejor en suelos franco arenosos – arcillosos, o, areno – arcillosos, con un pH de 5 a 7, con buen drenaje y no compactados. La intensidad de la labranza depende del grado de la pendiente. [25]



Figura # 5 Requerimientos edáficos del eucalipto
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

1.2.4. Condiciones climáticas óptimas del eucalipto

- Altitud: 2.200 – 3.300 msnm
- Precipitación: 800 – 1.500 mm
- Temperatura: 10,8 – 16,8 °C [25]

1.2.5. Preparación del terreno y plantación de eucalipto

La intensidad de la labranza depende del grado de la pendiente. En zonas secas con terrenos tipo cangagua, es preferible plantar abriendo surcos que sigan las curvas de nivel, para aprovechar de mejor manera el agua lluvia.

Se considera el establecimiento inicial de 1110 árboles por ha (3m x 3m) con dos raleos que pueden realizarse al quinto y décimo año para fines comerciales; no se recomienda el uso como fines de protección por ser una especie introducida en el país.

Como sistemas agroforestales puede ser utilizada como cortinas rompe vientos y en linderaciones de predios, los distanciamientos bajo este sistema dependerán del uso dado.

La especie presenta una poda natural de ramas, aunque en ciertas ocasiones se tenga que realizar una poda de las ramas bajas para evitar la presencia de nudos en la madera aserrada. [25]

1.2.6. Crecimiento del eucalipto

Los incrementos medios anuales son: de 1,2 – 1,6 m. en altura y de 1,1 – 1,2 cm en diámetro con un rendimiento en volumen de 16,76 – 26,24 m³/ha/año. [25]

1.2.7. Manejo silvicultural del eucalipto

Los eucaliptos no se plantan con espaciamiento excesivo, se despojan, naturalmente de su ramas y no requieren prácticas de poda solo en muy contados casos es necesaria la poda.

No es fácil determinar cuándo se deben realizar los aclareos en una masa forestal ya que los eucaliptos de 2 a 3 años crecen sin dificultad tanto en altura como en diámetro pero a partir de esa edad su copa tiene un crecimiento diametral hasta quedar este estacionario. [25]

1.2.8. Producción en viveros del eucalipto

La siembra se la puede realizar en cajones (o semilleros de alta densidad poblacional) para luego de germinadas replicarlas a envases de diferentes materiales, tanto individuales como en bloques; cuando las plantas han alcanzado de 2 – 8 cm. de altura se realiza el trasplante, después de los cual a las dos semanas aproximadamente las plantas debe pasar por un proceso de rustificación.

Se recomienda un sustrato a base de 1 parte de tierra por 3 de cascarilla de arroz o arena, desinfección con 1 litro de formol por m² al 20% de concentración, o mediante la utilización de 50 gramos de Basamid por m² con el sustrato húmedo. [25]

1.2.9. Riesgos o peligros en plantaciones de eucalipto

En plantaciones se han presentado enfermedades y muerte descendente, inducidas por déficit nutricionales. Los hongos patógenos que más afectan las plantaciones son: Diplodiasp. Armillariasp., Alteraniasp.y Corticium salmonicolor que producen chancros, muerte descendente y pudriciones en las raíces. [25]



Figura # 6 Plantación de eucalipto
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

1.3. LA MADERA

1.3.1. Definición de la madera

La madera es un material fibroso y duro, situado debajo de la corteza que es la que forma el cuerpo de los árboles. Está formada por millones de células microscópicas y longitudinales, en forma de tubos. [15]

1.3.2. Clasificación de las maderas

Por su densidad se clasifican en:

- Pesadas
- Semipesados
- Livianas

Por su resistencia se clasifican en:

- Duras
- Semiduras
- Blandas [15]

1.3.3. Componentes principales de la madera

Los componentes principales de la madera se presentan así:

Celulosa (50%) Hidratos de carbono parecidos al almidón. La humedad la descompone fácilmente.

Lignina (25%) Derivado del fenil-propano. Le comunica dureza y protección.

Hemicelulosa (25%) Su misión es unir las fibras.

Otras sustancias: Resinas, grasas, etc. [14]

1.3.4. Estructura de la madera

1.3.4.1. El tronco

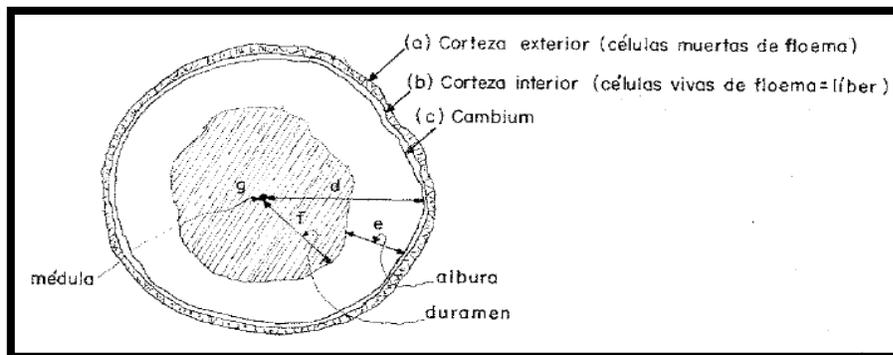


Figura # 7 Estructura de la madera
Fuente: Manual de diseño para maderas del grupo andino, 1988

La figura # 7 es la representación de la sección transversal de un árbol maduro.

1.3.4.2. Corteza exterior

Es la cubierta que protege al árbol de los agentes atmosféricos, en especial de la insolación; está formada por un tejido llamado floema que cuando muere forma esta capa. [9]

1.3.4.3. Corteza interior

Es la capa que tiene por finalidad conducir el alimento elaborado en las hojas hacia las ramas, tronco y raíces, está constituido por el tejido floemático vivo, llamado también líber. [9]

1.3.4.4. Cambium

Es la capa de células en activo proceso de división, que se encuentra entre el leño y la corteza, tejidos a los cuales da origen. [5]

Cada año el cambium origina dos capas de células adultas. La primera capa hacia el interior la cual es la formadora de la madera y se reconoce luego como anillo de crecimiento.

La segunda capa hacia afuera que forma el floema que transporta savia elaborada en dirección a las raíces. [14]

1.3.4.5. Madera o xilema

Es la parte maderable o leñosa del tronco, se puede distinguir en ella la albura, el duramen y la medula. [9]

1.3.4.6. Albura

Es la capa exterior del leño, ubicada entre el cambium y el duramen, que frecuentemente contiene almidón; es generalmente de color más claro, más permeable y menos durable que el duramen. [5]

1.3.4.7. Duramen

Es la parte interna del leño, sin almidón, generalmente de color más oscuro, menos permeable y más durable que la albura. [5]

1.3.4.8. Médula

Parte central del árbol constituida por tejido flojo y poroso. Tiene un diámetro muy pequeño. [14]

1.3.5. Propiedades de la madera del pino

1.3.5.1. Propiedades organolépticas de la madera del pino

- Color: La albura blanca, con transición gradual a duramen amarillo pálido, aumentando su intensidad a marrón muy pálido
- Veteado suave con líneas longitudinales oscuras
- Grano recto
- Textura fina
- Olor característico a madera resinosa, fragante cuando está fresca
- Sabor ausente o no distintivo

- Brillo medio
- Durabilidad: No es resistente al ataque de hongos e insectos. Posee una duración en uso exterior de un año
- Trabajabilidad: De fácil trabajabilidad, presenta defectos muy leves en el cepillado y moldurado [26]

1.3.5.2. Propiedades físicas de la madera del pino

Densidad (gr/cm ³)	Verde	Seco al aire	Básica
		1,04	0,48
Contracción normal %	Tangencial	Radial	Volumétrica
	5,2	3,0	1,73

Cuadro # 1 Propiedades físicas de la madera del pino
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

1.3.5.3. Propiedades mecánicas de la madera del pino

Flexión Estática	ELP	555	Kg/cm ²
	MOR	793	Kg/cm ²
	MOE	110,2	Ton/cm ²
Compresión Paralela	ELP	299	Kg/cm ²
	MOR	434	Kg/cm ²
	MOE	107,8	Ton/cm ²
Compresión Perpendicular	ELP	74	Kg/cm ²
	MOR	136	Kg/cm ²
Dureza	Lados	348	Kg
	Extremos	472	Kg

Cuadro # 2 Propiedades mecánicas de la madera del pino
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

ELP: Esfuerzo en el límite proporcional

MOE: Módulo de elasticidad

MOR: Módulo de ruptura

1.3.6. Propiedades de la madera del eucalipto

1.3.6.1. Propiedades organolépticas de la madera del eucalipto

- Color la albura es de color crema, con tintes grisáceos
- Veteado líneas verticales, satinado poco pronunciado
- Textura mediana
- Grano recto desviado a entrecruzado por nudosidades
- Olor eucalipto
- Sabor no distintivo
- Brillo de bajo a mediano
- Durabilidad tolera el fuego, y es resistente al ataque de termitas y perforadores marinos.
- Trabajabilidad Presenta defectos muy leves de cepillado y moldurado. Los defectos de taladro son leves. La madera puede presentar problemas de rajaduras y colapso. [25]

1.3.6.2. Propiedades físicas y mecánicas de la madera del eucalipto

	Densidad (cm³)	0,55g
Contracción	Radial (%)	5%
	Tangencial (%)	11%
Flexión	Esfuerzo medio (Kg/cm²)	873,06
	Módulo de elasticidad medio (Kg/cm²)	133444,89
	Esfuerzo mínimo (Kg/cm²)	633,77
	Módulo de elasticidad mínimo (Kg/cm²)	93510,04

Cuadro # 3 Propiedades físicas y mecánicas de la madera del eucalipto
Fuente: Ecuador Forestal, 2010

1.4. SECADO DE LA MADERA

1.4.1. Definición

El secado de la madera consiste en obtener un contenido de humedad que quede en equilibrio con la atmósfera en la cual será utilizada con el menor costo y degradación posibles. [14]

1.4.2. Propiedades básicas para el secado de la madera

1.4.2.1. Higroscopicidad

Es la propiedad que tiene la madera de perder o tomar humedad de acuerdo con el medio ambiente donde se encuentre. [14]

1.4.2.2. Anisotropía

Es la propiedad que tiene la madera por medio de la cual cambia sus dimensiones en forma diferente en todas sus direcciones. [14]

1.5. IMPORTANCIA DEL SECADO DE LA MADERA

A continuación se indican algunos aspectos relacionados con la madera, dentro de los cuales el secado puede intervenir:

1.5.1. Peso de la madera

Al realizar el secado de la madera, se elimina gran parte de su humedad y por lo tanto se reduce su peso. Esta reducción, en términos generales, varía desde un 25% hasta

un 50% con respecto a su peso inicial. Esto permite una considerable economía por concepto de transporte de madera y mayor facilidad en el manipuleo. [3]

1.5.2. Estabilidad dimensional

Siempre y cuando se seque la madera a un contenido de humedad igual o muy próxima al que obtendría en servicio (contenido de humedad de equilibrio), esta no sufrirá cambios apreciables en su forma y dimensiones. [3]

1.5.3. Resistencia mecánica

A medida que la humedad de la madera es removida, sus propiedades mecánicas permanecen prácticamente constantes hasta tanto el agua libre haya sido eliminada.

Bajo este punto la resistencia mecánica de la madera aumenta progresiva y significativamente, la madera con un contenido de humedad del 10% o menor, se volverá aproximadamente un 33% más resistente que la madera verde. [3]

1.5.4. Pudrición y manchas

Si la madera se somete a un proceso de secado eficiente y es mantenida a un contenido de humedad menor del 20%, no sufrirá degradación por hongos. Además, algunos insectos que atacan madera verde no deteriorarán la madera correctamente seca. [3]

1.5.5. Tratamientos de preservación

La madera seca se impregna mejor cuando se utilizan sustancias preservantes no hidrosolubles o cuando se emplean métodos de tratamiento de alta presión. [3]

1.5.6. Adhesión

La madera que ha sido secada correctamente obtendrá una mejora considerable en sus propiedades adherentes y se desarrollarán líneas de cola más estables y de mayor resistencia. [3]

1.5.7. Acabados

La madera seca tendrá una mayor capacidad de aceptar y retener en buen estado pinturas, barnices, lacas o cualquier tipo de recubrimiento superficial. [3]

1.5.8. Trabajabilidad

La madera con bajo contenido de humedad presenta mejores características de trabajabilidad que la madera verde. Por lo tanto, puede ser procesada (aserrada, cepillada, moldurada, lijada, etc.) de manera más fácil y eficiente y así obtener productos mejor terminados. [3]

1.5.9. Aislamiento térmico

Los espacios celulares e intercelulares en la madera seca están ocupados por aire, lo cual hace que la transmisión del calor a través de ella sea baja. Esto permite utilizar la madera como material aislante de la temperatura. [3]

1.5.10. Aislamiento eléctrico

Conforme la madera posea un menor contenido de humedad, su resistencia al paso de una corriente eléctrica aumentará considerablemente, permitiendo emplear la madera como aislante de la electricidad. [3]

1.6. LA HUMEDAD EN LA MADERA

En un árbol recién cortado, su madera contiene una importante cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, la región de procedencia y la especie forestal que se trate. [11]

La humedad de la madera varía entre límites muy amplios. En la madera recién cortada oscila entre el 50% y 60%, y por imbibición puede llegar hasta el 250% y 300%. [15]

El agua contenida en la madera se encuentra bajo diferentes formas (agua libre, agua de saturación y agua de constitución), tal como se describe a continuación:

1.6.1. Agua fija

Es el agua que se encuentra en las paredes celulares; también es llamada agua de imbibición. Existe la teoría de que el agua higroscópica está constituida por hidrogeniones fijados principalmente a los grupos hidróxilo de la celulosa y hemicelulosa y en menor proporción a los grupos hidroxilo de la lignina.

Durante el secado de la madera, cuando ésta ha perdido su agua libre por evaporación y continua secándose, la pérdida de humedad ocurre con mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con humedad relativa de la atmósfera circundante.

Para la mayoría de las especies, el equilibrio higroscópico está entre el 12 y 18% de contenido de humedad, dependiendo del lugar donde se realiza el secado. La madera secada al aire libre solo puede alcanzar estos valores de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad menores, debe acudir al secado artificial para eliminar el resto del agua de saturación o higroscópica. [11]

1.6.2. Agua de constitución

Es la que forma parte de la materia celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Su separación implicaría la destrucción total de la madera. [15]

1.6.3. Agua libre

El agua libre es la que se encuentra ocupando las cavidades celulares o lumen de los elementos vasculares, dándole a la madera la condición de “verde”. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros.

Al iniciarse el secado, el agua libre se va perdiendo fácilmente por evaporación, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta el momento en que ya no contiene más agua de este tipo. En este punto, la madera estará en lo que se denomina “punto o zona de saturación de las fibras” (PSF), que corresponde a un contenido de humedad entre el 21 y 32%. Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes celulares están completamente saturadas pero sus cavidades están vacías.

Durante esta fase de secado, la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Por tal razón, el PSF es muy importante desde el punto de vista físico-mecánico y de algunas propiedades eléctricas de la madera. [11]

1.7. EQUILIBRIO DE LA HUMEDAD EN LA MADERA

El equilibrio higroscópico de una madera evidencia un estado sensible a los cambios ambientales, ya que el grado de humedad que la caracteriza en un momento dado, puede aumentar o disminuir, de acuerdo con las modificaciones de las condiciones de temperatura y humedad del aire.

La determinación del equilibrio higroscópico de la madera tiene suma importancia para las industrias madereras y en el uso final de los productos elaborados. Como las condiciones ambientales de todos los sitios varían constantemente, ninguna madera se encuentra en equilibrio estable, sino que el contenido de humedad sigue las fluctuaciones que le condiciona el medio ambiente.

El equilibrio higroscópico en un clima determinante, no es igual para todas las maderas, las maderas se igualan con diferencias de hasta más o menos 3% bajo las mismas circunstancias climáticas, con una supuesta temperatura de 20° C. [15]

La madera se ajusta su contenido de humedad en dependencia a la humedad relativa, como se demuestra en el siguiente cuadro:

HUMEDAD RELATIVA	HUMEDAD DE LA MADERA
100%	28,30%
90%	20,20%
80%	16,30%
70%	13%
60%	10,50%
50%	9%
40%	7,60%
30%	5,90%
20%	4,30%

Cuadro # 4 Equilibrio higroscópico de la madera
Fuente: Rodríguez-Tenesaca, 2008

Para el equilibrio higroscópico la humedad relativa es mucho más significativa que la temperatura. La humedad relativa refleja el grado de saturación de aire con agua.

La cantidad máxima de agua que puede absorber el agua depende de su temperatura, cuanto más caliente es, mayor cantidad de agua puede absorber, tal como se aprecia a continuación:

TEMPERATURA °C	g/m ³
-20	0,9
-15	1,4
-10	2,17
-8	2,74
-6	3,17
-4	3,66
-2	4,22
0	4,85
2	5,57
4	6,37
6	7,27
8	8,28
10	9,41
12	10,68
14	12,09
16	13,65
20	15,4
25	17,31
30	30,39
40	51,12
50	82,98
60	130,1
70	197
80	293
90	423
100	597

Cuadro # 5 Absorción de agua en la madera
Fuente: Rodríguez-Tenesaca, 2008

La madera tiene un comportamiento determinado por su red capilar, con cambios notables de forma y volumen. Cuando pierde agua o humedad se contrae un 0,8% en dirección axial o de las fibras, del 1 al 7,8% en dirección radial, y del 5 al 11,5% en sentido tangencial.

La contracción es mayor en la albura que en el corazón, originándose tensiones por desecación que agrietan y alabean la madera, estando la convexidad en el duramen.

Una pieza que contenga corazón, duramen y albura, se contrae más en los extremos.

En madera verde, el contenido de humedad varía entre 120% y 150%. En madera seca, un 12% es habitual, no obstante, puede variar entre 8% y 18% dependiendo del uso o del producto. [15]

1.8. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA

La determinación del contenido de humedad en la madera se hacen considerando solo los valores del agua libre y de saturación o higroscópica.

Es decir en la práctica se considera a la madera totalmente seca, cuando a la acción de una determinada temperatura alcanza su peso constante.

El contenido de humedad (CH) se define como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresado en función del peso de esa pieza en condición seca al horno o anhidra. [11]

Su valor numérico se expresa en porcentaje y se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$CH = [(Ph - Ps) / Ps] \times 100\%$$

Donde:

CH= Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro.

Ph= Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial.

Ps= Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante. [9]

1.9. MÉTODOS DE SECADO EN LA MADERA

Para la importante consideración al momento de elegir el método de secado más idóneo para la madera es vital tomar en cuenta la calidad requerida, el costo de los procesos y precio del producto final.

Entre los métodos de secado de la madera se pueden mencionar los siguientes:

1.9.1. Secado natural

El secado natural consiste en exponer la madera a la acción de los factores climáticos de un lugar. Estos factores son la temperatura, la humedad relativa de la atmosfera y el aire que en permanente movimiento, sirve de agente para establecer un equilibrio higroscópico entre el medio ambiente y la madera.

Este sistema de secado ha sido el más ampliamente utilizado. Sin embargo, por estar sujeto a los cambios climáticos, no es posible ejercer control sobre su desarrollo. La duración depende de las características de las especies de madera, de las condiciones climáticas, de la forma de apilado, y de la disposición y ubicación del patio de secado.

El porcentaje de humedad más apto para poder trabajar la madera convenientemente varía según las especies, pero puede decirse que el ideal este entre el 12% y el 15%.

La merma de volumen que sufre la madera al secarse varía, además de por la especie, por el sentido de sus fibras. En el sentido longitudinal la merma no es apreciable, en el sentido radial es aproximadamente del 4% al 6%, y en el sentido tangencial del 6% al 12%. [15]

1.9.1.1. Tiempo de secado en el sistema natural

El tiempo de secado depende de varios factores entre los cuales podemos destacar los siguientes:

- Especie de la madera
- Espesor de la madera
- Contenido de humedad inicial y final
- Temperatura de secado
- Humedad relativa al medio ambiente circundante
- Velocidad del flujo del aire producida por el viento
- Circunstancias físicas del patio o del secadero

Para secar la madera naturalmente y llegar a un 20% de humedad, se requiere aproximadamente de unos 30-40 días por cada cm de espesor de la madera. Es difícil secar la madera en este sistema para alcanzar una humedad en la madera comprendida entre el 10% y 12%. [15]

1.9.1.2. Ventajas y desventajas del secado natural

La principal ventaja del secado natural sobre otros métodos de secado de maderas, es el bajo costo de inversión inicial de equipamiento.

La principal desventaja es la larga duración de los procesos y la imposibilidad de llegar a contenidos de humedad tan bajos como los requeridos para muchos usos.

También no es posible controlar los factores que determinan el secado y esto deriva en que se limitan las acciones para impedir la formación de determinados defectos y daños en la madera. [15]

1.9.2. Secado artificial

El secado artificial surgió como respuesta a las deficiencias del secado natural. Por medio de equipos e instalaciones especiales, se establecen en recintos cerrados condiciones climáticas diferentes a las condiciones atmosféricas naturales.

Mediante ventiladores, se produce un flujo de aire estable que circula a través de la disposición de colocación de las maderas, con temperatura y humedad relativa controladas de acuerdo a la especie y dimensiones de la madera a secar. La velocidad del secado se puede incrementar, elevando la temperatura tanto como sea admisible para cada especie en particular y a la calidad de producto final deseada.

El secado artificial, además de reducir considerablemente el tiempo de secado y de restringir la producción de defectos, permite alcanzar contenidos de humedad tan bajos como sean requeridos de acuerdo al uso final que se le ha de dar a la madera. [15]

1.9.2.1. Ventajas del secado artificial con respecto al secado natural

Disminuye los costos de un prolongado secado natural, ya que se puede realizar en un tiempo que varía entre los 6 y 20 días, contra los 18 a 24 meses del otro sistema. Evita en gran parte el ataque de insectos y las manchas que se producen en el secado natural. [15]

1.9.2.2. Métodos de secado artificial

Cualquiera que sea el método de secado artificial utilizado tiene que contemplarse 2 fenómenos: el movimiento del agua contenida en la madera hacia el exterior y su evaporación de la superficie. La evaporación superficial no es difícil de conseguir suministrando condiciones adecuadas de temperatura y humedad de aire, además de proporcionar ventilación suficiente. [15]

Los métodos de secado artificial más utilizados para el proceso de secado de la madera son:

- Secado por condensación
- Secado por convección

1.9.2.2.1. Secado por condensación

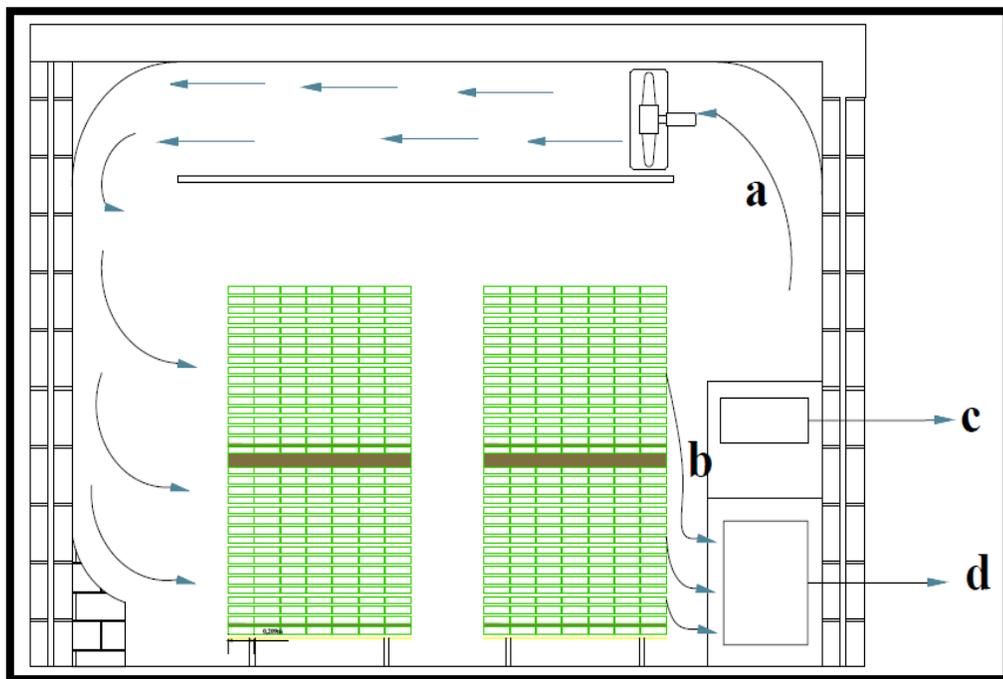


Figura # 8 Principio de funcionamiento del método de secado por condensación
Fuente: Rodríguez-Tenesaca, 2008

Cuando:

a = aire caliente

b = aire frío

c = calefacción

d = refrigeración

En la figura # 8 se explica el funcionamiento del secador por condensación el cual consiste en que el aire relativamente saturado de humedad será enfriado, esto quiere decir que el aire reduce su capacidad de absorción de agua y debido a esta circunstancia el exceso de agua evaporada empieza a condensarse y sale en forma líquida del refrigerador al exterior de la cámara de secado.

De esta manera se mantiene la capacidad de absorción del aire, caso contrario, el aire se satura con el agua que contiene la madera y se determinara su funcionalidad como medio de secado.

La temperatura de secado oscila entre 35 a 45° C, relativamente baja. [15]

1.9.2.2.2. Secado por convección

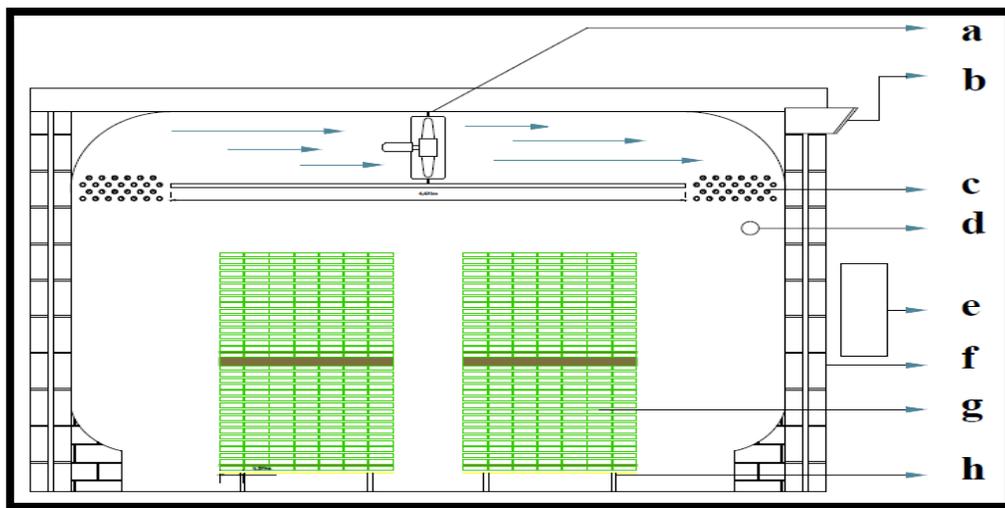


Figura # 9 Principio de funcionamiento del método de secado por convección
Fuente: Rodríguez-Tenesaca, 2008

Cuando:

a= ventilador

b= orificios regulables para intercambio de aire

c= intercambiador de calor

d= sistema de humidificación

e= sistemas de control

f= cámara de secado

g= madera a secarse

h= coche de alimentación de madera

En la figura # 9 se explica el funcionamiento del secador por convección el cual trabaja con temperaturas más elevadas, normalmente oscilan entre 60 a 80° C, este tipo de secadero utiliza por lo general intercambiadores de calor y medios de calefacción como: agua caliente, aceite térmico, vapor y gases de combustión.

El tiempo de secado se reduce considerablemente de 6 a 15 días, por fase de secado de madera y dependiendo del tipo de madera que se está secando. [15]

1.10. MOVIMIENTO DEL AGUA EN LA MADERA

El agua en la madera se mueve de las zonas de alto contenido de humedad a las de más bajo contenido, en un esfuerzo por alcanzar, un equilibrio de humedad en toda la pieza de madera y, por otra, una condición de equilibrio entre el contenido de humedad de la madera y las condiciones climáticas del medio circundante. [22]

Si la temperatura y la humedad relativa del ambiente permanecen constantes, la madera se secará o absorberá humedad hasta que se establezca un equilibrio higroscópico. La humedad en la madera se mueve a través de varios tipos de conductos, siendo los principales las cavidades celulares o lúmenes, las punteaduras,

los radios medulares, los espacios intermicelares de las paredes celulares y las perforaciones. [21]

Las características de estos conductos, conjuntamente con la permeabilidad de la madera, determinan la velocidad del movimiento del agua en las tres direcciones o planos de corte. En madera normal, la velocidad del agua es mayor en sentido longitudinal, algo menor en sentido radial y mínimo en el tangencial. [17]

El movimiento del agua en la madera durante el proceso de secado es impulsado por varias fuerzas que pueden actuar simultáneamente. Estas son las siguientes:

1.10.1. Fuerzas capilares

Son aquellas que ocasionan el movimiento del agua libre de una célula a otra, a través de las cavidades celulares, punteaduras, perforaciones, espacios intermicelares, y radios medulares.

Cuando una pieza de madera verde empieza a secarse, la evaporación del agua de las capas superficiales origina una fuerza de atracción o arrastre sobre el agua libre de las células adyacentes. [2]

El flujo capilar originado por esta fuerza de arrastre hace que el agua libre del interior se mueva de una célula a otra buscando la superficie de la pieza de madera. Mientras el proceso de secado avanza y el agua libre de las cavidades celulares se elimina, la humedad que permanece en la madera se encuentra en forma de vapor en las cavidades celulares o en forma de agua higroscópica en los espacios intermicelares de las paredes celulares.

La acción capilar se desplaza progresivamente hacia el centro de la madera para desaparecer gradualmente cuando el contenido de humedad de las células del interior tiende hacia el punto de saturación de las fibras. [9]

1.10.2. Fuerzas debidas a diferencias en la presión del vapor

Cuando cesa la atracción capilar, la casi totalidad de las cavidades celulares solo contienen aire y vapor de agua, generándose una presión de vapor que será tanto más grande cuanto más elevado sea el contenido de vapor en dichas cavidades, alcanzando su valor máximo hacia el centro de la pieza y decreciendo hacia la periferia.

La diferencia de presión de vapor entre dos puntos, llamada gradiente de presión del vapor, es la responsable de que la humedad de la madera, en estado de vapor, migre de las zonas interiores hacia las exteriores que tiene una presión de vapor menor. [9]

1.10.3. Fuerzas debidas a diferencias en el contenido de humedad

Cuando la humedad de la madera empieza a abandonar los espacios intermicelares de las paredes celulares, en las zonas cercanas a la superficie de la pieza se crea una diferencia o gradiente de contenido de humedad entre la superficie y el interior de la pieza. Como existe una gran afinidad entre el tejido celulósico de las paredes y el agua, las paredes más secas de las capas superficiales absorben la humedad de las paredes con un contenido de humedad más alto; es decir, el agua se desplaza de las células interiores más húmedas hacia las de la superficie que se encuentran más secas. [23]

Finalmente, con relación al movimiento migratorio del agua en la madera, es importante definir el término difusión que es el fenómeno provocado por la combinación de los gradientes de presión de vapor en las cavidades celulares y los gradientes de contenido de humedad de las paredes celulares. [7]

En el movimiento de la humedad de la madera del centro a la periferia, una molécula de agua se desplaza primero a través de una pared celular debido a su gradiente de contenido de humedad, luego a través de una cavidad celular y sus conductos debido al gradiente de la presión del vapor, después nuevamente a través de una pared celular más seca según el gradiente del contenido de humedad y así sucesivamente, repitiendo el proceso, hasta alcanzar la superficie de la pieza de madera. [23]

Cuando el flujo de agua tiene lugar en sentido longitudinal, la migración de la humedad se hace en su mayor parte a través de las cavidades celulares, mientras que en sentido transversal predomina el movimiento a través de las paredes celulares.

Puesto que la difusión del vapor a través de las cavidades celulares es mucho más rápida que a través de las paredes, la velocidad de secado es mucho mayor en la dirección longitudinal de una pieza de madera. Asimismo, la humedad se difunde más rápidamente en la madera de albura que en la de duramen, debido a que los extractivos y las punteaduras bloqueadas del duramen se oponen parcialmente al paso de la humedad. [17]

1.11. GRADIENTE DE SECADO DE LA MADERA

El gradiente de secado (GS) de la madera es la relación entre la humedad contenida en la madera y la humedad de equilibrio en ese ambiente.

$$\text{Gradiente de secado} = \frac{\text{Humedad de la madera}}{\text{Equilibrio higroscópico}}$$

El gradiente de secado es un factor adimensional, es decir no tiene unidades.

La calidad del secado depende de suma importancia según la magnitud del GS. Cuando este valor es demasiado grande, el secado se realiza de forma forzada con consecuencias tales como rajaduras, torceduras y encostramientos.

En el caso inverso de que el GS sea muy bajo, el proceso de secado es muy lento y existe el peligro del ataque de hongos. [15]

El GS depende de los siguientes factores:

1.11.1. La clase de la madera

Existen ciertas clases de madera en las que el GS es más elevado que en otras.

1.11.2. El estado de secado

Por la más fácil evaporación del agua libre, el valor del GS es más pequeño, desecando la madera hasta el punto de saturación de la fibra, en ciertas ocasiones el GS se eleva ligeramente cuando se evapora el agua de constitución.

1.11.3. La temperatura de secado

Temperaturas bajas comprendidas en valor de 40° C el valor de GS puede ser elevado.

1.11.4. Espesor de la madera

Un mayor grosor en la madera produce en GS menor. Los valores normales están entre 1,5 y 2,5 dependiendo de la especie. En piezas muy gruesas no se pueden usar gradientes altos ya que la diferencia entre el centro de la pieza, que está húmedo, y la superficie, que tiene una humedad de equilibrio de acuerdo al ambiente, es muy alta y provoca esfuerzos que dañan la madera o interrumpen el secado.

El gradiente de secado se toma en cuenta a partir de que la madera se encuentra bajo el punto de saturación de la fibra.

Para mantener un determinado GS es necesario bajar de manera paulatina el equilibrio higroscópico, conforme la madera pierda humedad. [15]

1.12. PUNTO DE SATURACIÓN DE LAS FIBRAS (PSF)

Es aquel en el cual las cavidades celulares se encuentran vacías y sus paredes completamente saturadas de agua.

Su fórmula está dada así: $PSF = (D_o - D_b / D_o * D_b) * 100$

Cuando D_o = Densidad seca y D_b = Densidad básica. [15]

1.13. PROCESO DE SECADO EN LA MADERA

Para secar madera es de mucha importancia controlar de manera permanente los siguientes factores que influyen dentro del proceso:

- Temperatura del secado ° C
- Humedad relativa (%)
- Equilibrio higroscópico (%)
- Gradiente de secado

La temperatura de secado varía entre 45° C hasta 80° C, en dependencia de la madera a secar. En la fase inicial, hasta desecar la madera al punto de saturación de la fibra, se mantiene la temperatura entre 45° C y 60° C, para luego elevarla hasta 80° C. En la última etapa de secado con la fase de acondicionamiento es posible incrementar la

temperatura hasta 85° C o 95° C, para luego bajar a una temperatura de 40° C o 50° C en la fase de enfriamiento.

El tiempo de secado depende, entre otros factores, de la temperatura de secado.

La humedad relativa se ajusta de acuerdo al equilibrio higroscópico requerido, para obtener un determinado gradiente de secado.

El proceso de secado consta de 3 etapas distintas:

- Periodo de calentamiento
- Periodo de secado
- Periodo de tratamiento posterior [15]

1.13.1. Periodo de calentamiento

Se calienta la madera a la temperatura del secado, el tiempo de secado de esta etapa depende de la potencia del secador utilizado, se estima una hora por cada cm de espesor de madera aproximadamente. [15]

1.13.2. Periodo de secado

Dentro de este proceso podemos identificar dos etapas:

- Periodo de secado hasta el PSF (T1)
- Periodo de secado desde el PSF hasta la humedad final (T2)

El valor de T1 existe, cuando la madera tiene un contenido de humedad superior al PSF.

En el periodo de secado del PSF hasta la humedad final T2, generalmente se eleva la temperatura de secado, lo que implica a su vez una reducción del tiempo. [15]

1.13.3. Periodo de tratamiento posterior

Consta de una fase de acondicionamiento y una fase de enfriamiento, en la fase de acondicionamiento se uniforma la humedad dentro de la madera secada.

Las partes exteriores de la madera se han desecado más que su parte interior. El objetivo de la fase de acondicionamiento es el de igualar estas diferencias de humedad final deseada.

La temperatura de secado se mantiene constante durante esta fase de secado o tiene un aumento muy pequeño, con la fase de enfriamiento termina el proceso de secado.

La pérdida de agua se produce por un proceso de naturaleza diferente dependiendo de si el contenido de humedad está por encima o por debajo del punto de saturación de las fibras.

Por encima de este nivel, la velocidad de secado bajo condiciones estables de temperatura y humedad relativa del aire permanece constante. Cuando el secado ha avanzado a contenidos de humedad por debajo del PSF, el agua retenida en la madera se mueve más lentamente, retardando el proceso. [15]

1.14. TIEMPOS DE SECADO EN LA MADERA

El tiempo de secado en la madera depende de los siguientes factores:

- Especie de la madera
- Espesor de la madera

- Humedad inicial del secador
- Temperatura de secado
- Velocidad del flujo de aire de secado
- Calidad del secado que se desea

Referido a la especie de la madera podemos distinguir entre maderas coníferas y frondosas, en lo que respecta al espesor de la madera, relacionada directamente con el peso específico, es decir, cuan más pesada sea, mayor es su masa celular y más difícil la evaporación del agua en el interior de la madera, entonces es mayor el tiempo de secado.

La fórmula matemática del espesor de la madera con respecto al tiempo de secado es:

$$\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \left(\frac{e_2}{e_1}\right)^f \text{ o } t_2 = t_1 \left(\frac{e_2}{e_1}\right)^f$$

En donde:

t1= tiempo de secado conocido

t2= tiempo de secado de madera de diferente espesor

e1= espesor de la madera de tiempo de secado conocido

e2= espesor de la madera de tiempo de secado desconocido

f= numero constante= 1,5

El tiempo requerido para secar una carga de tablas depende de:

- Las características de la madera
- El tipo de secador
- El método de secado empleado

Los parámetros dentro del proceso de secado artificial dependen del tipo de madera y del tipo de secador, con respecto a este se pueden optimizar algunas características como el aislamiento térmico y el sistema de ventilación, que pueden resultar en una disminución del tiempo de secado [14]. En el Cuadro # 6 se indican los tiempos necesarios para secar distintas clases de madera:

Especie de la madera	Tipo de madera	Tiempo de secado aproximado
Aliso	Blanda	5 días para 1”/ 7 días para 4”
Pino	Blanda	4 días para 1”/ 7 días para 4”
Eucalipto	Blanda	6 días para 1”/ 7 días para 4”
Álamo	Blanda	4 días para 1”/ 7 días para 4”
Nogal	Blanda	7 días para 1”/ 7 días para 4”
Cedro	Blanda	7 días para 1”/ 7 días para 4”
Roble	Semi-blanda	8 días para 1”/ 12 días para 4”
Haya	Semi-blanda	9 días para 1”/ 12 días para 4”
Incienso	Dura	12 días para 1”/ 20 días para 4”
Quebracho	Dura	17 días para 1”/ 25 días para 4”
Lapacho	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”
Loro blanco	Dura	16 días para 1”/ 24 días para 4”
Loro negro	Dura	16 días para 1”/ 24 días para 4”
Mara	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”
Almendrillo	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”
Algarrobo	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”
Guayacán	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”
Quinilla	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”
Shihuahuaco	Dura	12 días para 1”/ 20 días para 4”
Palo santo	Dura	16 días para 1”/ 24 días para 4”
Cebil	Dura	12 días para 1”/ 20 días para 4”
Quina	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”
Quinilla	Dura	14 días para 1”/ 22 días para 4”

Cuadro # 6 Tiempos de secado en maderas
Fuente: Morris, 2008

1.14.1. Cálculo del tiempo de secado en la madera

Para el cálculo del tiempo de secado se utiliza la siguiente formula:

$$T_s = \frac{1}{a} \times \ln\left(\frac{H_i}{H_f}\right) \times \left(\frac{e}{25}\right)^f \times \left(\frac{65}{\Delta}\right)^f \times \left(\frac{1,5}{v}\right)^f$$

En donde:

ts= tiempo de secado en horas

a= factor de proporcionalidad

a= 0,0477 para madera blanda

a= 0,0265 para madera dura

Hi= humedad inicial %

Hf= humedad final %

e= espesor de la madera en mm

Δ= temperatura de secado °C calculado para cada fase

v= velocidad del aire

f= numero constante =1,5

Al tiempo de secado hay que sumar el tiempo para el calentamiento de la madera y el tiempo requerido para el acondicionamiento y enfriamiento de la misma. [15]

1.15. BASES FISICAS DEL SECADO DE MADERA

Tanto en el secado artificial como en el secado al aire libre, el agua es extraída de la madera por evaporación. La velocidad de evaporación es controlada por la temperatura, la humedad del ambiente y la velocidad del aire que pasa a través de la madera a secar. [1]

1.15.1. Temperatura

El calor es la fuente de la que las moléculas de agua en la madera adquieren la energía cinética necesaria para la evaporación. La velocidad de evaporación depende de la cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del aire en circulación para absorber la humedad liberada por la madera.

La temperatura es un factor de aceleración del proceso de evaporación ya que, cuanto más elevada sea la temperatura del ambiente, más intensa será la evaporación debido a que el aire podrá absorber mayor humedad.

Hacia el interior de la tabla de madera, la temperatura condiciona también la velocidad del movimiento del agua, aumentando el coeficiente de circulación con un incremento de la temperatura. Así, a 80°C la velocidad del movimiento del agua al interior de la madera es aproximadamente cinco veces mayor que a 20°C.

El control de la temperatura constituye, para muchas especies, el factor de mayor peso durante el desarrollo del proceso de secado. Así por ejemplo, para maderas livianas la temperatura máxima admisible alcanza los 70 a 90°C para una calidad de secado excelente; para una calidad media a regular la temperatura máxima puede subir hasta 120°C. Para maderas semipesadas a pesadas, el rango de temperatura máxima es de 60 a 80°C. Para madera verde y recién aserrada, con un contenido de humedad mayor que 30%, debe secarse a temperaturas más bajas para evitar defectos como colapso de células, grietas internas, rajaduras, etc.

A temperatura constante y cuando los procesos se llevan a cabo en un sistema cerrado, como es el caso de un secador industrial para madera podemos decir que la humedad relativa del aire influye o afecta directamente a la humedad de la madera. Si la humedad relativa del aire aumenta, entonces aumenta la humedad de la madera e

inversamente, la humedad de la madera disminuye cuando la humedad relativa del aire disminuye.

La humedad relativa del aire y consecuentemente la humedad de la madera, están fuertemente influenciadas por la temperatura. El aire caliente necesita una cantidad mayor de agua para llegar al límite de saturación que el aire frío y por lo tanto puede absorber mayor cantidad de agua liberada por la madera. [1]

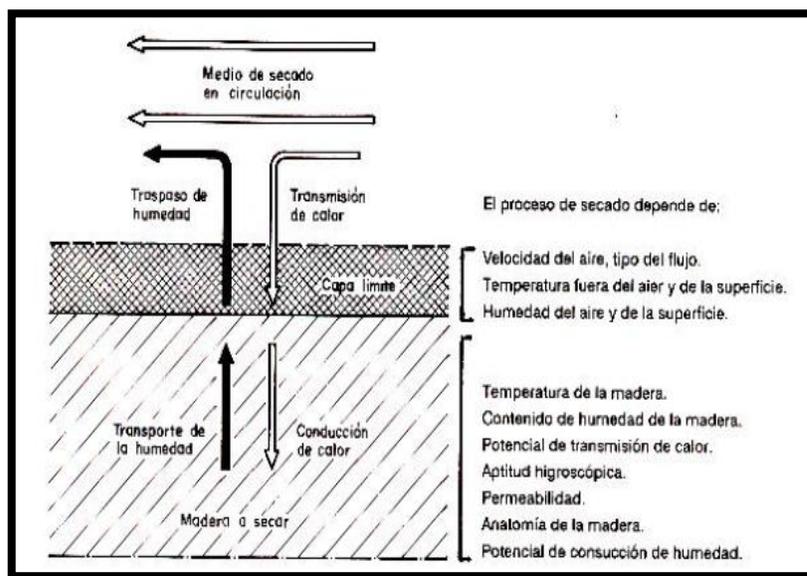


Figura # 10 Acción de la temperatura en el secado de madera
Fuente: Alcoba, 2001

1.15.2. Velocidad del aire

La circulación del aire es otro de los elementos que actúa sobre la velocidad de evaporación del agua durante el proceso de secado de la madera. La circulación de aire fresco a través de una pila de madera y la expulsión de la humedad son condiciones necesarias para asegurar la remoción del exceso de humedad dentro de un secadero y así mantener las condiciones de humedad relativa deseadas.

La velocidad del aire dentro de una pila tiene como funciones principales, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y transportar la humedad saliente de la madera.

\

La capa límite que siempre existe entre la madera y el aire juega un papel importante en el secado de la madera. Cuanto menor sea el espesor de esta capa límite, más rápida será la remoción de la humedad de la superficie de la madera. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad del secado. Una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una corriente laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite entre la madera y el aire.

La velocidad del aire desempeña un papel muy importante durante las primeras etapas del secado, sea natural o artificial, sobre todo cuando la madera está muy húmeda ($CH > 30\%$). A mayor velocidad del aire, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye, la tasa de evaporación disminuye y se aumenta el tiempo de secado. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación del aire fuerte y regular.

Experimentalmente se ha demostrado que se obtienen condiciones óptimas de secado en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula en una pila a una velocidad relativamente alta. Actualmente se trabaja con velocidades de aire a través de la estiba de alrededor de 5m/seg para maderas de secado rápido. Para maderas de mayor densidad y secado lento se recomiendan velocidades de 2m/seg. Si se utilizan velocidades mayores sin un debido control puede comprometerse la calidad de la madera por cuanto se acelera considerablemente la tasa de evaporación del agua, generándose un gradiente de humedad muy alto entre la superficie de la madera y su parte interna.

Podemos decir que las ventajas de velocidades altas del aire dentro de un secadero disminuyen considerablemente cuanto mayor sea el espesor de las piezas de madera, cuanto menor sea el contenido de humedad inicial , cuanto menor sea la temperatura inicial y cuanto mayor sea la densidad de la madera. [1]

1.15.3. Contenido de humedad de equilibrio

La madera es un material higroscópico que reacciona siguiendo las leyes que rigen para los cuerpos porosos. Cuando una pieza de madera se deja suficiente tiempo en un ambiente cuyas características de temperatura y humedad relativa permanecen constantes, se establece un equilibrio entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la que existe en el interior de la pieza de madera. Cuando este equilibrio es alcanzado, la humedad de la madera no varía más y se dice que ha llegado al contenido de humedad de equilibrio o humedad límite. Este contenido de humedad permanecerá constante mientras las características del aire que rodean a la madera no cambien.

Es importante anotar que este equilibrio no se alcanza instantáneamente y el tiempo empleado depende de varios factores, tales como la densidad de la madera, el espesor, la cantidad y calidad de sustancias extractivas presentes, la humedad inicial, etc. [1]

1.15.4. Leyes del proceso de secado de la madera

Las leyes que regulan el proceso de secado de la madera son de naturaleza diferente, dependiendo de si el contenido de humedad está por encima o por debajo del punto de saturación de las fibras.

Por encima de este punto, la velocidad de secado, bajo condiciones estables de temperatura y humedad relativa del aire, permanece constante y el movimiento del agua libre líquida es causado por fuerzas capilares. Durante la evaporación del agua

libre no se producen tensiones dentro de la madera y solamente se modifica la distribución del contenido de humedad hacia el interior de la pieza.

Cuando el secado ya ha avanzado a contenidos de humedad por debajo del punto de saturación, la permeabilidad de la estructura de la madera entra a jugar un papel importante en el proceso de remoción del agua. La gráfica de velocidad de secado cambia de una línea recta a una curva exponencial decreciente, presentándose una zona de transición. En este rango, el agua retenida en la madera por fuerzas de naturaleza molecular se mueve por difusión a través de las paredes celulares, debido al gradiente de humedad que se crea entre las paredes de las células vecinas.

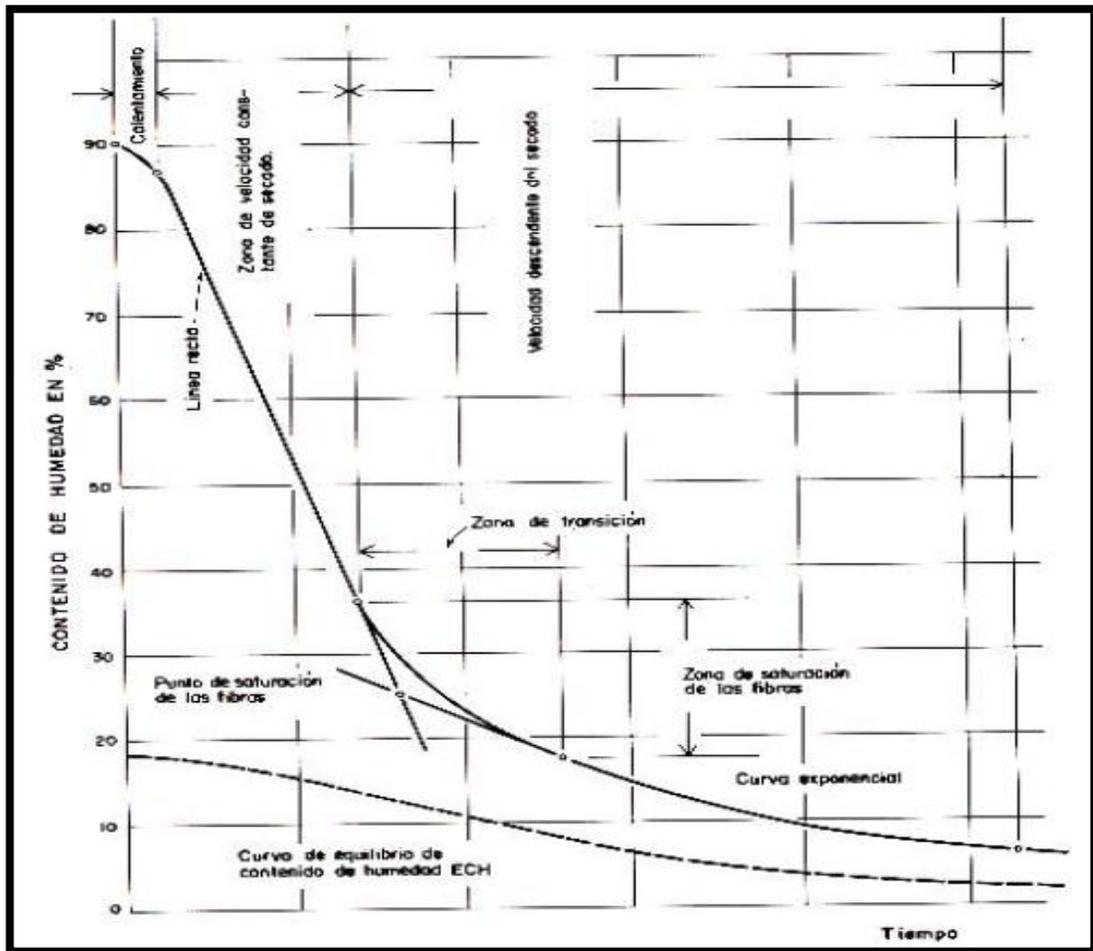


Figura # 11 Curva teórica del secado de madera
Fuente: Alcoba, 2001

Finalmente, la curva como lo indica la figura # 11 tiende hacia un valor límite que no es otro que la humedad de equilibrio de la madera correspondiente a las condiciones climáticas establecidas. [1]

1.16. MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL SECADO DE MADERA

Los modelos matemáticos son analogías de una realidad física, son creados con el propósito de aproximarse a la realidad de la mejor manera. Un modelo matemático describe las propiedades y características de un sistema real en términos de variables matemáticas y operadores, y puede ser validado con datos experimentales. [24]

Los modelos matemáticos son usados en productos, diseño de equipos e investigación, alguna de las ventajas del uso de modelos son: La reducción del número de experimentos, de esta manera se reduce tiempo y gastos; también proporcionan una mayor comprensión del proceso; optimiza el proceso; y tiene capacidad de predicción; además facilita los procesos de automatización y capacidad de control. [19]

1.16.1. Modelos empíricos

Los modelos empíricos son correlaciones que se obtienen de datos experimentales que después son validados. Estos modelos se aplican a procesos específicos, dependen de la disponibilidad de datos representativos para la construcción del modelo y la validación. Con excepción de la causa y efecto entre las variables, no se requiere conocimiento del proceso y se puede adoptar la técnica ensayo y error.

Debido a que este tipo de métodos se ajustan a determinados procesos con diferentes condiciones, en la mayoría de los casos es importante tener un contacto real con el proceso, ya que se requiere de datos experimentales, también es substancial el desarrollo de estructuras matemáticas que tengan una buena correlación entre las

variables, por ejemplo: polinomiales; series contra el tiempo; circuitos neurales artificiales. [12]

1.16.1.1. Modelado del secado-Método de la curva característica de secado

El método de la curva característica es utilizado para estandarizar las cinéticas de secado, además de modelarlas, de manera que puedan ser utilizadas a diferentes condiciones de humedad relativa, velocidad del aire y temperatura. Este método se basa en la identificación de fases, ubicadas en la rapidez de secado.

El cálculo del contenido de humedad reducido (CH_r), donde CH es el valor del contenido de humedad a tiempo t , CH_{cr} el contenido de humedad crítico, comúnmente el máximo durante toda la cinética, en la mayoría de experimentos es el contenido de humedad inicial (CH_i), y CH_e es el contenido de humedad de equilibrio a la temperatura y humedad relativa de cada experimento.

$$CH_r = \frac{CH - CH_e}{CH_{cr} - CH_e}$$

El cálculo de la velocidad de secado para cada uno de los valores de la cinética, se deduce a través de la derivada de la ecuación polinómica de orden 9, del contenido de humedad en función del tiempo de secado. Cada valor de velocidad se divide entre la velocidad máxima de toda la cinética (V_{ref}), para obtener la velocidad de secado reducida identificada como V_r . [4]

$$V_r = \frac{V}{V_{ref}} = \left(-\frac{dCH}{dt} \right)_r = f(CH_r)$$

1.16.2. Modelos difusivos

Los modelos difusivos para el secado son ecuaciones que están basadas en la ley de Fick, en los que se asume que el transporte de humedad en la madera se rige por diferencias de concentración de humedad y la transferencia de calor en la madera puede suponerse como conducción. [27]

En comparación con los modelos fenomenológicos es más fácil formular un modelo conceptual de tipo difusivo que describa el transporte de humedad. El requisito básico es que se respete el principio de conservación de masa, considerando el caso de una dimensión se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x}$$

Donde el segundo término es el flujo de masa neto que sale de un infinitesimal elemento y C es la masa de agua por unidad de volumen de poro del material.

Después se necesita una expresión para el flujo en relación con el contenido de humedad C. Como primera aproximación esta es proporcional a un gradiente de contenido de humedad con un factor de proporcionalidad D.

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Reemplazando en la ecuación clásica de difusión

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Los modelos difusivos son burdos y no profundizan en la física del problema, sin embargo son ampliamente utilizados dado que solo un parámetro del material es requerido. Aunque solo funcionen en condiciones isotérmicas. [10]

1.16.3. Modelos fenomenológicos

Un modelo fenomenológico obedece a las leyes fundamentales de la física, los modelos actuales de secado de madera consisten en un estudio teórico de transferencia de calor y masa. [28]

Se han desarrollado diferentes tipos de modelos fenomenológicos para el secado de madera, la primera diferencia entre estos modelos radica en el número de variables de estado que pueden ser utilizadas para describir un proceso, existen modelos de una variable que utilizan el contenido de humedad o algún equivalente, como potencial de agua o saturación para describir el proceso, modelos de dos variables que utilizan el contenido de humedad y temperatura y modelos que utilizan las anteriores más la presión del gas, o sus equivalentes. [18]

La segunda diferencia fundamental en los modelos de secado se encuentra en el número de dimensiones espaciales utilizadas para describir el proceso, existen modelos unidimensionales, de dos dimensiones y tres dimensiones [20].

En los modelos fenomenológicos también se emplean diferentes escalas macroscópicas que se pueden emplear para este tipo de modelos de secado son:

- Escala macro poro que se lleva a cabo en un volumen promedio $V\alpha$
- Escala de Darcy que se lleva en un promedio de volumen V
- Escala heterogénea local que se lleva a cabo en un promedio de volumen $V\infty$

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

La metodología para el proyecto de investigación se fundamentó en ensayos de laboratorio al secar muestras de madera de pino y eucalipto, con ello se estableció parámetros idóneos de temperatura, humedad y tiempo para modelar el radio de secado.

2.1. TIPO DE ESTUDIO

➤ Experimental

La determinación de un radio de secado de especies madereras como el pino y el eucalipto es un tema de investigación mínimamente explorado en nuestro país, por ello es relevante nuestro objeto de estudio considerando que el Ecuador tiene una alta potencialidad en la industria maderera.

La investigación involucra el bosquejo de estudios relacionados al determinar una función de radio de secado que describa la eficiencia en el pino y el eucalipto, con esto identificar las condiciones y niveles de secado necesarios para estas maderas.

➤ Bibliográfico

Con la recopilación de información de artículos científicos, libros y páginas web se fundamentará el conocimiento para establecer el radio de secado del pino y el eucalipto.

2.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

Las industrias madereras consideran el secado como una operación de vital importancia para la transformación, manufactura y acabado de sus productos.

En la investigación se efectuó una entrevista a las 2 empresas madereras más representativas de la ciudad y provincia “PISMADE S.A.” del grupo Haro Maderas y la “Industria Maderera Buenaño” para conocer el tipo de secador empleado, temperatura y tiempo de secado, porcentaje de humedad final en el material, así como las especies madereras a secarse.

La industria “PISMADE S.A.” ubicada en la Avenida Bolívar Bonilla y Pasaje Manila es una empresa con una experiencia de 25 años en los procesos madereros de la ciudad y provincia que está encabezada por su creador y gerente propietario el Lcdo. Crisólogo Haro. Esta reconocida empresa dispone de un secador artificial de 2 cámaras de 120m^3 de capacidad con un método de secado de bulbo seco y bulbo húmedo, las especies madereras mayormente sometidas al secado son el pino y eucalipto a temperaturas que oscilan desde los 55°C hasta los 70°C su tiempo de secado en pino es de 4 a 5 días y en el eucalipto de 8 días aproximadamente dependiendo del acabado final al cual se le dará a la madera.

El porcentaje de humedad que consigue el secado en las maderas está comprendido entre el 10% al 18% independientemente del espesor de la madera secada.

Por otra parte la industria maderera “Buenaño” ubicada en la Panamericana Norte Km 5 vía a San Andrés es una empresa líder en el procesamiento de maderas de la ciudad y provincia la cual es acertadamente dirigida por el Ing. Patricio Buenaño. “Industria Maderera Buenaño” cuenta con un secador artificial tipo cámara de capacidad de 100m^3 , el método que utiliza este secador es de aire seco por recirculación. Las especies madereras preferentes sometidas al secado son el pino y

eucalipto a temperaturas que oscilan desde los 55 °C hasta los 70 °C su tiempo de secado aproximadamente en pino es de 3 a 5 días y en el eucalipto de 6 a 8 días.

El porcentaje de humedad que consigue el secado en las maderas está comprendido entre el 12% al 18%.

Para ambos casos de las industrias previamente mencionadas la ubicación dentro de las cámaras de secado fue de apilado con una separación entre madera y madera de 2cm a 5cm. Dentro de las cámaras de secado se pueden ubicar maderas del tipo tablas, tabloncillos y tacos regidas por sus respectivas dimensiones.

La medición del contenido de humedad se lo realiza mediante un higrómetro y se sigue parámetros de secado como los que reglamenta el Programa de Secado CTBA Europeo (ver Anexo # 4).

El aprovisionamiento de la materia prima de la investigación fue obtenido por parte de la industria maderera “PISMADE S.A.” empresa la cual resultó ideal por sus facilidades de transporte y disponibilidad continua del material. Se realizó el secado de 4 muestras elegidas al azar de pino y eucalipto con procedencia de los bosques de la provincia cada una con 4 réplicas.

Las dimensiones de las maderas de pino y eucalipto estuvieron regidas acorde a los parámetros obtenidos en las entrevistas y al tipo de secador empleado.

2.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

En el Cuadro # 7 presentado a continuación se detalla la relación de la variable independiente con las variables dependientes para la determinación del radio de secado en pino y eucalipto.

VARIABLE	CONCEPTO	INDICADOR	DIMENSIÓN	TÉCNICA E INSTRUMENTOS
Independiente Radio de secado de pino y eucalipto	Es el tiempo de secado óptimo que determina condiciones y niveles necesarios en el proceso de secado de las maderas.	Temperatura Tiempo Peso Curvas de secado	° C Horas Gramos Modelización estadística	Regulador de temperatura (termómetro) Control periódico de tiempo (reloj). Control de pesos (balanza analítica) Hoja de cálculo Microsoft Excel
Dependiente Variación de la humedad en función del tiempo, la temperatura y el peso muestra del pino y eucalipto.	Se determina mediante el aumento o la disminución de la humedad de la materia prima al ser expuesto al proceso de secado tomando en cuenta la temperatura, el tiempo y el peso de muestreo.	Humedad inicial y final	% humedad	Gravimetría (Cálculos matemáticos)

Cuadro # 7 Operacionalización de las variables
Elaborado por: Bonifaz Nieto Josué David, 2015

2.4. PROCEDIMIENTOS

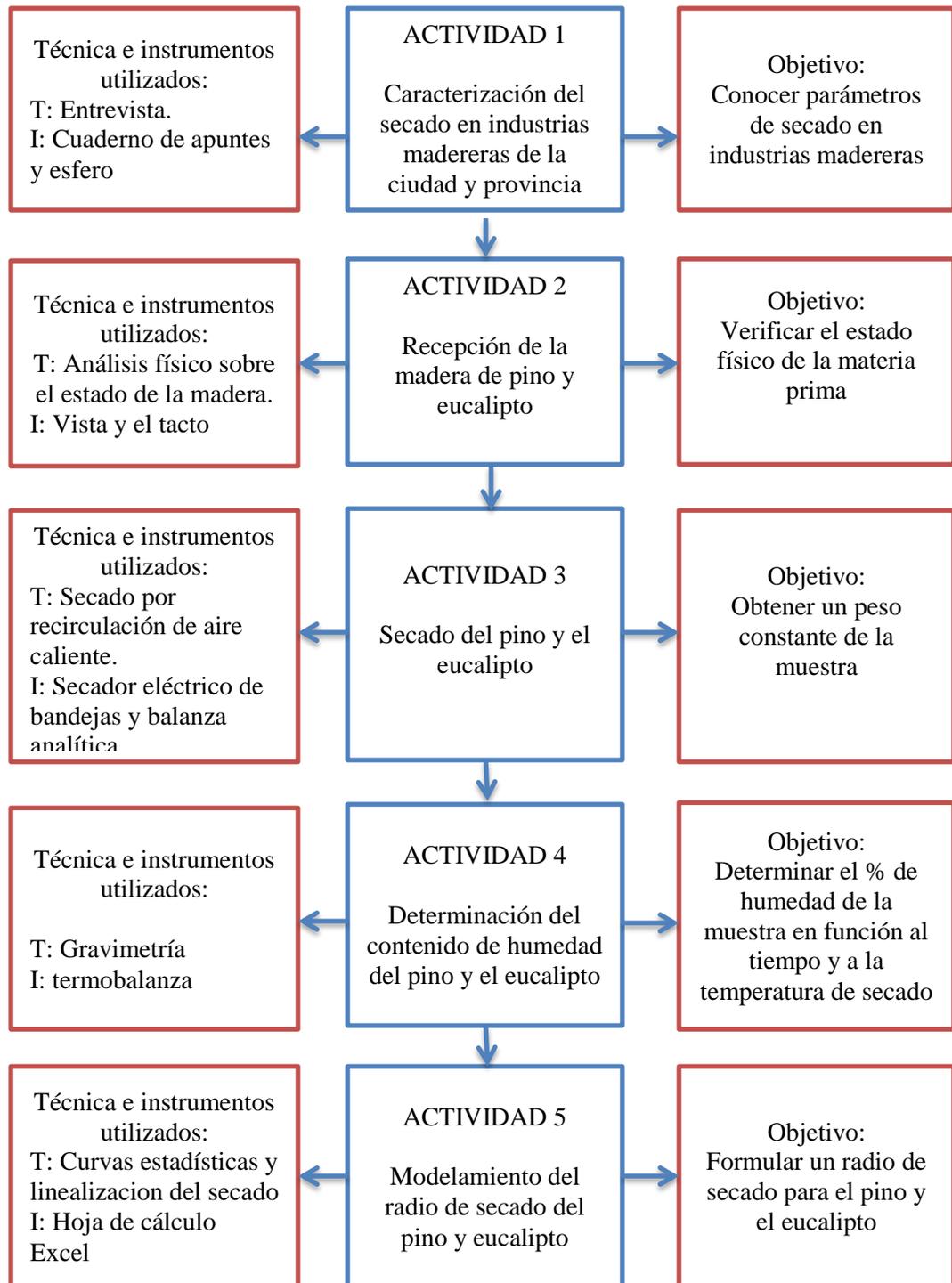


Figura # 12 Procedimientos del radio de secado de pino y eucalipto
Elaborado por: Bonifaz Nieto Josué David, 2015

2.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

2.5.1. Secado del pino y el eucalipto

En la investigación el secado de pino y eucalipto se lo realizó cumpliendo las actividades detalladas a continuación:

2.5.1.1. Caracterización del secado en industrias madereras locales

Como antesala de la investigación se efectuó una entrevista a los propietarios de las 2 industrias madereras más prominentes de la ciudad y provincia “PISMADE S.A.” del grupo Haro Maderas e “Industria Maderera Buenaño” para definir parámetros en lo concerniente a:

- Tipo de secador empleado
- Temperatura y tiempo de secado
- Porcentaje de humedad final en el material
- Especies madereras

Los parámetros obtenidos fueron de mucha utilidad para regir las condiciones y los niveles a los cuales se sometieron las maderas de pino y eucalipto al secado.

2.5.1.2. Recepción de la madera de pino y eucalipto

La madera de pino y eucalipto utilizado fue procedente de los bosques de la provincia de Chimborazo por medio del aserradero “PISMADE S.A.”, industria la cual brinda todas las facilidades para recibir una materia prima fresca, sin defectos y apta para realizar un idóneo secado.



Figura # 13 Adquisición de materia prima
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

2.5.1.2.1. Selección y preparación de muestras

En el aserradero se seleccionaron tablas al azar de pino y eucalipto, las cuales se cortaron en dimensiones de 10 cm de largo, 10 cm de ancho con un espesor de 2,50 cm. Las dimensiones de las tablas están sujetas a los parámetros establecidos por las industrias madereras de la localidad previamente consultadas así como a las dimensiones del soporte del túnel y a las 4 bandejas del secador eléctrico. El número total por secado fue de 16 muestras, para el momento del traslado del aserradero al laboratorio se roció las muestras con agua y se impermeabilizó con un plástico film para evitar la pérdida de humedad.

En las figuras siguientes se observa los procesos a los cuales se sometió la madera previa al secado:



Figura # 14 Selección de madera de pino y eucalipto
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 15 Descortezado y serrado principal
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 16 Canteado y retestado
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 17 Clasificado
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 18 Medición y cortado de muestras
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 19 Disposición de las muestras de pino y eucalipto
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

2.5.1.3. Secado del pino y el eucalipto

Las muestras de pino y eucalipto fueron colocadas en el interior del secador a temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C cada experimento por especie y con 4 réplicas.

Para el secado del pino el peso inicial de la muestra fue de aproximadamente 500 gramos por bandeja y en el eucalipto el peso inicial fue de aproximadamente 900 gramos, en este último en comparación con la muestra del pino su peso es mayor debido a la naturaleza de la especie y a sus características físicas propias.

Los datos del proceso de secado se registraron cada 1 hora, puesto que experimentos previos establecieron una mayor rapidez de secado y disminución en el contenido de humedad en las primeras horas del proceso. Este tiempo para la toma de datos es el que mejor se ajusta a las características del material.

Para la obtención de datos de secado más precisos fue necesario colocar las muestras por cada intervalo de tiempo en el desecador para evitar un incremento en el contenido de humedad. El tiempo que las muestras deben permanecer en el desecador es de 10 a 15 minutos.

El pesaje se lo realizó mediante la utilización de una balanza analítica



Figura # 20 Secador eléctrico de bandejas
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 21 Secado de pino
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 22 Secado de eucalipto
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

2.5.1.4. Determinación del contenido de humedad en la madera

2.5.1.4.1. Método gravimétrico

Para la determinación del contenido de humedad de las muestras se utilizó el método gravimétrico, este método consiste en introducir las muestras en un secador a una temperatura y tiempo determinado hasta obtener un peso constante.



Figura # 23 Pesaje de muestras de pino y eucalipto
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 24 Muestras de pino y eucalipto en desecador
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

En la determinación del % de humedad se realizó cálculos de pérdida de humedad y % de masa seca, acorde a los pesos resultantes del secado del pino y eucalipto.

2.5.1.4.2. Método termobalanza

En la determinación del contenido de humedad de la madera de pino y eucalipto se efectuó un método de termobalanza el cual consiste en un equipo con una balanza electrónica y un módulo calefactor, la balanza se encarga de medir el peso de la muestra orgánica mientras se le aplica calor para evaporar el agua que contiene.

La termobalanza determina la humedad comprendida en un rango entre el 0 al 100% y con alcances de temperaturas de 50 °C a 140 °C.



Figura # 25 Termobalanza
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 26 Pesaje de muestra en termobalanza
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

2.5.1.4.3. Método estufa

La determinación del contenido de humedad en maderas por el método de estufa consiste en someter las muestras a varios calentamientos a una temperatura de 105 ° C y desecarla.

El método obtiene un peso constante seco y aproxima lo más posible a una masa real de la muestra.



Figura # 27 Pesado de muestra en crisol
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 28 Secado de crisol en estufa
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

2.5.1.5. Modelamiento del radio de secado del pino y eucalipto

Después del secado experimental de las muestras del pino y eucalipto se realizan un modelamiento del radio de secado.

El modelamiento matemático se lo realizó efectuando un promedio de pesos de las muestras secas de las 4 repeticiones para las temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C.

Una vez obtenido el peso promedio de secado se determinó la masa relativa y el antilogaritmo de la masa relativa, operaciones matemáticas que resultaron de aplicar las siguientes fórmulas:

$$\text{Masa Relativa MR} = \frac{\text{Peso final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}}$$

$$\ln \text{MR} = \ln * \text{MR}$$

Con los valores resultantes de mr y ln mr se realizaron curvas de secado en función al tiempo para cada temperatura de secado.

Finalmente se determinó las constantes de regresión lineal A y B del modelo de la curva característica de secado (CCS). A es la constante que establece el decremento de la difusividad térmica y B es la constante que establece la cinética del secado en maderas.

A y B son la representación numérica del segundo y primer factor respectivamente de la ecuación de la curva de secado.

El radio se determina con la siguiente fórmula:

$$\text{Radio de secado} = \frac{(\ln(MR) - A)}{B}$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en la determinación del radio de secado de pino y eucalipto para lograr la eficiencia del producto final en la provincia de Chimborazo.

Los resultados de los experimentos de secado de pino y eucalipto se presentan a continuación:

3.1. MADERA DEL PINO

La madera de pino sometida al secado determinará un radio de secado que se ajuste a parámetros de humedad, temperatura y tiempo necesarios para esta especie de madera y que se encuentren acorde a los niveles u condiciones explicadas en la investigación.

3.1.1. Pesos promedio de secado del pino

En los siguientes cuadros se indica los pesos promedio del secado en pino por 4 repeticiones a temperaturas de 60 ° C, 70 ° C y 80 ° C.

Pino a 60																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Repeticion 1	502,00	455,50	410,00	372,40	355,80	329,30	310,60	293,70	272,50	256,20	243,05	225,50	210,60	191,60	174,50	153,70	145,30	144,80	144,50	144,50
Repeticion 2	506,20	459,70	414,20	377,60	359,10	333,60	314,80	296,90	275,70	259,40	247,00	228,70	215,80	195,60	178,70	157,10	148,50	147,00	146,90	146,90
Repeticion 3	506,40	458,20	415,80	378,80	360,30	337,80	318,00	299,10	278,70	262,60	250,50	232,90	219,20	198,80	182,90	160,80	152,30	149,90	149,40	149,40
Repeticion 4	508,80	463,80	425,40	386,50	365,40	342,40	323,20	304,40	282,60	267,50	255,60	238,10	224,70	204,60	188,50	166,60	158,20	153,50	153,00	153,00
Sumatoria	2023	1837	1665	1515	1441	1343	1267	1194	1110	1046	996	925	870	791	725	638	604	595	594	594
PROMEDIO	505,85	459,30	416,35	378,83	360,15	335,78	316,65	298,53	277,38	261,43	249,04	231,30	217,58	197,65	181,15	159,55	151,08	148,80	148,45	148,45

Cuadro # 8 Pesos promedio de pino a 60 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pino a 70																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Repetición 1	508,40	457,20	412,00	374,40	345,00	319,20	308,40	290,50	263,05	241,10	227,60	209,20	190,40	178,70	158,20	142,90	142,20	142,15	142,15
Repetición 2	505,40	455,20	409,80	370,50	342,70	313,00	305,80	287,10	261,40	238,00	224,30	206,80	187,20	175,20	155,70	139,60	139,20	139,10	139,10
Repetición 3	509,40	462,40	431,60	406,10	373,20	337,00	325,40	305,60	275,40	258,70	243,10	230,20	211,70	195,40	180,20	162,15	161,60	161,55	161,55
Repetición 4	503,20	459,30	423,00	404,70	367,20	342,50	329,40	309,20	283,60	271,00	254,80	242,20	223,10	208,40	190,00	173,60	172,90	172,80	172,80
Sumatoria	2026	1834	1676	1556	1428	1312	1269	1192	1083	1009	950	888	812	758	684	618	616	616	616
PROMEDIO	506,60	458,53	419,10	388,93	357,03	327,93	317,25	298,10	270,86	252,20	237,45	222,10	203,10	189,43	171,03	154,56	153,98	153,90	153,90

Cuadro # 9 Pesos promedio de pino a 70 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pino a 80																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Repetición 1	505,80	455,20	395,00	367,80	318,80	256,40	240,80	223,60	189,60	173,40	160,80	151,80	139,20	129,40	129,20	129,10	129,10
Repetición 2	507,40	460,10	399,20	369,30	321,40	263,30	242,60	227,05	191,60	177,70	163,25	155,40	142,15	137,50	137,30	137,20	137,20
Repetición 3	503,10	459,10	387,60	367,20	323,00	277,15	253,80	233,60	198,20	180,25	169,40	158,00	147,40	139,10	138,80	138,70	138,70
Repetición 4	506,50	457,60	395,90	361,80	328,30	273,50	258,10	237,40	202,50	188,70	174,30	162,60	149,00	139,90	139,50	139,45	139,45
Sumatoria	2023	1832	1578	1466	1292	1070	995	922	782	720	668	628	578	546	545	544	544
PROMEDIO	505,70	458,00	394,43	366,53	322,88	267,59	248,83	230,41	195,48	180,01	166,94	156,95	144,44	136,48	136,20	136,11	136,11

Cuadro # 10 Pesos promedio de pino a 80 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

3.1.2. Determinación del porcentaje de humedad en pino

El porcentaje de humedad del pino es la relación entre la pérdida de peso del material y el tiempo de secado. El % de humedad en estado fresco de la madera del pino fue de aproximadamente un 67%.

La determinación de % de humedad inicial de la madera se lo realizó por medio de una termobalanza en la cual se introdujo aserrín húmedo, el mismo que fue parte de la materia prima recibida para el desarrollo de la investigación. (Ver Anexo # 3)

Pino a 60																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	505,85	459,30	416,35	378,83	360,15	335,78	316,65	298,53	277,38	261,43	249,04	231,30	217,58	197,65	181,15	159,55	151,08	148,80	148,45	148,45
Pérdida de humedad		39,26	44,10	48,33	50,72	55,82	57,15	59,12	61,22	64,40	68,13	71,49	75,72	78,96	80,58	82,08	84,05	85,83	85,90	85,90
% masa seca	66,40	60,74	55,90	51,67	49,28	44,18	42,85	40,88	38,78	35,60	31,87	28,51	24,28	21,04	19,42	17,92	15,95	14,17	14,10	14,10

Cuadro # 11 Humedad del pino a 60 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

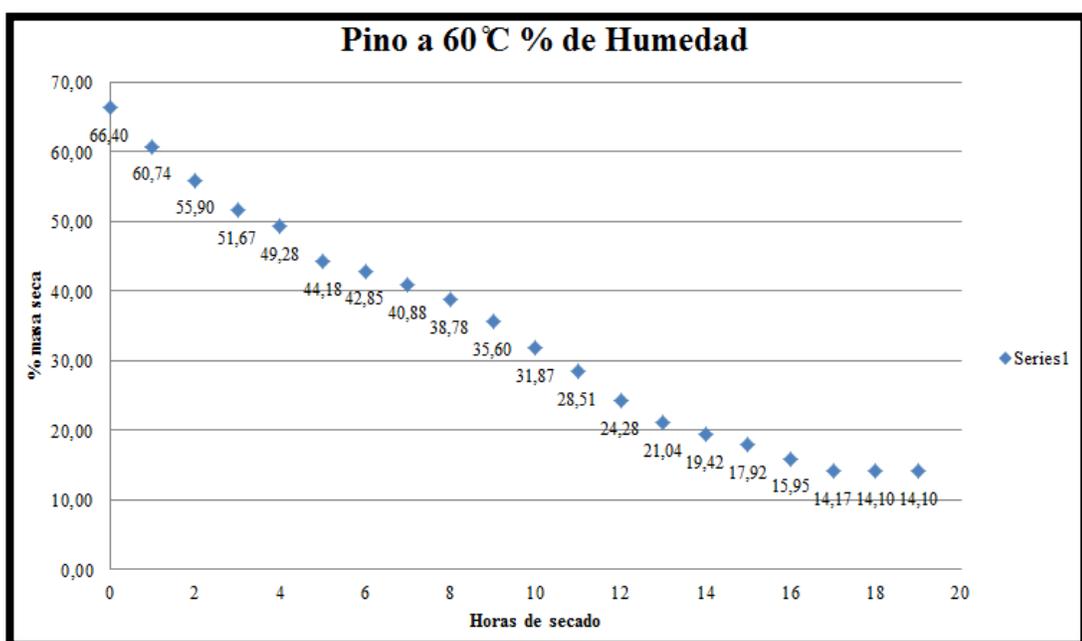


Figura # 29 Humedad del pino a 60 ° C

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pino a 70																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	506,60	458,53	419,10	388,93	357,03	327,93	317,25	298,10	270,86	252,20	237,45	222,10	203,10	189,43	171,03	154,56	153,98	153,90	153,90
Pérdida de humedad		40,07	44,83	48,96	50,81	56,36	58,95	62,14	65,78	67,21	69,34	72,86	78,26	80,18	82,85	84,23	85,05	85,60	85,60
% masa seca	65,10	59,93	55,17	51,04	49,19	43,64	41,05	37,86	34,22	32,79	30,66	27,14	21,74	19,82	17,15	15,77	14,95	14,40	14,40

Cuadro # 12 Humedad del pino a 70 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

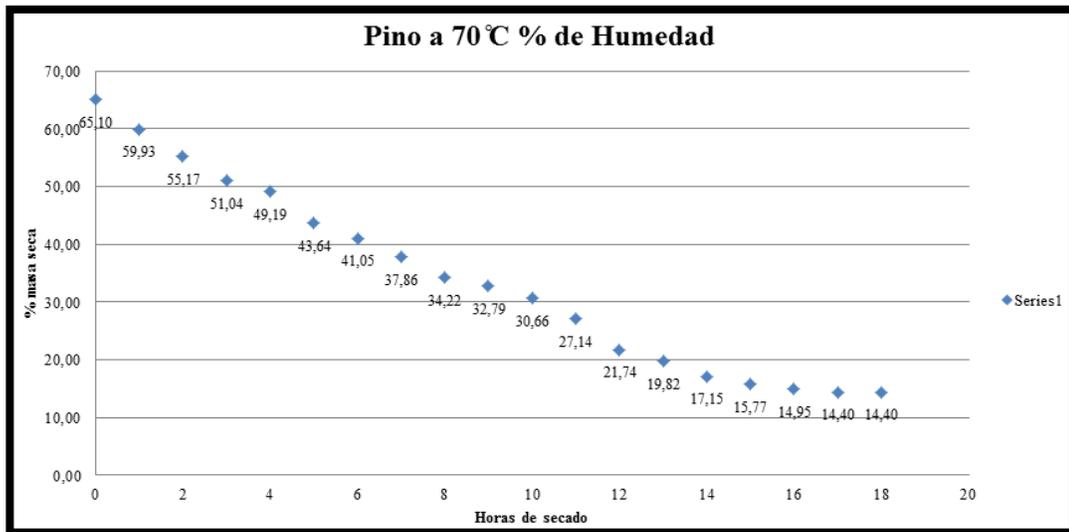


Figura # 30 Humedad del pino a 70 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pino a 80																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	505,70	458,00	394,43	366,53	322,88	267,59	248,83	230,41	195,48	180,01	166,94	156,95	144,44	136,48	136,20	136,11	136,11
Pérdida de humedad		40,00	45,21	49,91	51,81	57,28	59,31	61,97	64,22	68,31	71,79	76,50	80,99	81,80	84,20	84,80	84,80
% masa seca	66,86	60,00	54,79	50,09	48,19	42,72	40,69	38,03	35,78	31,69	28,21	23,50	19,01	18,20	15,80	15,20	15,20

Cuadro # 13 Humedad del pino a 80 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

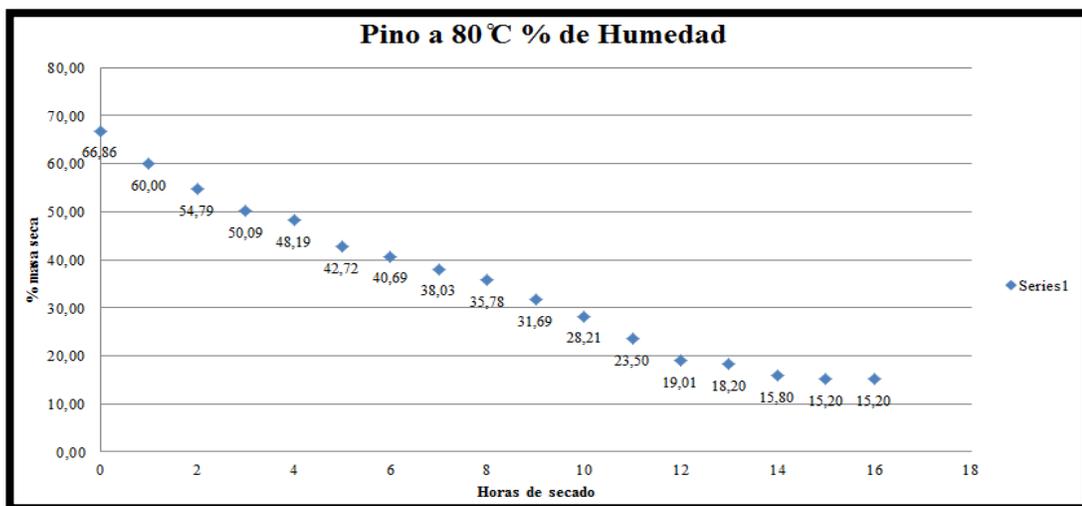


Figura # 31 Humedad del pino a 80 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Para la determinación del % de humedad se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Perdida de Humedad} = \frac{\text{Peso inicial de la muestra} - \text{Peso final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Masa Seca} = 100 - \% \text{ de Perdida de Humedad}$$

3.1.3. Determinación de la masa relativa y el antilogaritmo de la masa relativa en pino

La determinación de la masa relativa (mr) y el antilogaritmo de la masa relativa (ln mr) son operaciones matemáticas que establecen el efecto del secado en la madera para la modelización del radio de secado.

Pino a 60																				
Tiempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso promedio (gramos)	505,85	459,30	416,35	378,83	360,15	335,78	316,65	298,53	277,38	261,43	249,04	231,30	217,58	197,65	181,15	159,55	151,08	148,80	148,45	148,45
Masa relativa	1,00	0,91	0,82	0,75	0,71	0,66	0,63	0,59	0,55	0,52	0,49	0,46	0,43	0,39	0,36	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
Antilogaritmo de la masa relativa	0,00	-0,10	-0,19	-0,29	-0,34	-0,41	-0,47	-0,53	-0,60	-0,66	-0,71	-0,78	-0,84	-0,94	-1,03	-1,15	-1,21	-1,22	-1,23	-1,23

Cuadro # 14 Determinación de mr y ln mr del pino a 60 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pino a 70																			
Tiempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Peso promedio (gramos)	506,60	458,53	419,10	388,93	357,03	327,93	317,25	298,10	270,86	252,20	237,45	222,10	203,10	189,43	171,03	154,56	153,98	153,90	153,90
Masa relativa	1,00	0,91	0,83	0,77	0,70	0,65	0,63	0,59	0,53	0,50	0,47	0,44	0,40	0,37	0,34	0,31	0,30	0,30	0,30
Antilogaritmo de la masa relativa	0,00	-0,10	-0,19	-0,26	-0,35	-0,43	-0,47	-0,53	-0,63	-0,70	-0,76	-0,82	-0,91	-0,98	-1,09	-1,19	-1,19	-1,19	-1,19

Cuadro # 15 Determinación de mr y ln mr del pino a 70 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pino a 80																	
Tiempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Peso promedio (gramos)	505,70	458,00	394,43	366,53	322,88	267,59	248,83	230,41	195,48	180,01	166,94	156,95	144,44	136,48	136,20	136,11	136,11
Masa relativa	1,00	0,91	0,78	0,72	0,64	0,53	0,49	0,46	0,39	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27	0,27	0,27	0,27
Antilogaritmo de la masa relativa	0,00	-0,10	-0,25	-0,32	-0,45	-0,64	-0,71	-0,79	-0,95	-1,03	-1,11	-1,17	-1,25	-1,31	-1,31	-1,31	-1,31

Cuadro # 16 Determinación de mr y ln mr del pino a 80 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Para la determinación de la masa relativa (mr) y el antilogaritmo de la masa relativa (ln mr) se utilizaron las siguientes fórmulas:

Cuando mr es la relación porcentual del peso de la muestra por cada hora del proceso de secado.

$$\text{Masa Relativa MR} = \frac{\text{Peso final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}}$$

$$\ln \text{MR} = \ln * \text{MR}$$

3.1.4. Curvas de secado del pino

3.1.4.1. Curva de secado de la masa relativa en función al tiempo en el pino

Con la determinación de los valores de la masa relativa (mr) del peso promedio en las temperaturas de secado del pino, se efectuaron curvas de secado relacionándolas en función al tiempo.

Para un coeficiente de correlación igual a 1 las curvas de secado se ajustaron a ecuaciones exponenciales como se expone en las siguientes figuras.

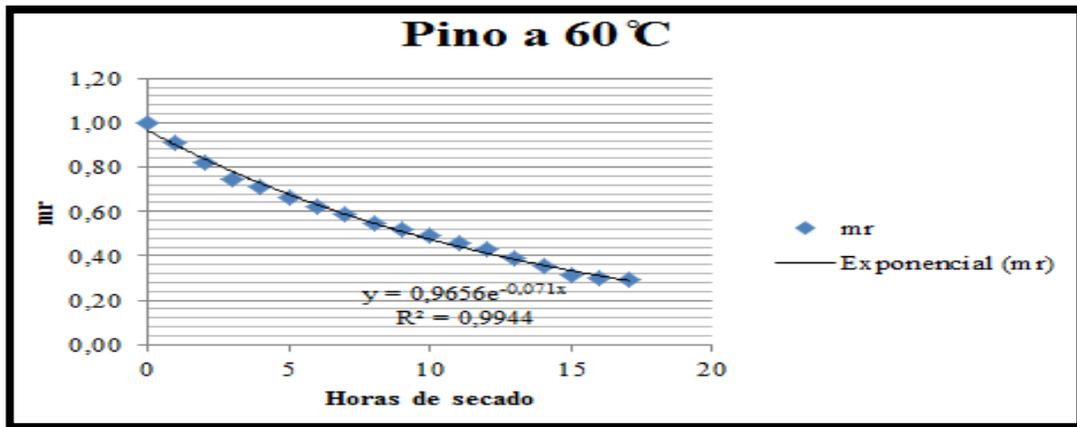


Figura # 32 MR en función al tiempo del pino a 60 ° C
 Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

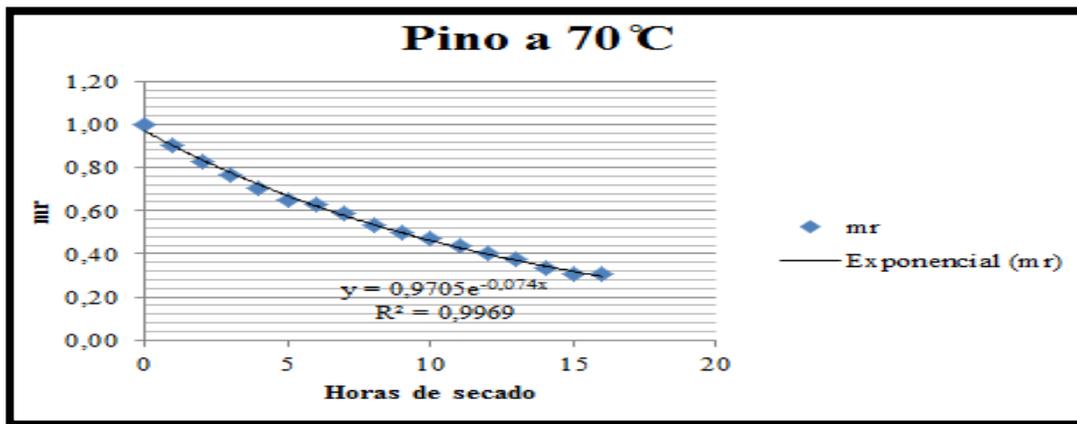


Figura # 33 MR en función al tiempo del pino a 70 ° C
 Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

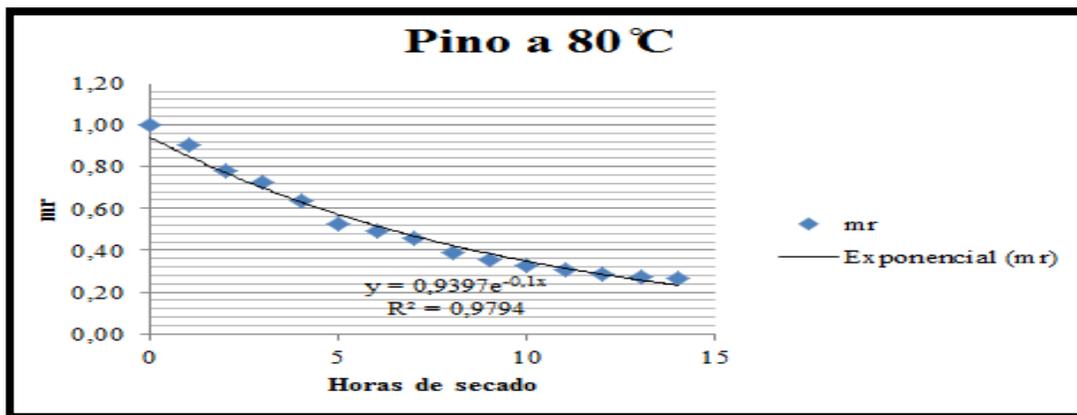


Figura # 34 MR en función al tiempo del pino a 80 ° C
 Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

3.1.4.2. Curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa en función al tiempo en el pino

Con la determinación de los valores del antilogaritmo de la masa relativa ($\ln mr$) del peso promedio en las temperaturas de secado del pino, se efectuaron curvas de secado relacionándolas en función al tiempo.

Para un coeficiente de correlación igual a 1 las curvas de secado se ajustaron a ecuaciones lineales como se expone en las siguientes figuras.

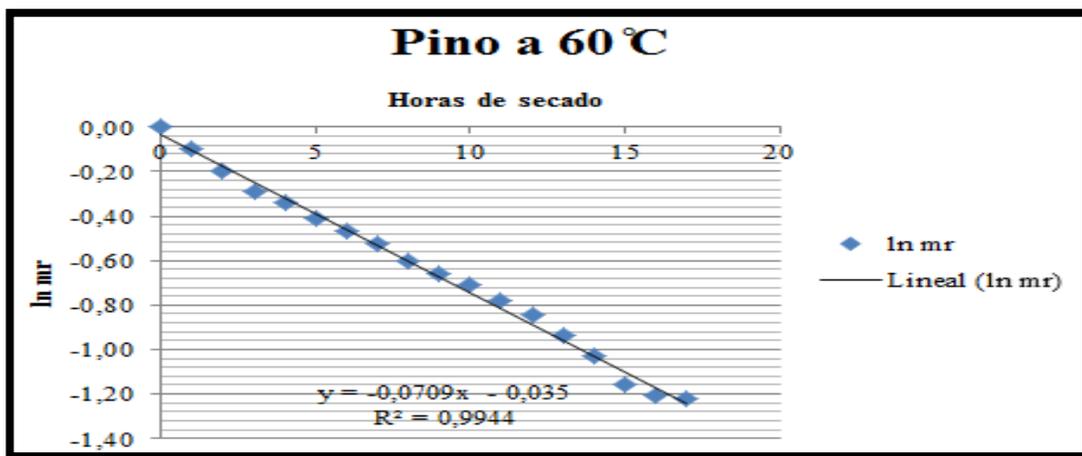


Figura # 35 LN MR en función al tiempo del pino a 60 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

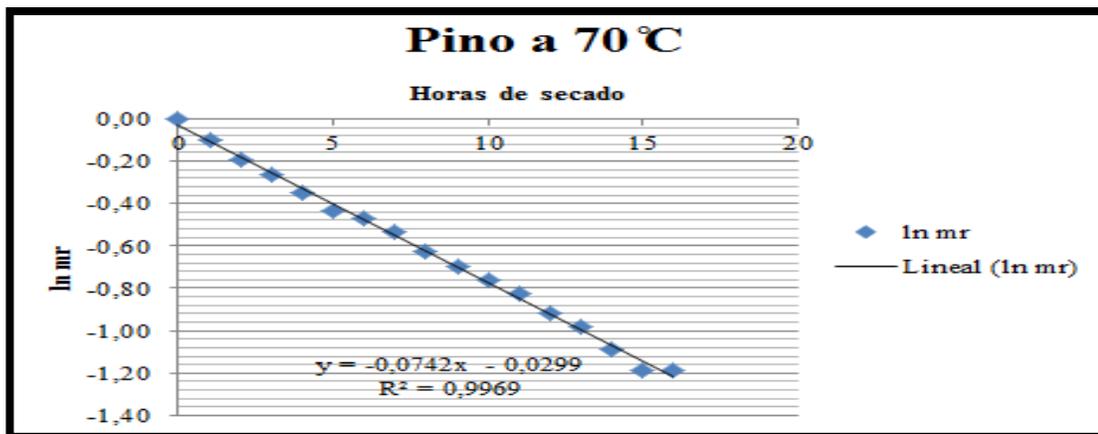


Figura # 36 LN MR en función al tiempo del pino a 70 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

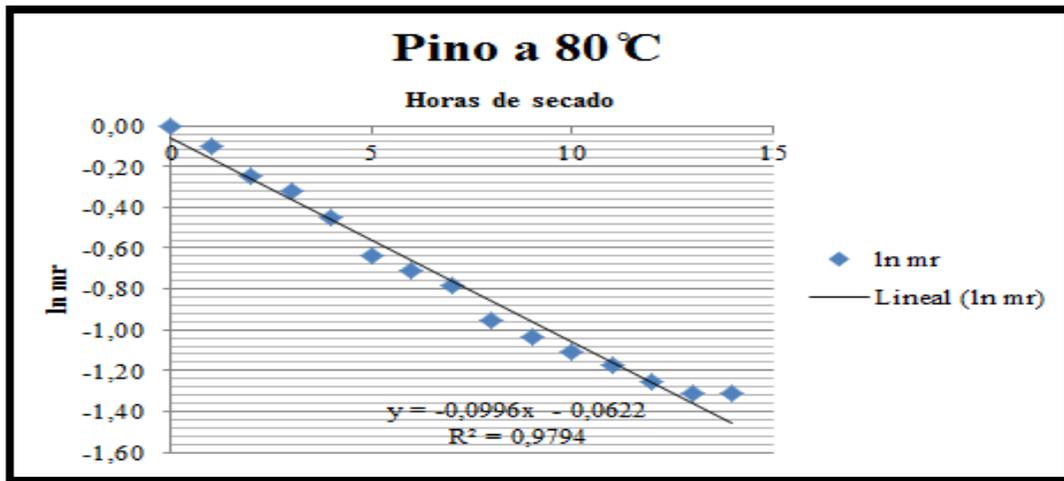


Figura # 37 LN MR en función al tiempo del pino a 80 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

3.1.5. Determinación de las constantes A y B en pino

Una vez obtenido mr y ln mr de todas las temperaturas de secado del pino se debe determinar las constantes A y B del modelo de la curva característica.

3.1.5.1. Determinación de la constante A en pino

La constante “A” en el pino es una unidad matemática de regresión del modelo de la curva característica que se obtiene a partir de las gráficas de secado de ln mr en función al tiempo por cada temperatura (60 ° C, 70 ° C y 80 ° C) en la ecuación de y.

Esta constante determina el decremento de la difusividad térmica con relación a la temperatura a la que está expuesta la madera durante el proceso de secado. Esta difusividad engloba los efectos de todos los fenómenos que pueden intervenir en la migración o pérdida de agua.

Puede entenderse la difusividad como la facilidad con la que el agua es removida del material.

Temperaturas	a
60	-0,035
70	-0,0299
80	-0,0622

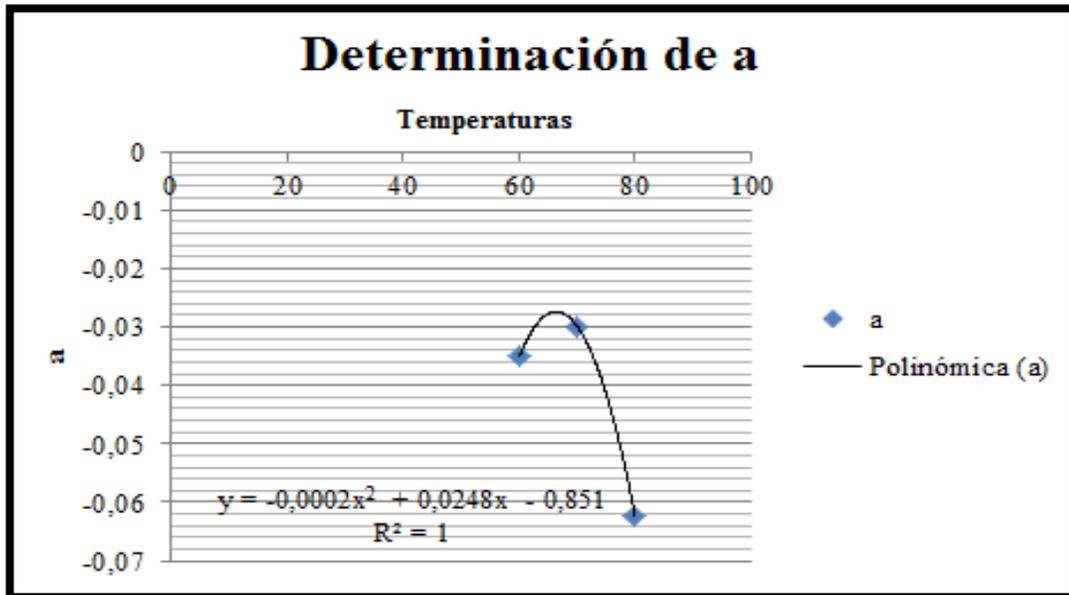


Figura # 38 Determinación de A en pino
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Los valores de A son las representaciones numéricas del segundo factor de la ecuación lineal en la curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa LN MR en función al tiempo para las temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C.

3.1.5.2. Determinación de la constante B en pino

La constante “B” en el pino es una unidad matemática de regresión del modelo de la curva característica que se obtiene a partir de las gráficas de secado de ln mr en función al tiempo por cada temperatura (60 °C, 70 °C y 80 °C) en la ecuación de y.

Esta constante determina la cinética de secado con relación a la temperatura a la que está expuesta la madera durante el proceso de secado. La cinética establece la dependencia de la humedad y de la intensidad del secado con el tiempo o variables relacionadas a este, como las dimensiones del equipo, la velocidad del aire, etc.

La cinética está fuertemente influenciada por la temperatura empleada en el secado.

Temperaturas	b
60	-0,0709
70	-0,0742
80	-0,0996

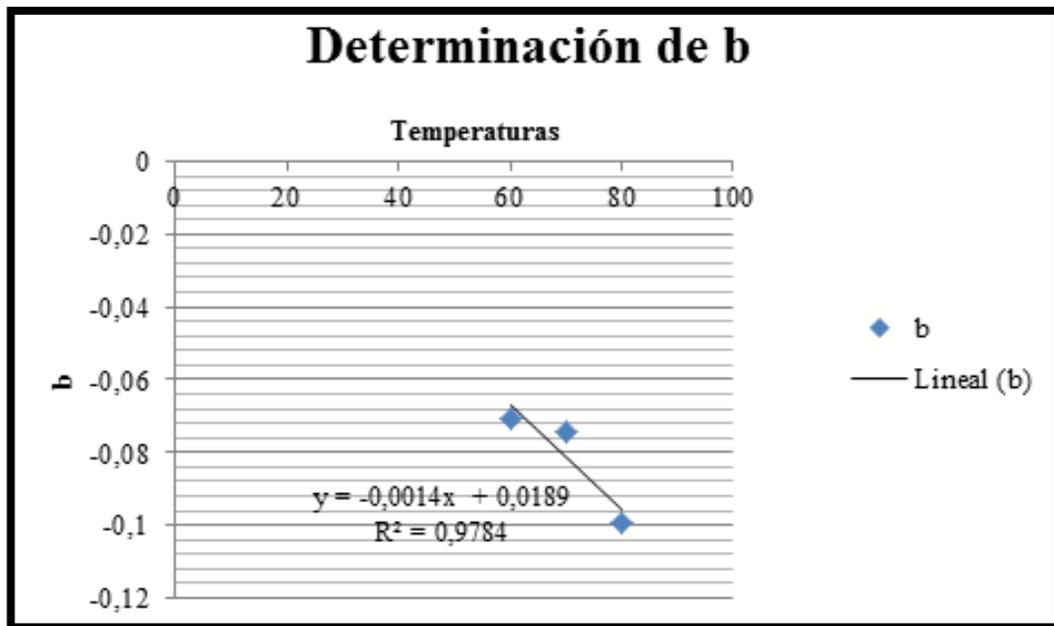


Figura # 39 Determinación de B en pino
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Los valores de B son las representaciones numéricas del primer factor de la ecuación lineal en la curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa LN MR en función al tiempo para las temperaturas de 60 ° C, 70 ° C y 80 ° C.

3.1.6. Radio de secado en pino

El radio de secado es el transcurso del tiempo en el cual la madera fresca se somete a un proceso de secado hasta obtener un peso de muestreo constante. Esto se puede estandarizar a diferentes condiciones de humedad relativa, velocidad del aire, tipo de secador utilizado y temperatura.

El radio de secado utilizó los valores obtenidos de las gráficas de A y B para la determinación del tiempo de secado que necesita el pino para las temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C, además de establecer la cantidad de masa relativa a la que se desea alcanzar, para la investigación el % de masa relativa fue del 15%.

Temperatura	60
% mr	15
A	-0,083
B	-0,0651
Tiempo de secado	20

Cuadro # 17 Radio de secado en pino a 60 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Temperatura	70
% mr	15
A	-0,095
B	-0,0791
Tiempo de secado	19

Cuadro # 18 Radio de secado en pino a 70 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Temperatura	80
% mr	15
A	-0,147
B	-0,0931
Tiempo de secado	17

Cuadro # 19 Radio de secado en pino a 80 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Para la determinación del radio de secado A es el valor de la resolución de la ecuación polinómica $y = -0,0002x^2 + 0,0248x - 0,851$ y B es el valor de la resolución de la ecuación lineal $y = -0,0014x + 0,0184$, para ambos casos x es la temperatura de secado.

Para establecer el tiempo de secado de la madera del pino su resolución se la realizó con la siguiente fórmula:

$$\text{Tiempo de secado} = \frac{(\ln(MR) - A)}{B}$$

3.1.7. Análisis de varianza del pino

Para la medición de significancia estadística de los datos experimentales del pino se realizó un análisis de varianza, el cual fija que con una probabilidad mayor al 0,05 los datos son significativos, mientras que al obtener una probabilidad menor a 0,05 los datos no son significativos. El análisis de varianza maneja un intervalo de confianza del 95 % y un margen de error de 5%.

Los resultados de los análisis de varianza para las temperaturas de secado en el pino fueron los siguientes:

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,32666667	2	0,16333333	0,01207293	0,988015627	4,256494729
Dentro de los grupos	121,76	9	13,52888889			
Total	122,0866667	11				

Cuadro # 20 Análisis de varianza del pino a 60° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,015	2	0,0075	2,91084E-05	0,999970892	4,256494729
Dentro de los grupos	2318,9175	9	257,6575			
Total	2318,9325	11				

Cuadro # 21 Análisis de varianza del pino a 70 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,020416667	2	0,010208333	0,00044983	0,999550293	4,256494729
Dentro de los grupos	204,24375	9	22,69375			
Total	204,2641667	11				

Cuadro # 22 Análisis de varianza del pino a 80 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

3.2. MADERA DE EUCALIPTO

La madera de eucalipto sometida al secado determinará un radio de secado que se ajuste a parámetros de humedad, temperatura y tiempo necesarios para esta especie de madera y que se encuentren acorde a los niveles u condiciones explicadas en la investigación.

3.2.1. Pesos promedio de secado del eucalipto

Para la obtención del radio de secado en eucalipto se obtuvo pesos promedio resultantes por 4 repeticiones a temperaturas de 60 ° C, 70 ° C y 80 ° C

En los siguientes cuadros se indica los pesos promedio del secado.

Eucalipto a 60																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Repetición 1	908,40	860,80	796,80	730,80	684,40	626,80	581,60	554,00	532,40	505,20	490,10	465,80	435,60	407,70	381,20	352,90	325,30	315,70	315,00	314,60	314,10	314,10
Repetición 2	900,40	853,40	788,80	749,00	711,00	640,40	618,60	586,80	539,60	507,00	493,20	445,30	410,50	377,70	355,40	329,40	317,00	314,50	312,60	312,20	312,05	312,05
Repetición 3	907,40	857,80	791,40	735,00	688,60	650,40	627,20	583,00	552,40	514,00	485,30	463,10	431,70	398,20	363,40	332,00	318,40	314,70	313,90	313,50	313,10	313,10
Repetición 4	903,20	854,00	781,00	717,40	671,00	635,20	599,00	542,40	515,20	503,60	479,50	450,20	410,70	395,40	372,30	352,00	333,40	315,20	310,50	310,20	309,50	309,50
Sumatoria	3619	3426	3158	2932	2755	2553	2426	2266	2140	2030	1948	1824	1689	1579	1472	1366	1294	1260	1252	1251	1249	1249
PROMEDIO	904,85	856,50	789,50	733,05	688,75	638,20	606,60	566,55	534,90	507,45	487,03	456,10	422,13	394,75	368,08	341,58	323,53	315,03	313,00	312,63	312,19	312,19

Cuadro # 23 Pesos promedio de eucalipto a 60 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Eucalipto a 70																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Repetición 1	906,50	865,10	803,00	742,60	717,70	630,80	587,40	545,05	533,10	503,60	473,40	452,80	416,30	392,15	364,40	333,40	313,70	312,20	311,90	311,90
Repetición 2	903,00	842,20	792,50	746,10	715,40	635,15	606,30	592,60	555,10	512,90	493,00	456,30	417,10	388,40	362,70	325,50	311,10	308,50	308,20	308,20
Repetición 3	904,20	845,00	789,10	738,20	691,80	630,40	609,00	586,20	554,05	515,20	488,50	466,30	434,90	401,40	366,60	335,70	321,00	319,90	319,50	319,50
Repetición 4	907,60	857,60	784,60	736,00	697,10	638,90	601,60	583,40	545,90	509,30	481,05	453,80	429,50	411,90	372,30	349,30	331,60	328,10	327,80	327,80
Sumatoria	3621	3410	3169	2963	2822	2535	2404	2307	2188	2041	1936	1829	1698	1594	1466	1344	1277	1269	1267	1267
PROMEDIO	905,33	852,48	792,30	740,73	705,50	633,81	601,08	576,81	547,04	510,25	483,99	457,30	424,45	398,46	366,50	335,98	319,35	317,18	316,85	316,85

Cuadro # 24 Pesos promedio de eucalipto a 70 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Eucalipto a 80																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Repetición 1	905,20	852,80	798,10	727,40	675,30	612,50	558,70	529,90	503,70	471,40	444,60	410,20	388,90	353,40	327,00	309,90	309,20	309,20
Repetición 2	902,50	850,80	785,60	724,30	672,90	609,90	555,60	524,60	502,40	474,80	448,50	406,20	381,60	349,00	324,60	306,70	306,30	306,30
Repetición 3	904,60	853,20	789,40	734,60	676,80	614,90	560,40	527,20	505,60	477,20	451,80	409,50	385,80	354,50	328,10	309,00	308,60	308,60
Repetición 4	907,40	856,10	792,40	737,80	679,00	618,05	564,20	530,60	509,50	481,50	454,30	412,30	388,60	357,00	331,80	312,60	312,10	312,10
Sumatoria	3620	3413	3166	2924	2704	2455	2239	2112	2021	1905	1799	1638	1545	1414	1312	1238	1236	1236
PROMEDIO	904,93	853,23	791,38	731,03	676	613,84	559,73	528,08	505,3	476,23	449,8	409,55	386,23	353,48	327,88	309,55	309,05	309,05

Cuadro # 25 Pesos promedio de eucalipto a 80 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

3.2.2. Determinación del porcentaje de humedad en eucalipto

El porcentaje de humedad de eucalipto es la relación entre la pérdida de peso del material y el tiempo de secado. El % de humedad en estado fresco de la madera de eucalipto fue de aproximadamente un 75%.

La determinación de % de humedad inicial de la madera se lo realizó por medio de una termobalanza en la cual se introdujo aserrín húmedo, el mismo que fue parte de la materia prima recibida para el desarrollo de la investigación. (Ver Anexo # 3)

Eucalipto a 60																						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	904,85	856,50	789,50	733,05	688,75	638,20	606,60	566,55	534,90	507,45	487,03	456,10	422,13	394,75	368,08	341,58	323,53	315,03	313,00	312,63	312,19	312,19
Perdida de humedad		29,2	32,29	35,65	39,55	42,28	44,66	46,97	51,00	55,98	59,01	61,39	66,05	68,72	72,04	77,15	80,15	82,19	84,25	84,32	84,42	84,42
% masa seca	74,45	70,80	67,71	64,35	60,45	57,72	55,34	53,03	49,00	44,02	40,99	38,61	33,95	31,28	27,96	22,85	19,85	17,81	15,75	15,68	15,58	15,58

Cuadro # 26 Humedad del eucalipto a 60 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

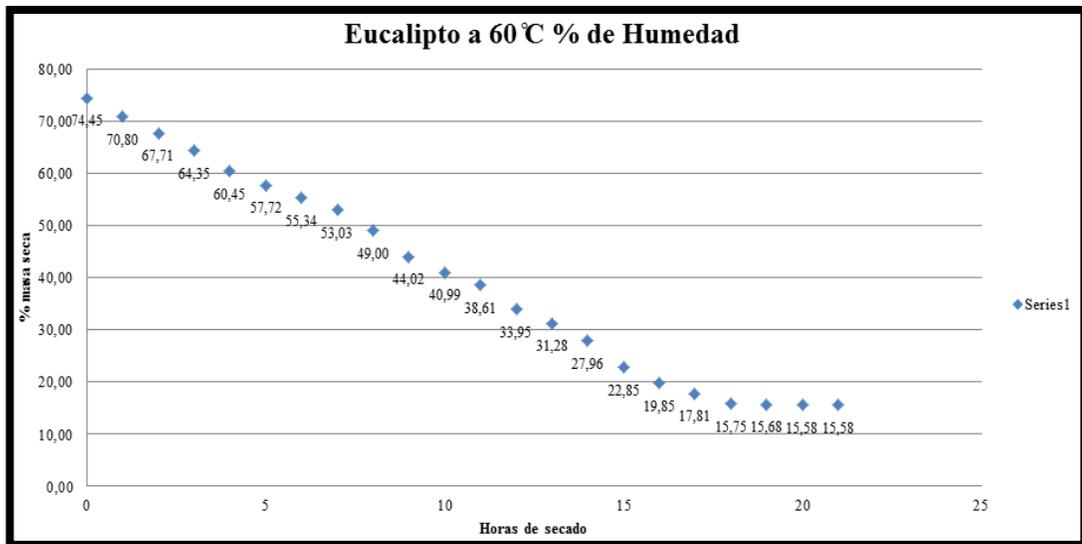


Figura # 40 Humedad del eucalipto a 60 ° C

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Eucalipto a 70																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	905,33	852,48	792,30	740,73	705,50	633,81	601,08	576,81	547,04	510,25	483,99	457,30	424,45	398,46	366,50	335,98	319,35	317,18	316,85	316,85
Pérdida de humedad		28,74	31,42	34,23	38,08	39,65	40,83	44,08	50,41	55,20	59,87	61,19	67,78	73,08	79,90	81,70	84,39	84,66	84,89	84,89
% masa seca	75,32	71,26	68,58	65,77	61,92	60,35	59,17	55,92	49,59	44,80	40,13	38,81	32,22	26,92	20,10	18,30	15,61	15,34	15,11	15,11

Cuadro # 27 Humedad del eucalipto a 70 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

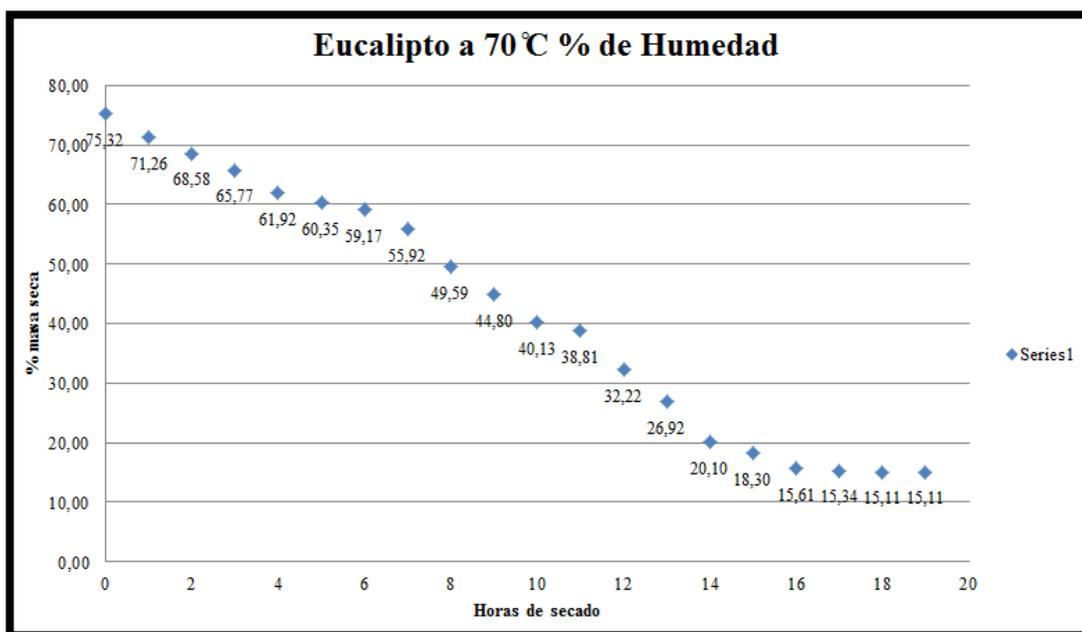


Figura # 41 Humedad del eucalipto a 70 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Eucalipto a 80																		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	904,93	853,23	791,38	731,03	676,00	613,84	559,73	528,08	505,30	476,23	449,80	409,55	386,23	353,48	327,88	309,55	309,05	309,05
Pérdida de humedad		28,83	31,80	35,05	39,64	41,73	45,40	48,72	52,34	58,28	64,35	68,92	74,68	79,04	81,96	84,76	84,84	84,84
% masa seca	74,21	71,17	68,20	64,95	60,36	58,27	54,60	51,28	47,66	41,72	35,65	31,08	25,32	20,96	18,04	15,24	15,16	15,16

Cuadro # 28 Humedad del eucalipto a 80 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

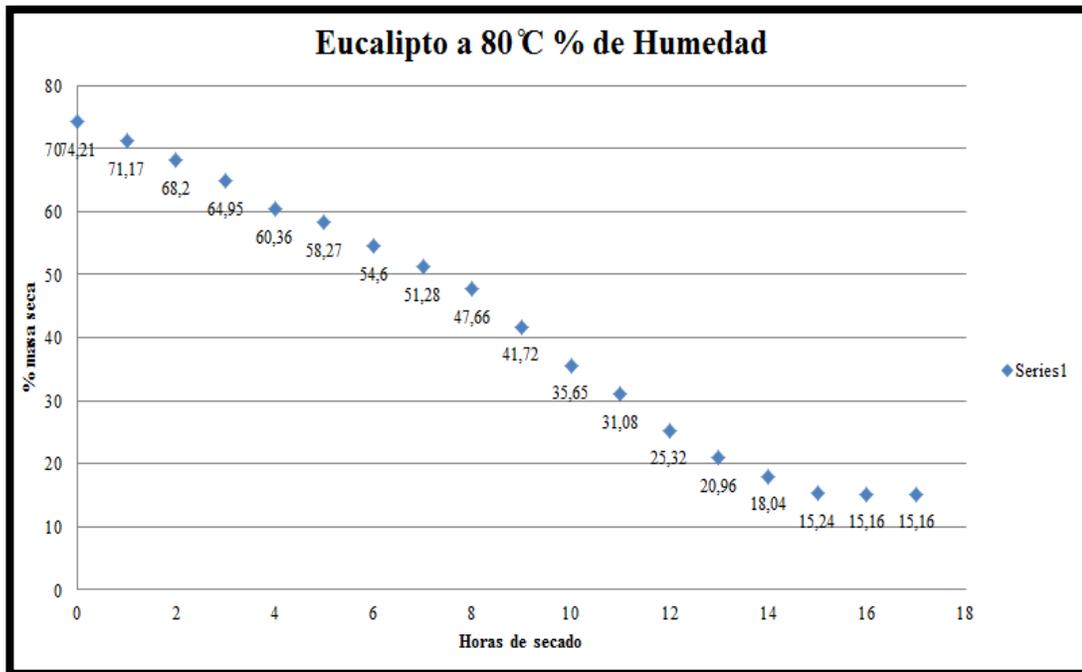


Figura # 42 Humedad del eucalipto a 80 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Para la determinación del % de humedad se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Perdida de Humedad} = \frac{\text{Peso inicial de la muestra} - \text{Peso final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Masa Seca} = 100 - \% \text{ de Perdida de Humedad}$$

3.2.3. Determinación de la masa relativa y el antilogaritmo de la masa relativa en eucalipto

La determinación de la masa relativa (mr) y el antilogaritmo de la masa relativa (ln mr) son operaciones matemáticas que establecen el efecto del secado en la madera para la modelización del radio de secado.

Eucalipto a 60																						
Tiempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Peso promedio (gramos)	904,85	856,50	789,50	733,05	688,75	638,20	606,60	566,55	534,90	507,45	487,03	456,10	422,13	394,75	368,08	341,58	323,53	315,03	313,00	312,63	312,19	312,19
Masa relativa	1,00	0,95	0,87	0,81	0,76	0,71	0,67	0,63	0,59	0,56	0,54	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,36	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Antilogaritmo de la masa relativa	0,00	-0,05	-0,14	-0,21	-0,27	-0,35	-0,40	-0,47	-0,53	-0,58	-0,62	-0,69	-0,76	-0,83	-0,90	-0,97	-1,03	-1,06	-1,06	-1,06	-1,06	-1,06

Cuadro # 29 Determinación de mr y ln mr del eucalipto a 60 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Eucalipto a 70																						
Tiempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
Peso promedio (gramos)	905,33	852,48	792,30	740,73	705,50	633,81	601,08	576,81	547,04	510,25	483,99	457,30	424,45	398,46	366,50	335,98	319,35	317,18	316,85	316,85	316,85	
Masa relativa	1,00	0,94	0,88	0,82	0,78	0,70	0,66	0,64	0,60	0,56	0,53	0,51	0,47	0,44	0,40	0,37	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Antilogaritmo de la masa relativa	0,00	-0,06	-0,13	-0,20	-0,25	-0,36	-0,41	-0,45	-0,50	-0,57	-0,63	-0,68	-0,76	-0,82	-0,90	-0,99	-1,04	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05	-1,05

Cuadro # 30 Determinación de mr y ln mr del eucalipto a 70 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Eucalipto a 80																						
Tiempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
Peso promedio (gramos)	904,93	853,23	791,38	731,03	676,00	613,84	559,73	528,08	505,30	476,23	449,80	409,55	386,23	353,48	327,88	309,55	309,05	309,05	309,05	309,05	309,05	
Masa relativa	1,00	0,94	0,87	0,81	0,75	0,68	0,62	0,58	0,56	0,53	0,50	0,45	0,43	0,39	0,36	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Antilogaritmo de la masa relativa	0,00	-0,06	-0,13	-0,21	-0,29	-0,39	-0,48	-0,54	-0,58	-0,64	-0,70	-0,79	-0,85	-0,94	-1,02	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07

Cuadro # 31 Determinación de mr y ln mr del eucalipto a 80 ° C

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Para la determinación de la masa relativa (mr) y el antilogaritmo de la masa relativa (ln mr) se utilizaron las siguientes fórmulas:

Cuando mr es la relación porcentual del peso de la muestra por cada hora del proceso de secado.

$$\text{Masa Relativa MR} = \frac{\text{Peso final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}}$$

$$\ln \text{MR} = \ln * \text{MR}$$

3.2.4. Curvas de secado del eucalipto

3.2.4.1. Curva de secado de la masa relativa en función al tiempo en el eucalipto

Con la determinación de los valores de la masa relativa (mr) del peso promedio en las temperaturas de secado del eucalipto, se efectuaron curvas de secado relacionándolas en función al tiempo.

Para un coeficiente de correlación igual a 1 las curvas de secado se ajustaron a ecuaciones exponenciales como se expone en las siguientes figuras.

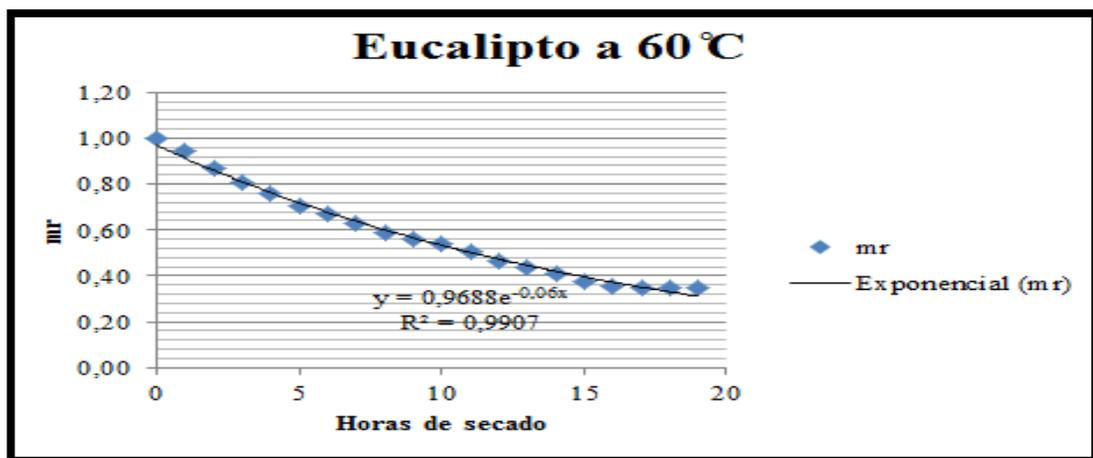


Figura # 43 MR en función al tiempo del eucalipto a 60 °C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

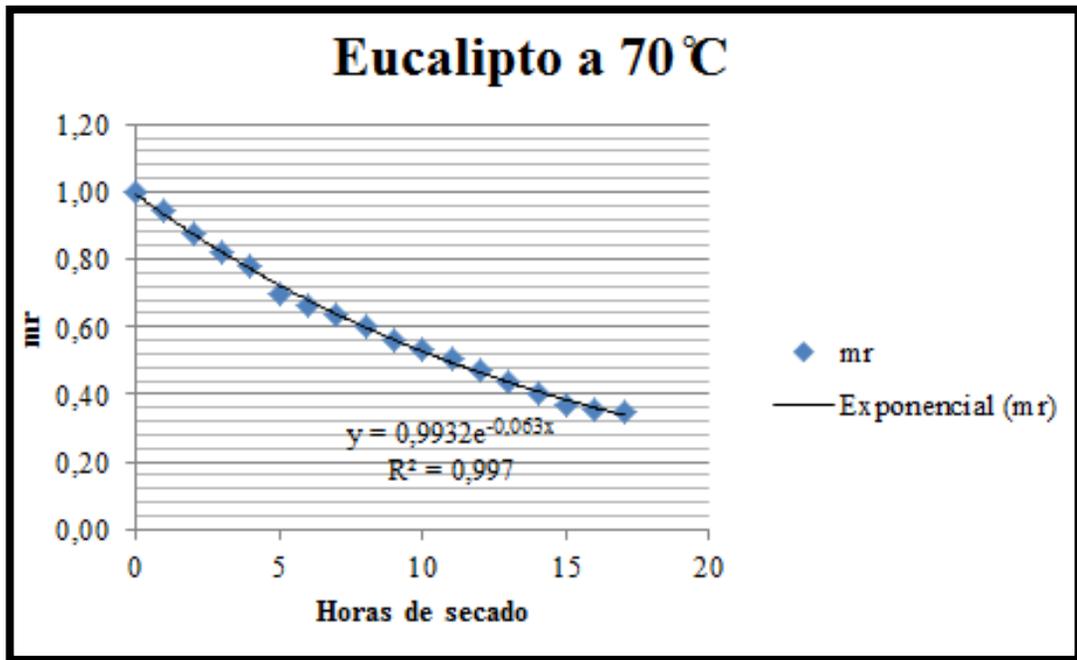


Figura # 44 MR en función al tiempo del eucalipto a 70 °C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

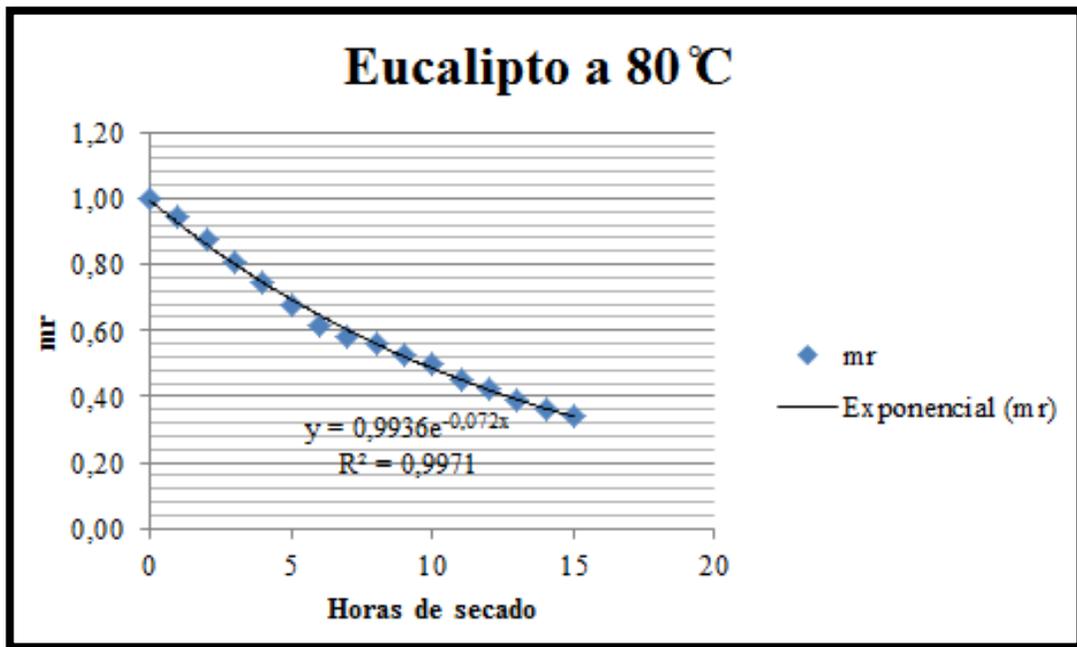


Figura # 45 MR en función al tiempo del eucalipto a 80 °C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

3.2.4.2. Curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa en función al tiempo en el eucalipto

Con la determinación de los valores del antilogaritmo de la masa relativa ($\ln mr$) del peso promedio en las temperaturas de secado del eucalipto, se efectuaron curvas de secado relacionándolas en función al tiempo.

Para un coeficiente de correlación igual a 1 las curvas de secado se ajustaron a ecuaciones lineales como se expone en las siguientes figuras.

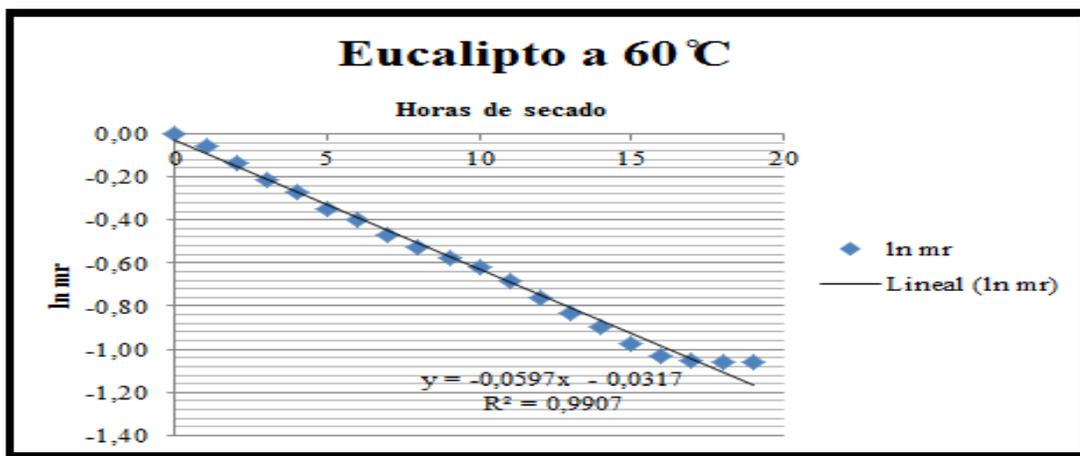


Figura # 46 LN MR en función al tiempo del eucalipto a 60 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

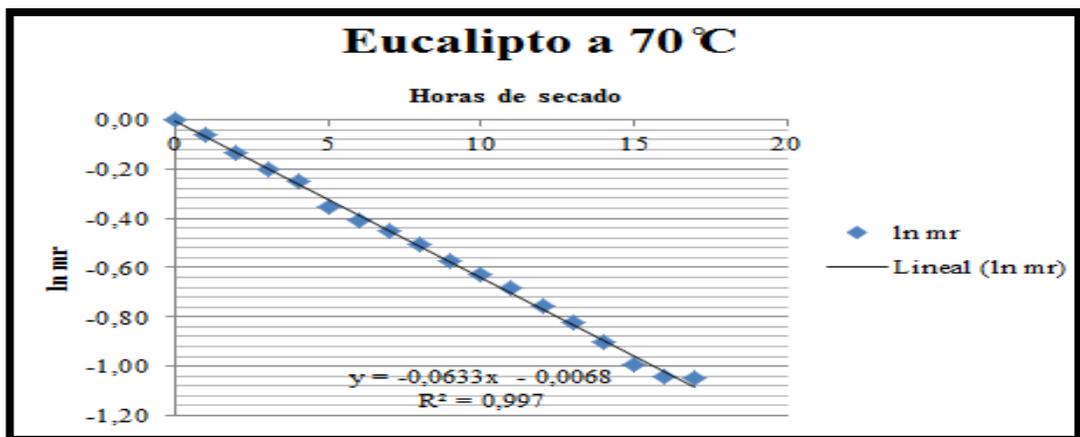


Figura # 47 LN MR en función al tiempo del eucalipto a 70 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

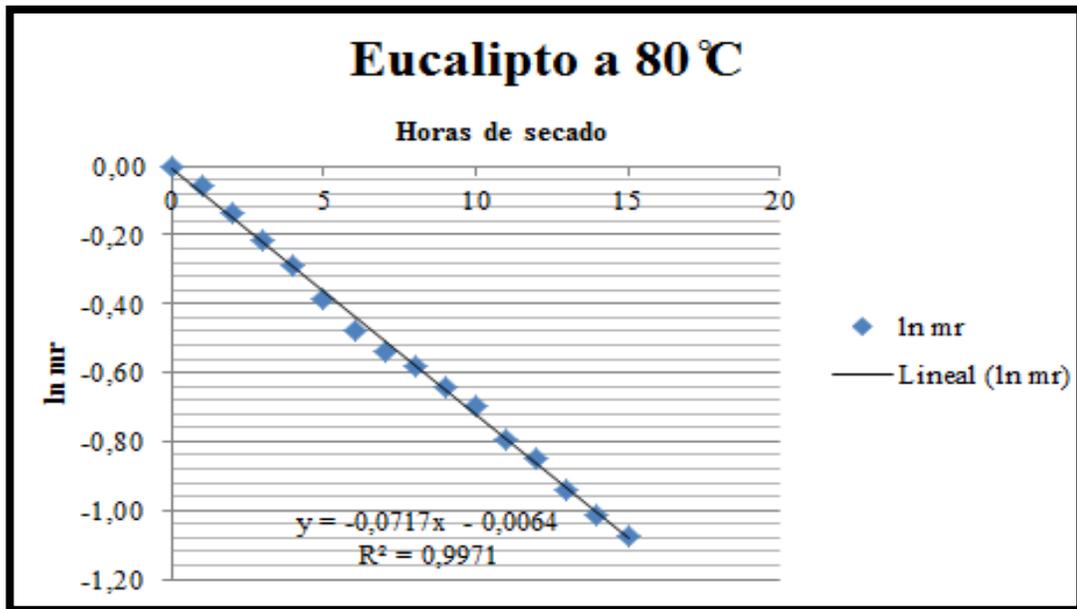


Figura # 48 LN MR en función al tiempo del eucalipto a 80 ° C
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

3.2.5. Determinación de las constantes A y B en eucalipto

Una vez obtenido mr y ln mr de todas las temperaturas de secado del eucalipto se debe determinar las constantes A y B del modelo de la curva característica.

3.2.5.1. Determinación de la constante A en eucalipto

La constante “A” en el eucalipto es una unidad matemática de regresión del modelo de la curva característica que se obtiene a partir de las gráficas de secado de ln mr en función al tiempo por cada temperatura (60 ° C, 70 ° C y 80 ° C) en la ecuación de y.

Esta constante determina el decremento de la difusividad térmica con relación a la temperatura a la que está expuesta la madera durante el proceso de secado. Esta difusividad engloba los efectos de todos los fenómenos que pueden intervenir en la migración o pérdida de agua.

Puede entenderse la difusividad como la facilidad con la que el agua es removida del material.

Temperaturas	a
60	-0,0317
70	-0,0068
80	-0,0064

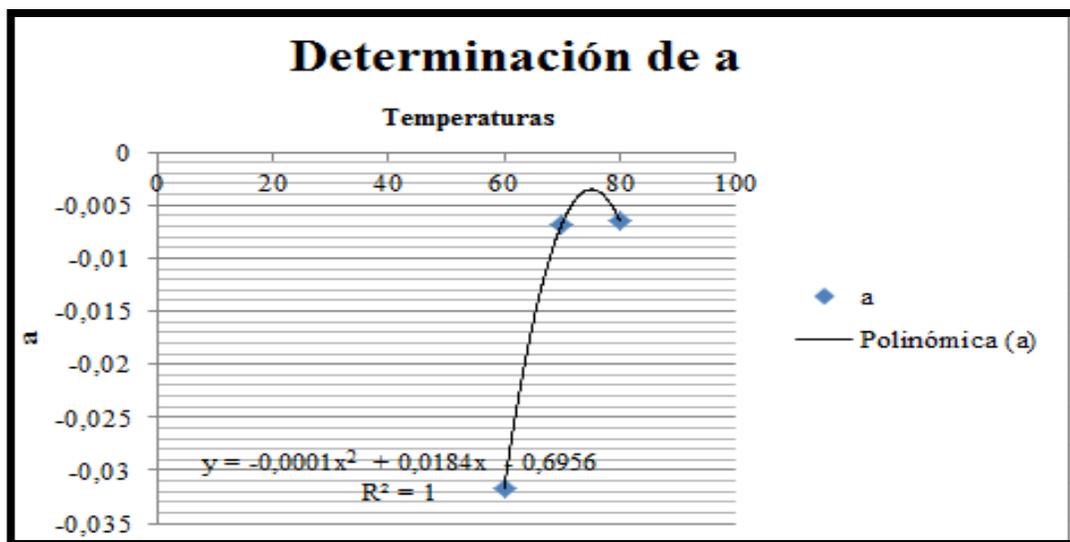


Figura # 49 Determinación de A en eucalipto
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Los valores de A son las representaciones numéricas del segundo factor de la ecuación lineal en la curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa LN MR en función al tiempo para las temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C.

3.2.5.2. Determinación de la constante B en eucalipto

La constante “B” en el eucalipto es una unidad matemática de regresión del modelo de la curva característica que se obtiene a partir de las gráficas de secado de ln mr en función al tiempo por cada temperatura (60 °C, 70 °C y 80 °C) en la ecuación de y.

Esta constante determina la cinética de secado con relación a la temperatura a la que está expuesta la madera durante el proceso de secado. La cinética establece la dependencia de la humedad y de la intensidad del secado con el tiempo o variables relacionadas a este, como las dimensiones del equipo, la velocidad del aire, etc.

La cinética está fuertemente influenciada por la temperatura empleada en el secado.

Temperaturas	b
60	-0,0597
70	-0,0633
80	-0,0717

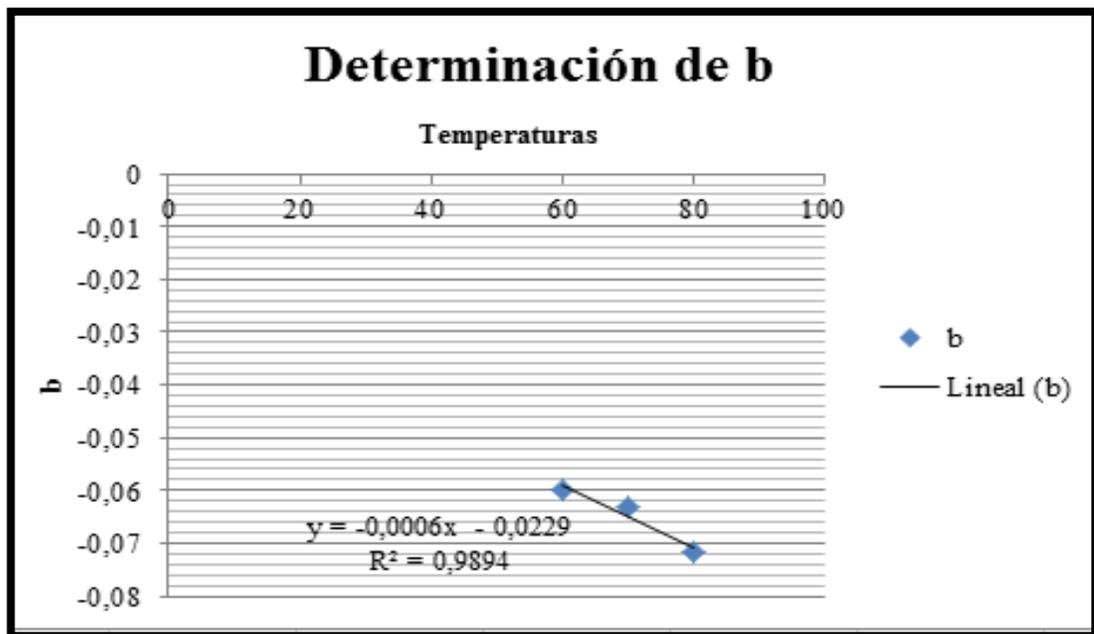


Figura # 50 Determinación de B en eucalipto
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Los valores de B son las representaciones numéricas del primer factor de la ecuación lineal en la curva de secado del antilogaritmo de la masa relativa LN MR en función al tiempo para las temperaturas de 60 ° C, 70 ° C y 80 ° C.

3.2.6. Radio de secado en eucalipto

El radio de secado es el transcurso del tiempo en el cual la madera fresca se somete a un proceso de secado hasta obtener un peso de muestreo constante. Esto se puede estandarizar a diferentes condiciones de humedad relativa, velocidad del aire, tipo de secador utilizado y temperatura.

El radio de secado utilizó los valores obtenidos de las gráficas de A y B para la determinación del tiempo de secado que necesita el pino para las temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C, además de establecer la cantidad de masa relativa a la que se desea alcanzar, para la investigación el % de masa relativa fue del 15%.

Temperatura	60
% mr	15
A	0,0484
B	-0,0589
Tiempo de secado	21

Cuadro # 32 Radio de secado en eucalipto a 60 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Temperatura	70
% mr	15
A	0,1024
B	-0,0649
Tiempo de secado	20

Cuadro # 33 Radio de secado en eucalipto a 70 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Temperatura	80
% mr	15
A	0,1364
B	-0,0709
Tiempo de secado	18

Cuadro # 34 Radio de secado en eucalipto a 80 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Para la determinación del radio de secado A es el valor de la resolución de la ecuación polinómica $y = -0,0001x^2 + 0,0184x - 0,6956$ y B es el valor de la resolución de la ecuación lineal $y = -0,0006x - 0,0229$, para ambos casos x es la temperatura de secado.

Para establecer el tiempo de secado de la madera del eucalipto su resolución se la realizó con la siguiente fórmula:

$$\text{Tiempo de secado} = \frac{(\ln(MR) - A)}{B}$$

3.2.7. Análisis de varianza del eucalipto

Para la medición de significancia estadística de los datos experimentales del eucalipto se realizó un análisis de varianza, el cual fija que con una probabilidad mayor al 0,05 los datos son significativos, mientras que al obtener una probabilidad menor a 0,05 los datos no son significativos. El análisis de varianza maneja un intervalo de confianza del 95 % y un margen de error de 5%.

Los resultados de los análisis de varianza para las temperaturas de secado en el eucalipto fueron los siguientes:

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1,84375	3	0,614583333	0,16240469	0,919603995	3,490294819
Dentro de los grupos	45,41125	12	3,784270833			
Total	47,255	15				

Cuadro # 35 Análisis de varianza del eucalipto a 60 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	17,441875	3	5,813958333	0,074853215	0,972362437	3,490294819
Dentro de los grupos	932,0575	12	77,67145833			
Total	949,499375	15				

Cuadro # 36 Análisis de varianza del eucalipto a 70 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,666666667	2	0,333333333	0,05765904	0,944317559	4,256494729
Dentro de los grupos	52,03	9	5,781111111			
Total	52,69666667	11				

Cuadro # 37 Análisis del varianza del eucalipto a 80 ° C
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

En los resultados obtenidos la variación del contenido de humedad dentro de las primeras 5 horas tuvo una rapidez acelerada en las maderas de pino y eucalipto posteriormente se registró una disminución paulatina hasta llegar a un porcentaje de humedad constante.

Se pudo evidenciar que las curvas de secado de la masa relativa (mr) de las maderas expresadas en las figuras #32, #33, #34, #43, #44 y #45 tienen una tendencia al gráfico de una parábola, en tanto que las curvas de secado del antilogaritmo de la masa relativa ($\ln mr$) de las figuras #35, #36, #37, #46, #47 y #48 tiene una tendencia a una recta, en ambos casos los resultados coinciden con la investigación “Modelado matemático del secado de madera subtropical por convección de aire caliente” de Emilio Hernández realizada en Oaxaca-México en el año 2011.

En las curvas de secado de las maderas el coeficiente de correlación se ajustó a 1, en pino y eucalipto mr para ecuaciones exponenciales y $\ln mr$ para ecuaciones lineales.

El contenido de humedad de las maderas de la investigación llegó a un porcentaje del 15% en pino y en eucalipto, valores en los cuales coincide con el artículo de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente autoría de Luis Novoa en la Universidad Nacional Amazónica Madre de Dios del Perú en el 2010.

El modelo matemático de la curva característica es utilizado para estandarizar el secado en la madera, además de modelarlas, de manera que puedan ser utilizadas a diferentes condiciones de humedad relativa, velocidad del aire y temperatura.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En el secado experimental del pino a temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C el tiempo en el que se efectuó el secado fue de 19 horas, 18 horas y 16 horas respectivamente.
- Para el caso del secado experimental del eucalipto a temperaturas de 60 °C, 70 °C y 80 °C el tiempo en el que se efectuó el secado fue de 21 horas, 19 horas y 17 horas.
- El radio de secado estableció que a una temperatura de 60° C el pino se seca en un tiempo de 20 horas, a 70° C en 19 horas y a 80° C a 17 horas, con aumento de 1 hora con respecto a la parte experimental del secado.
- En el eucalipto el radio de secado estableció que a la temperatura de 60° C la madera se seca en un tiempo de 20 horas, a 70° C en 19 horas y a 80° C a 17 horas, con aumento de 1 hora respecto a la parte experimental del secado únicamente para el caso del secado del eucalipto a 60° C.
- La versatilidad del modelo de la curva característica para simular la velocidad de secado y los tiempos de operación lo hacen viable para ser utilizado en el control del proceso de industrias madereras.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda en el secado de maderas como el pino y eucalipto realizarse a temperaturas que oscilen desde los 50 a 80 grados centígrados puesto que son condiciones a las cuales se pueden dimensionar un óptimo secado sin producir cambios en la uniformidad y constitución del material.
- Es necesario realizar la toma de datos del secado en intervalos de tiempo no mayores a 1 hora puesto que dentro de las primeras 5 horas la madera perdió la mayor cantidad de agua para el caso particular de esta investigación.
- Se recomienda revisar periódicamente el flujo del viento dentro del secador ya que a temperaturas altas de secado el flujo de aire efectúa una mayor rapidez de pérdida de humedad.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.8. TITULO DE LA PROPUESTA

APLICACIÓN DEL RADIO DE SECADO DEL PINO Y EUCALIPTO A ESCALA INDUSTRIAL EN LA EMPRESA MADERERA “PISMADE S.A.”

6.9. INTRODUCCIÓN

El Ecuador cuenta una superficie maderera ampliamente explotable, además de una diversidad de especies en la Costa, Sierra y la Amazonia.

El secado de madera se ha convertido en un proceso vital para el desarrollo del sector maderero, debido a que mejora la calidad del producto, disminuye los costos de transporte, mejora la estabilidad dimensional, facilita el acabado y su transformación secundaria.

En la presente propuesta se incentiva la aplicación de un radio de secado en los procesos de secado de la madera en la empresa “PISMADE S.A.” para establecer el radio de secado como una herramienta eficaz para la optimización de recursos, pues acoplan la física del secado de los materiales con las condiciones propias del secador empleado.

La modelización del radio de secado asocia, balances de energía, de masa y de momento, que pueden ser expresados como ecuaciones diferenciales y resuelto

numéricamente, para obtener soluciones específicas en cada problema de las industrias madereras.

Para la obtención de mejores resultados en los procesos de secado en las industrias madereras es necesario manejar condiciones estándar de temperatura, humedad, velocidad del viento, flujo de aire caliente y tiempo de ejecución en el secador.

6.10. OBJETIVOS

6.10.1. General

Aplicar el radio de secado del pino y eucalipto a escala industrial en la empresa maderera “PISMADE S.A.”

6.10.2. Específicos

- Definir el contenido de humedad de la madera en función del tiempo y la temperatura de secado.
- Validar los datos obtenidos con la utilización del radio de secado para optimizar recursos y tiempo de ejecución.
- Capacitar a los trabajadores de la empresa “PISMADE S.A.” sobre la utilización del radio de secado en especies madereras como el pino y el eucalipto.

6.11. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO –TÉCNICA

6.11.1. Radio de secado basado en el modelo de la curva característica.

6.4.1.1. Definición del radio de secado

El radio de secado modela la cinética de secado partiendo de datos experimentales y de la conceptualización de diferentes fases de secado, considerando una rapidez de secado de referencia y estableciendo la hipótesis de que los mecanismos dependen principalmente del potencial de humedad reducido. [8]

El desarrollo de un modelo matemático para el secado de madera ayudará a tener una mejor comprensión de la física de secado, del transporte de agua líquida y del vapor de agua en el material, para posteriormente mejorar las condiciones de operación y por ende su calidad. [6] [12]

6.4.1.2. Materiales y equipo requerido

Para la utilización del radio de secado en industrias madereras es necesario que cuenten con maquinaria e infraestructura similar a la especificada a continuación:

Contar con un túnel de secado con bandejas para obtener las cinéticas de secado. Este túnel está diseñado para proporcionar un flujo de aire con velocidad y temperatura, uniforme y controlada. El aire con el que se seca, se calienta mediante dos resistencias eléctricas que se mantiene a una temperatura constante. La medición de la temperatura se da a través de un regulador instalado en el equipo. La velocidad del aire se mide con un anemómetro en el secado de madera. El peso de la muestra, durante el proceso, es registrado por una balanza analítica que mide la tensión que se produce por el peso de la muestra.

6.4.1.3. Muestreo

El muestreo de la madera a secarse se realizó obteniendo madera verde o fresca de aserraderos de la localidad. Se seleccionaron al azar tablas de madera frescas, para determinar el contenido de humedad promedio de la madera, y se cortaron probetas de dimensiones de 10 cm de largo, 10 cm de ancho con un espesor de 2.50 cm.

Las dimensiones de las tablas están sujetas a las dimensiones del soporte del túnel de secado y se pueden ajustar a modificaciones depende y esta criterio de la industria maderera donde se realice el secado.

6.4.1.4. Factores y niveles de los experimentos de secado

En el secado de madera podemos encontrar diferentes factores que influyen en la remoción de agua en el material, en general están divididos en propios del material y del proceso, los primeros considerados constantes. Estos experimentos son comunes cuando se quiere encontrar la influencia de estos sobre la respuesta. Para que un experimento sea exitoso es necesario conocer los factores importantes, los intervalos en los cuales deben hacerse variar estos factores, la cantidad adecuada de niveles por usar, y las unidades de medida apropiadas para estas variables. [13]

Los niveles de temperatura utilizados en la investigación fue de 60°C, 70°C y 80°C y una velocidad del flujo de aire es constante, y fue establecida en un rango de 2-2.5 m/s. [16]

6.4.1.5. Contenido de humedad en la madera

El contenido de humedad se puede determinar mediante la utilización del método gravimétrico tomando los datos del peso de las muestras cada cierto intervalo de tiempo hasta la obtención de un peso constante.

6.12. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

La presente propuesta se fundamenta en la aplicación del radio de secado de pino y eucalipto que se basa en el modelo de la curva característica en el proceso de secado de madera de la empresa “PISMADE S.A.”

La utilización del radio de secado se constituirá en una herramienta eficaz en muchas industrias madereras que encaminan sus procesos a la optimización de recursos, tiempos de operación, gastos en insumos y la obtención de materiales de calidad los cuales incurrirán en ganancias económicas para la empresa.

El radio de secado establece una clara mejoría en la calidad de la madera seca lo cual influye directamente en sus propiedades físicas que se ven beneficiadas para las operaciones de manufactura y acabado posterior.

El radio de secado determina el % de humedad de la madera usando las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Perdida de Humedad} = \frac{\text{Peso inicial de la muestra} - \text{Peso final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Masa Seca} = 100 - \% \text{ de Perdida de Humedad}$$

Una vez determinada la cinética del secado con el contenido de humedad en la madera el radio de secado linealiza el peso las muestras aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Masa Relativa} = \frac{\text{Peso final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}}$$

$$\ln \text{ MR} = \ln * \text{ MR}$$

Con los resultados de estas ecuaciones se grafica estadísticamente parámetros en función al tiempo y temperatura empleada. El radio de secado se determina por constantes de regresión lineal A y B.

Las constantes A y B establecen el tiempo de secado a diferentes temperaturas de la madera.

Para la determinación del tiempo óptimo de secado se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de secado} = \frac{(\ln(MR) - A)}{B}$$

6.13. DISEÑO ORGANIZACIONAL

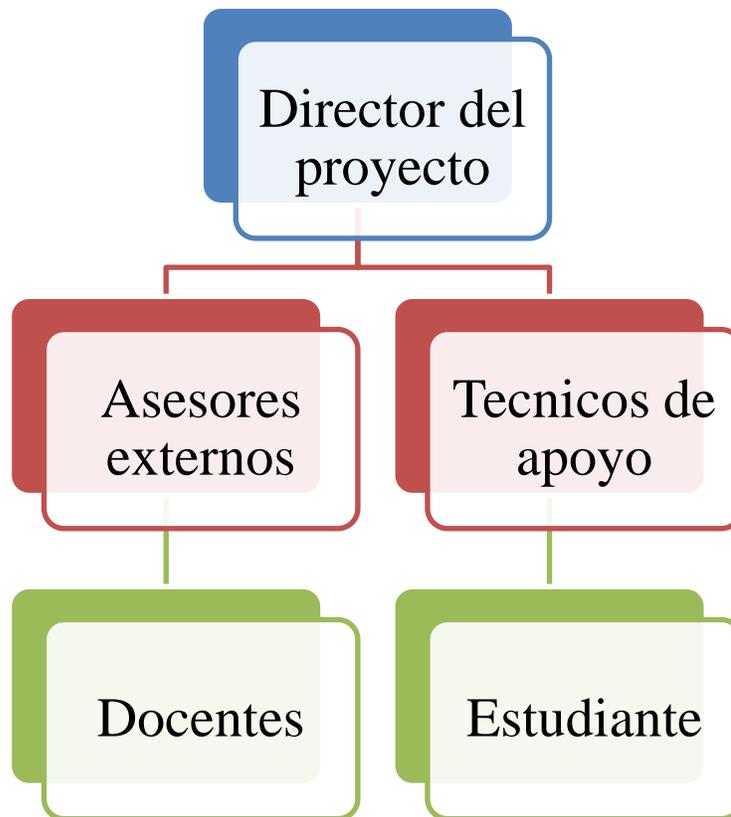


Figura # 51 Diseño organizacional de la propuesta
Elaborado por: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

6.14. MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA

ACTIVIDADES	MESES																							
	1				2				3				4				5				6			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Fundamentación teórica	x	x	x	x																				
Muestreo, factores y niveles en experimentos de secado																								
Secado de madera					x	x	x	x																
Determinación del contenido de humedad de la madera.													x	x	x	x								
Utilización del radio de secado para estandarizar tiempos de secado.																	x	x	x	x				
Implementación en la empresa "PISMADE" del radio de secado																					x	x	x	x
Análisis de resultados																								

Cuadro # 38 Monitoreo y evaluación de la propuesta
Elaborado por: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

CAPÍTULO VI

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Alcoba, R. (2001). Secado tradicional de eucalipto. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 16 p.

[2] Álvarez, H; Fernández - Gofin, J. (1992). Fundamentos teóricos del secado de la madera. Madrid. 139 p.

[3] Córdoba, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 6 p.

[4] Hernández-Bautista E., Sandoval-Torres S., Rodríguez-Ramírez J., & Velasco-Cruz O. A. (2010). Modelización del secado de madera de *Pinus pseudostrobus* utilizando el método de la curva característica. 119 p.

[5] Instituto Ecuatoriano de Normalización Norma Inen 1156, (2010). Definiciones de madera. Ecuador 23 p.

[6] Ilic M., & Turner I. (1991). A continuum model of drying processes involving a jump through hysteresis. *Drying Technology*. 79-111 p.

[7] Inzunza, L. (2004). Curso de secado de la madera, Universidad Austral de Chile.

[8] Jannot Y., Talla A., Nganhou J., & Puiggali J. R. (2004). Modeling of Banana Convective Drying by the Drying Characteristic Curve (DCC) Method. *Drying technology*.1949-1968 p.

- [9] Junac, (1988). Manual del Grupo Andino para el secado de maderas, Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima 650 p.
- [10] Krabbenhoft K., & Damkilde L. (2004). A model for non-Fickian moisture transfer in wood materials and structures. 615-622 p.
- [11] Luna, C – Cruz, C. (2008). Diseño y construcción de un secador para maderas con energía solar. Ecuador. 110 p.
- [12] Ming, T. (2000). Overview of mechanistic modelling techniques. Department of Chemical and Process Engineering, 1-7 p.
- [13] Montgomery, D. C. (2002). Diseño y Análisis de Experimentos. México.
- [14] Morris, J. (2008). Secado de madera. Universidad Distrital Cali. Colombia. 31 p.
- [15] Rodríguez, J – Tenesaca, M. (2008). Diseño de un sistema de secado artificial de madera automático capacidad (20m³). Ecuador. 157 p.
- [16] Skaar, C. (1988). Wood-Water Relations. Berlin.
- [17] Tomaselli, I. (1998). Secagem de Maderiras. Universidad Federal de Paraná. Curitiba-Brasil.
- [18] Turner I. (1996). A two dimensional orthotropic model for simulating wood drying processe. . Applied Mathematical Modelling. 60-81 p.
- [19] Turner I. & Perré P. (2004). A new two-scale model describing drying kiln dynamics and coupled heat and mass transfer in a porous medium: application to the

combined vacuum drying and radiative heating of wood. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, A, 436-443 p.

[20] Truscott S., and Turner, I. (2005). A heterogeneous three-dimensional computational model for wood drying. Applied Mathematical Modelling. 381–410 p.

[21] Vargas, J. (1987). Anatomía y tecnología de la madera. Manual del Técnico Forestal. Cbba-BO, Escuela Técnica Superior Forestal - Cooperación Técnica Alemana. 119 p.

[22] Viscarra, S. (1998). Guía para La Madera Secada en Hornos, Documento Técnico 69/1998. Chemonics International. Usaid/Bolivia.

[23] Vignote, S; Jiménez, F. (2000). Tecnología de la madera. 2da ed. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 337 p.

[24] Vignote-Peña S., & Martínez-Rojas I. (2006). Tecnología de la madera Vol. 1. Madrid-España.

[25] Vinueza, M. (2010). Ficha técnica de eucalipto. Ecuador Forestal. Ecuador. 13 p.

[26] Vinueza, M. (2010). Ficha técnica del pino. Ecuador Forestal. Ecuador. 10 p.

[27] Wan J., & Langrish T. (1995). A Numerical Simulation for Solving the Diffusion Equations in the Drying of Hardware Timber Drying Technology. 783-799 p.

[28] Whitaker S. (1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. Advances in Heat Transfer. 119–203 p.

ANEXOS

Anexo # 1

EXPERIMENTOS DE SECADO DEL PINO

(Por repetición)

Pesos de secado del pino a 60 °C

Repetición 1																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	502,00	455,50	410,00	372,40	355,80	329,30	310,60	293,70	272,50	256,20	243,05	225,50	210,60	191,60	174,50	153,70	145,30	144,80	144,50	144,50

Cuadro # 39 Pino a 60 °C Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	506,20	459,70	414,20	377,60	359,10	333,60	314,80	296,90	275,70	259,40	247,00	228,70	215,80	195,60	178,70	157,10	148,50	147,00	146,90	146,90

Cuadro # 40 Pino a 60 °C Repetición # 2

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	506,40	458,20	415,80	378,80	360,30	337,80	318,00	299,10	278,70	262,60	250,50	232,90	219,20	198,80	182,90	160,80	152,30	149,90	149,40	149,40

Cuadro # 41 Pino a 60 °C Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	508,80	463,80	425,40	386,50	365,40	342,40	323,20	304,40	282,60	267,50	255,60	238,10	224,70	204,60	188,50	166,60	158,20	153,50	153,00	153,00

Cuadro # 42 Pino a 60 °C Repetición # 4

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Determinación de mr y ln mr del pino a 60 ° C

Repetición 1																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mr	1,00	0,907	0,817	0,742	0,709	0,656	0,619	0,585	0,543	0,510	0,484	0,449	0,420	0,382	0,348	0,306	0,289	0,288	0,288	0,288

Cuadro # 43 Pino a 60 ° C mr Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

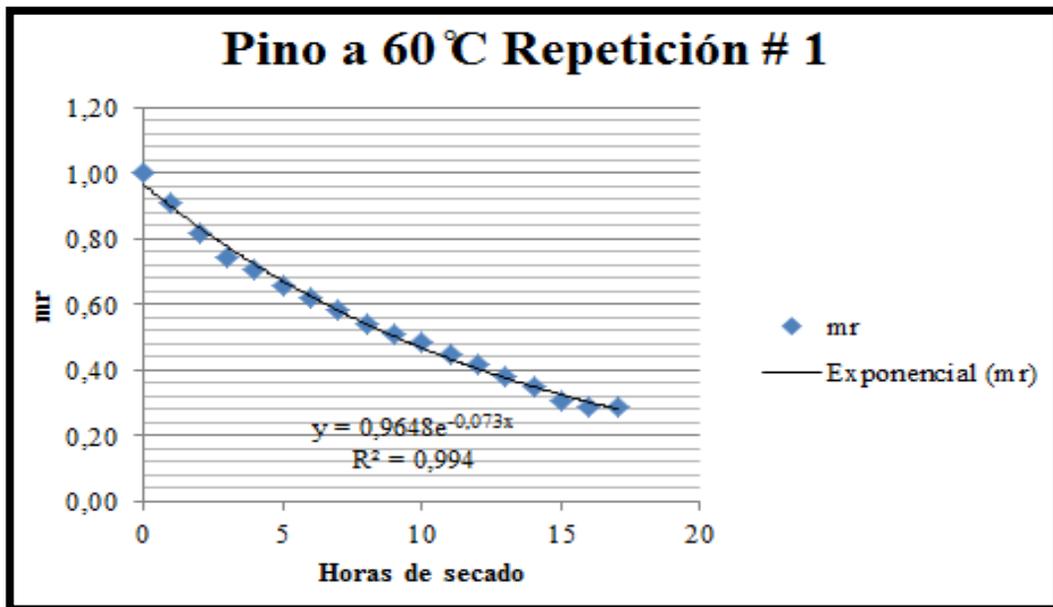


Figura # 52 Pino a 60 ° C mr Repetición # 1

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 1																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ln mr	0,00	-0,097	-0,202	-0,299	-0,344	-0,422	-0,480	-0,536	-0,611	-0,673	-0,725	-0,800	-0,869	-0,963	-1,057	-1,184	-1,240	-1,243	-1,245	-1,245

Cuadro # 44 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

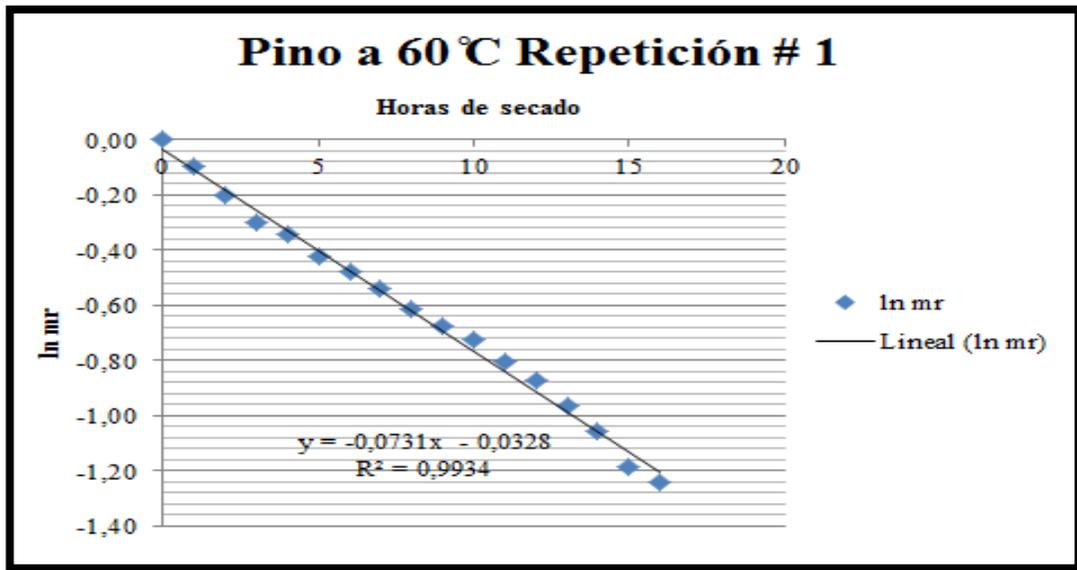


Figura # 53 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mr	1,00	0,908	0,818	0,746	0,709	0,659	0,622	0,587	0,545	0,512	0,488	0,452	0,426	0,386	0,353	0,310	0,293	0,290	0,290	0,290

Cuadro # 45 Pino a 60 ° C mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

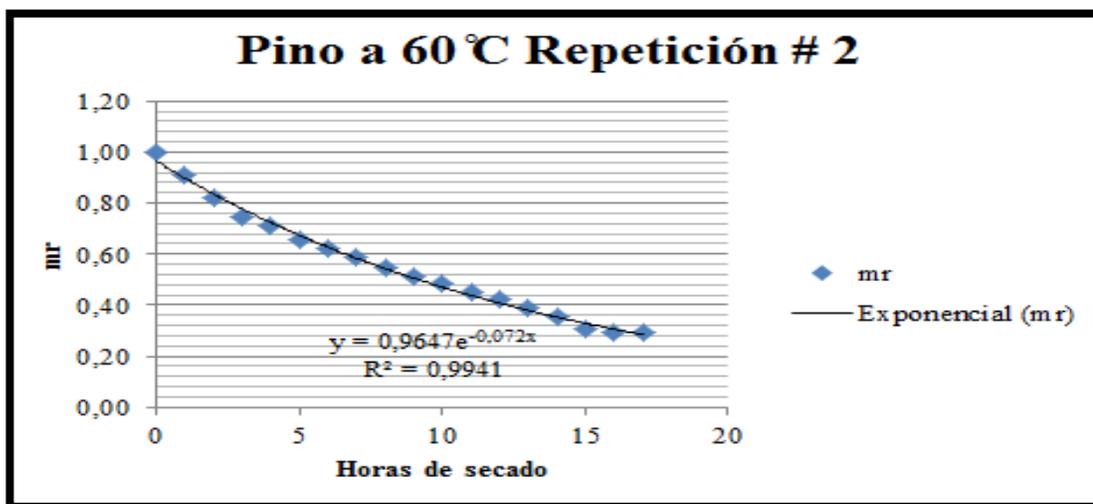


Figura # 54 Pino a 60 ° C mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ln mr	0,00	-0,096	-0,201	-0,293	-0,343	-0,417	-0,475	-0,534	-0,608	-0,669	-0,718	-0,795	-0,853	-0,951	-1,041	-1,170	-1,226	-1,236	-1,237	-1,237

Cuadro # 46 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

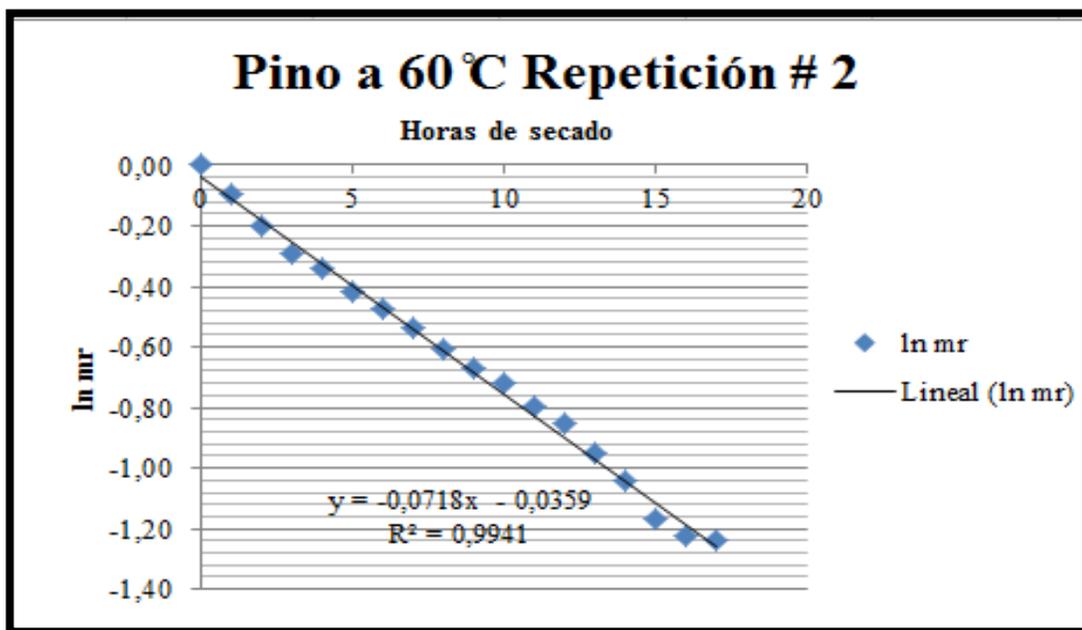


Figura # 55 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mr	1,00	0,905	0,821	0,748	0,711	0,667	0,628	0,591	0,550	0,519	0,495	0,460	0,433	0,393	0,361	0,318	0,301	0,296	0,295	0,295

Cuadro # 47 Pino a 60 ° C mr Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

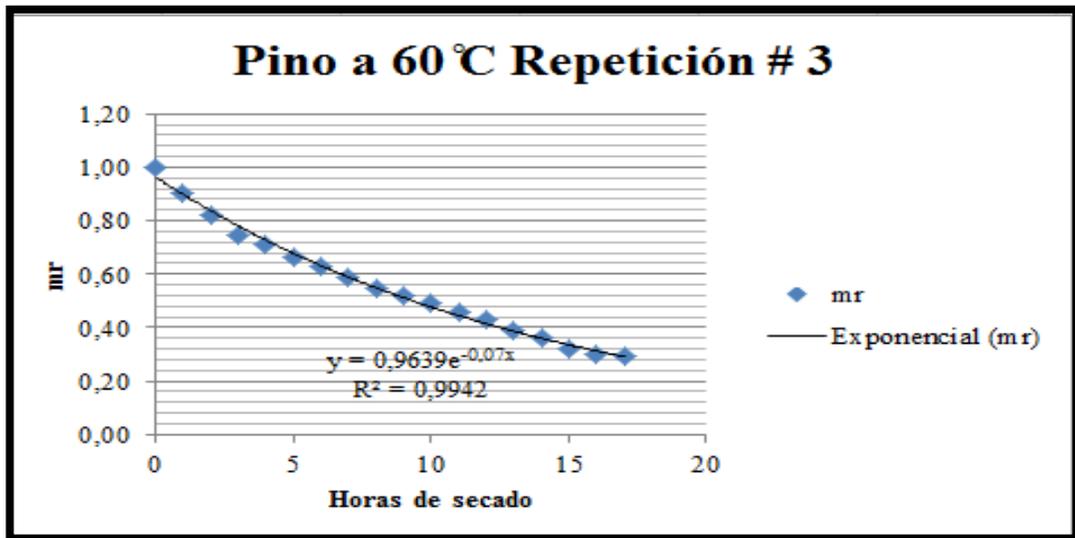


Figura # 56 Pino a 60 ° C mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ln mr	0,00	-0,100	-0,197	-0,290	-0,340	-0,405	-0,465	-0,527	-0,597	-0,657	-0,704	-0,777	-0,837	-0,935	-1,018	-1,147	-1,201	-1,217	-1,221	-1,221

Cuadro # 48 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

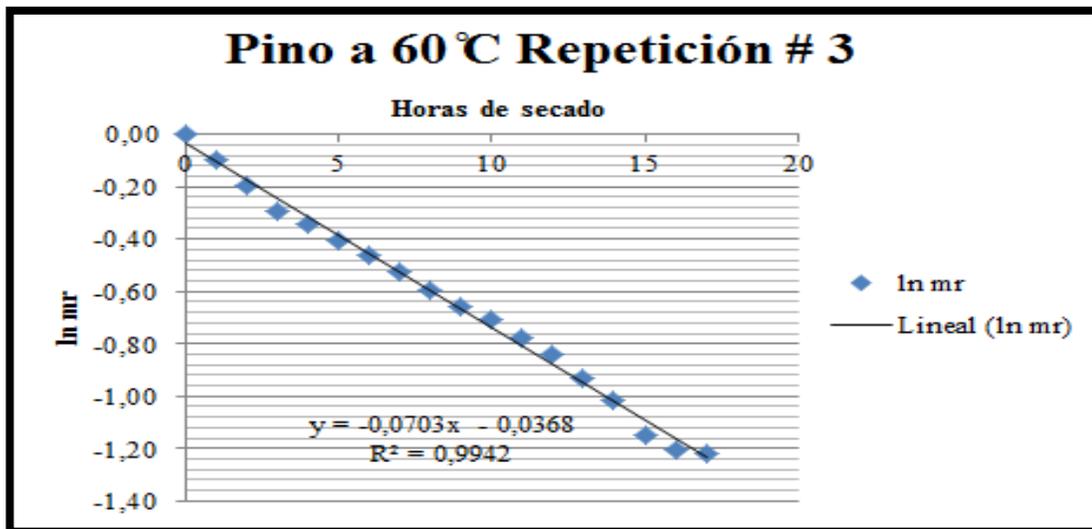


Figura # 57 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mr	1,00	0,912	0,836	0,760	0,718	0,673	0,635	0,598	0,555	0,526	0,502	0,468	0,442	0,402	0,370	0,327	0,311	0,302	0,301	0,301

Cuadro # 49 Pino a 60 ° C mr Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

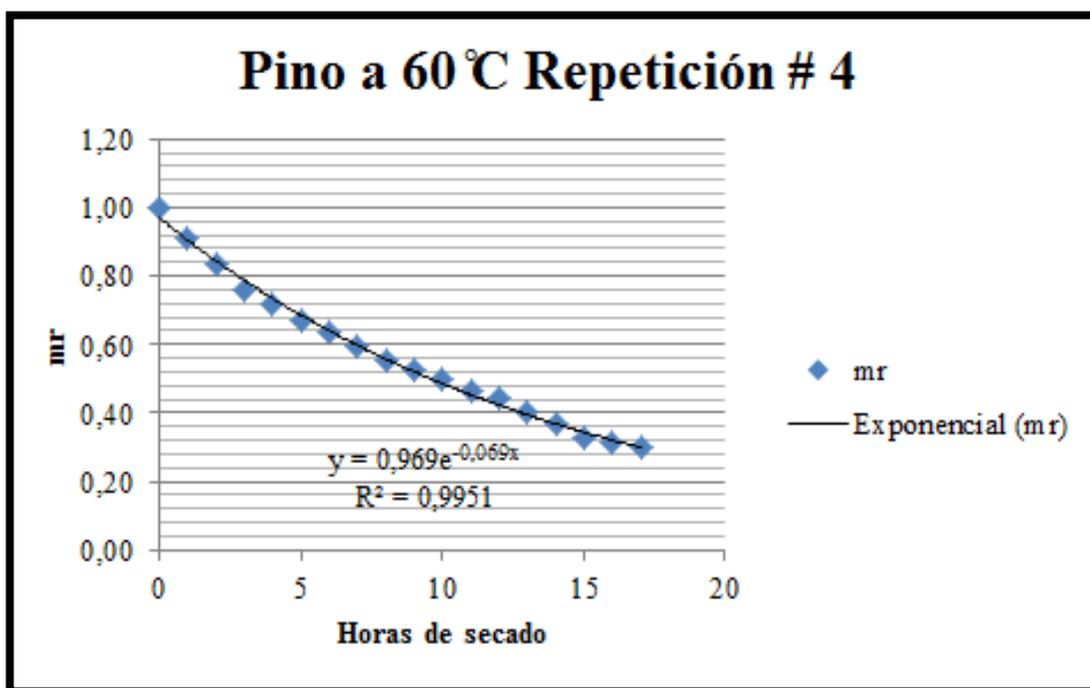


Figura # 58 Pino a 60 ° C mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ln mr	0,00	-0,093	-0,179	-0,275	-0,331	-0,396	-0,454	-0,514	-0,588	-0,643	-0,688	-0,759	-0,817	-0,911	-0,993	-1,116	-1,168	-1,198	-1,202	-1,202

Cuadro # 50 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

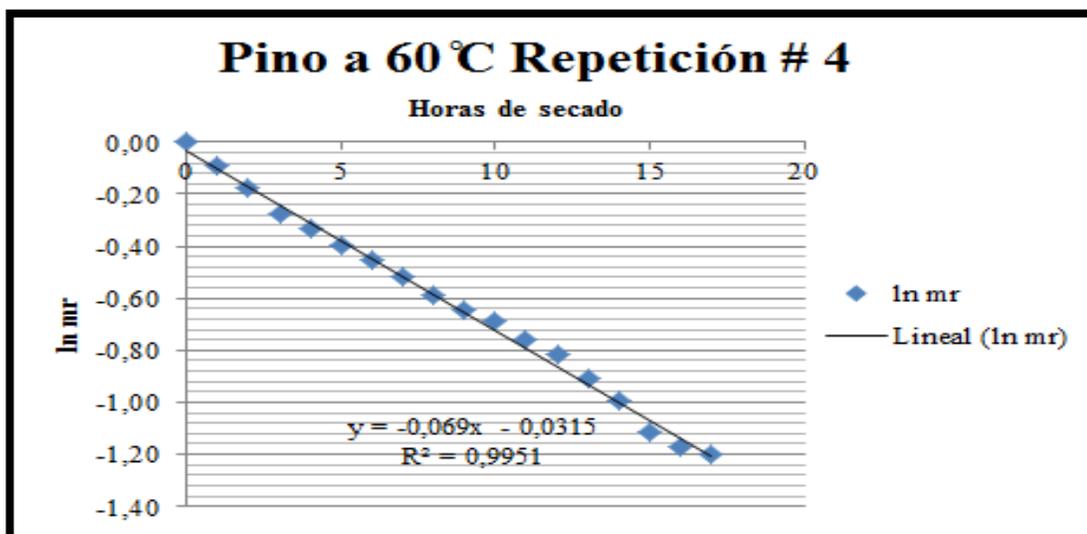


Figura # 59 Pino a 60 ° C ln mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pesos de secado del pino a 70 ° C

Repetición 1																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Peso	508,40	457,20	412,00	374,40	345,00	319,20	308,40	290,50	263,05	241,10	227,60	209,20	190,40	178,70	158,20	142,90	142,20	142,15	142,15

Cuadro # 51 Pino a 70 ° C Repetición # 1
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Peso	505,40	455,20	409,80	370,50	342,70	313,00	305,80	287,10	261,40	238,00	224,30	206,80	187,20	175,20	155,70	139,60	139,20	139,10	139,10

Cuadro # 52 Pino a 70 ° C Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Peso	509,40	462,40	431,60	406,10	373,20	337,00	325,40	305,60	275,40	258,70	243,10	230,20	211,70	195,40	180,20	162,15	161,60	161,55	161,55

Cuadro # 53 Pino a 70 ° C Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Peso	503,20	459,30	423,00	404,70	367,20	342,50	329,40	309,20	283,60	271,00	254,80	242,20	223,10	208,40	190,00	173,60	172,90	172,80	172,80

Cuadro # 54 Pino a 70 ° C Repetición # 4

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Determinación de mr y ln mr del pino a 70 ° C

Repetición 1																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
mr	1,00	0,899	0,810	0,736	0,679	0,628	0,607	0,571	0,517	0,474	0,448	0,411	0,375	0,351	0,311	0,281	0,280	0,280	0,280

Cuadro # 55 Pino a 70 ° C mr Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

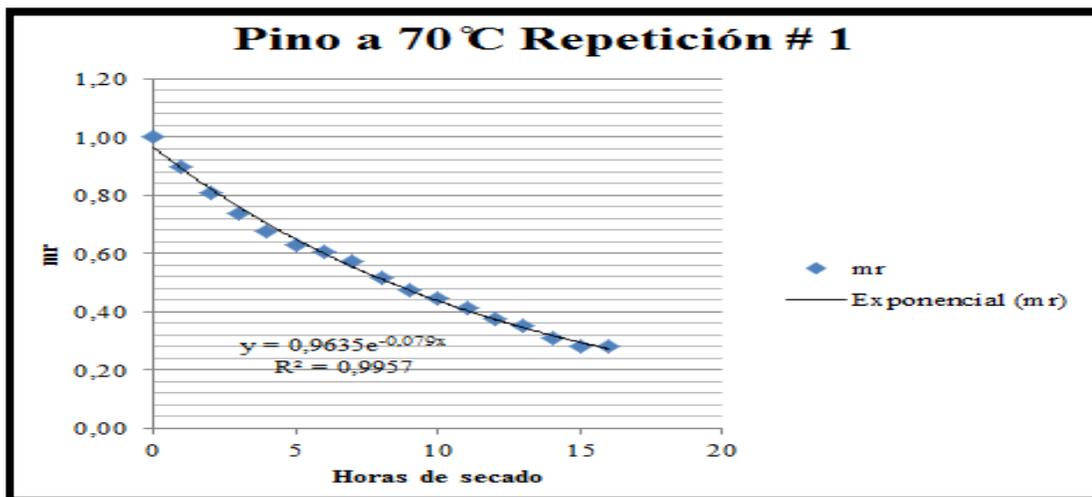


Figura # 60 Pino a 70 ° C mr Repetición # 1

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 1																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ln mr	0,00	-0,106	-0,210	-0,306	-0,388	-0,465	-0,500	-0,560	-0,659	-0,746	-0,804	-0,888	-0,982	-1,046	-1,167	-1,269	-1,274	-1,274	-1,274

Cuadro # 56 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

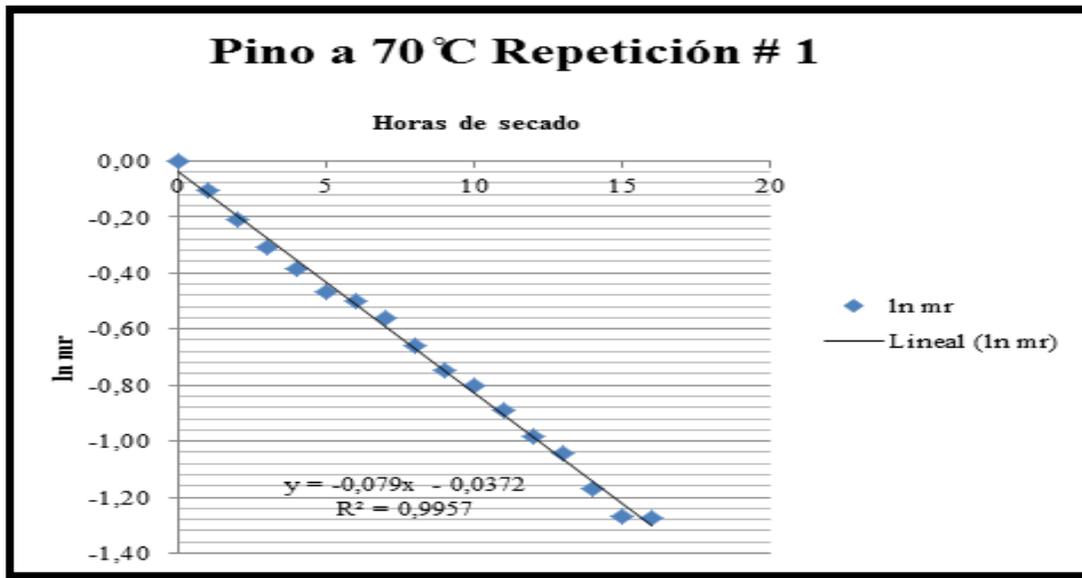


Figura # 61 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
mr	1,00	0,901	0,811	0,733	0,678	0,619	0,605	0,568	0,517	0,471	0,444	0,409	0,370	0,347	0,308	0,276	0,275	0,275	0,275

Cuadro # 57 Pino a 70 ° C mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

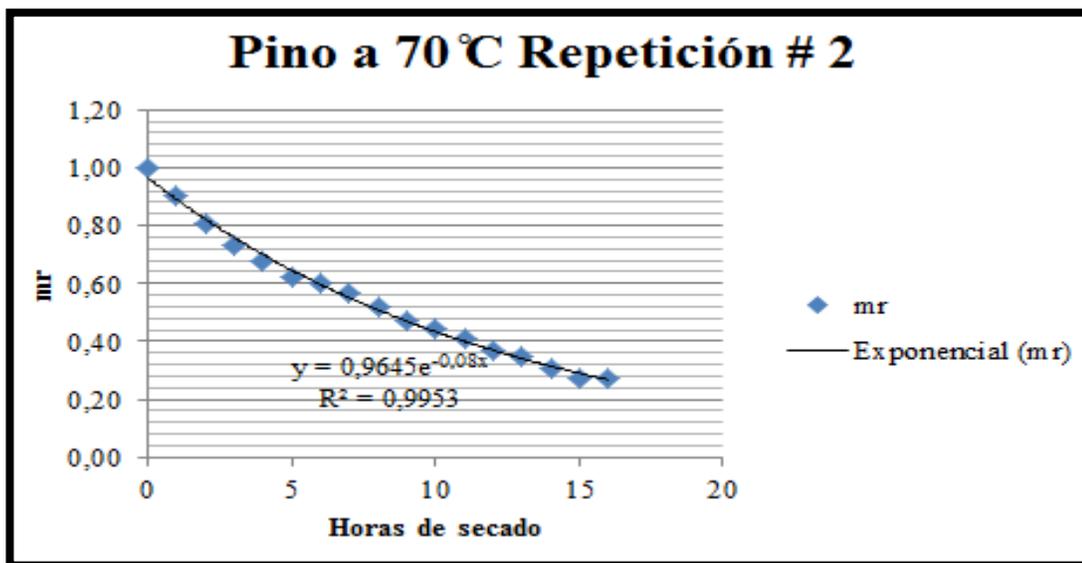


Figura # 62 Pino a 70 ° C mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ln mr	0,00	-0,105	-0,210	-0,310	-0,388	-0,479	-0,502	-0,566	-0,659	-0,753	-0,812	-0,894	-0,993	-1,059	-1,177	-1,287	-1,289	-1,290	-1,290

Cuadro # 58 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 2
 Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 63 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 2
 Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
mr	1,00	0,908	0,847	0,797	0,733	0,662	0,639	0,600	0,541	0,508	0,477	0,452	0,416	0,384	0,354	0,318	0,317	0,317	0,317

Cuadro # 59 Pino a 70 ° C mr Repetición # 3
 Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

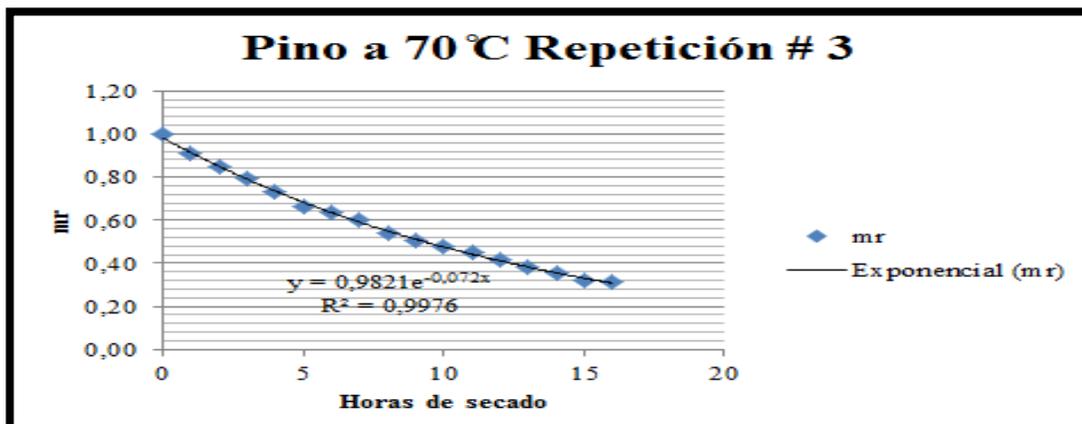


Figura # 64 Pino a 70 ° C mr Repetición # 3
 Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ln mr	0,00	-0,097	-0,166	-0,227	-0,311	-0,413	-0,448	-0,511	-0,615	-0,678	-0,740	-0,794	-0,878	-0,958	-1,039	-1,145	-1,148	-1,148	-1,148

Cuadro # 60 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

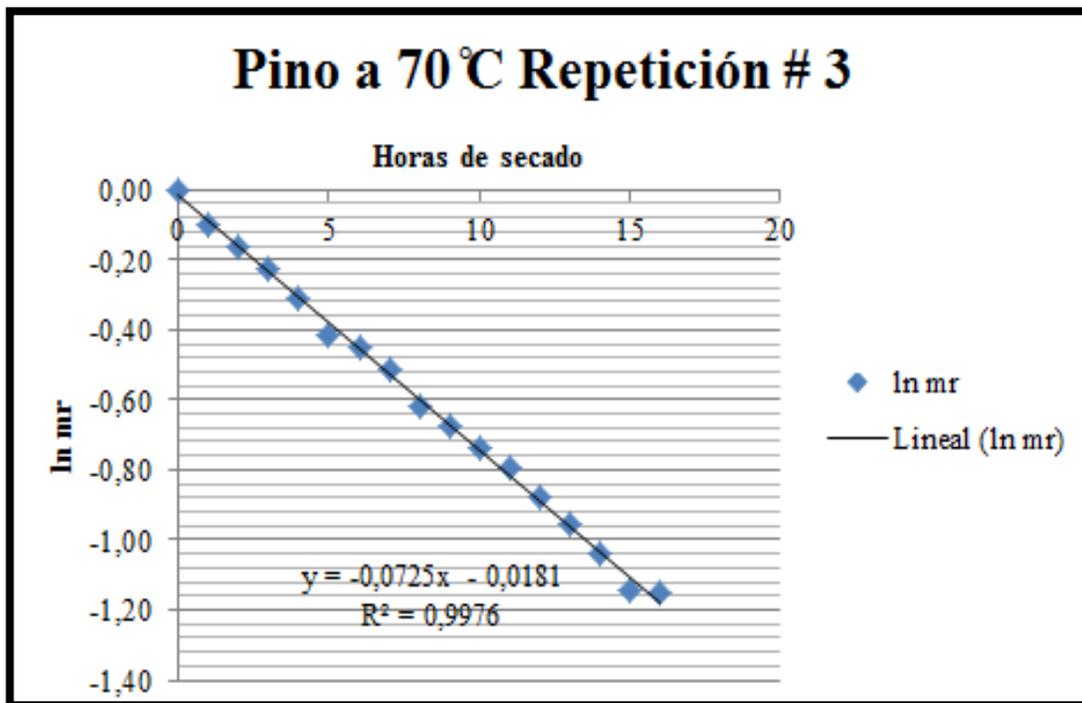


Figura # 65 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 3

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
mr	1,00	0,913	0,841	0,804	0,730	0,681	0,655	0,614	0,564	0,539	0,506	0,481	0,443	0,414	0,378	0,345	0,344	0,343	0,343

Cuadro # 61 Pino a 70 ° C mr Repetición # 4

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

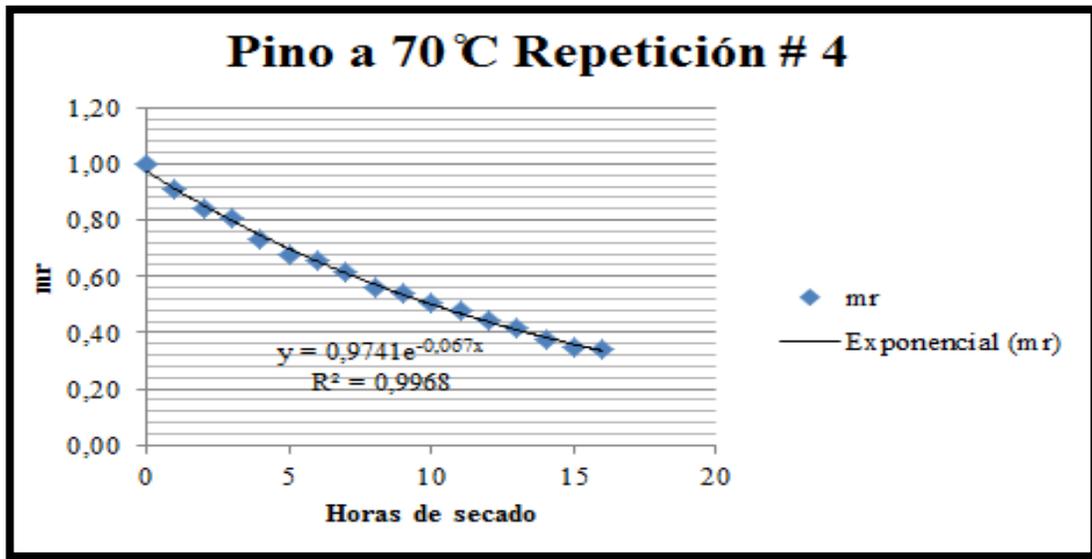


Figura # 66 Pino a 70 ° C mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																			
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ln mr	0,00	-0,091	-0,174	-0,218	-0,315	-0,385	-0,424	-0,487	-0,573	-0,619	-0,681	-0,731	-0,813	-0,882	-0,974	-1,064	-1,068	-1,069	-1,069

Cuadro # 62 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

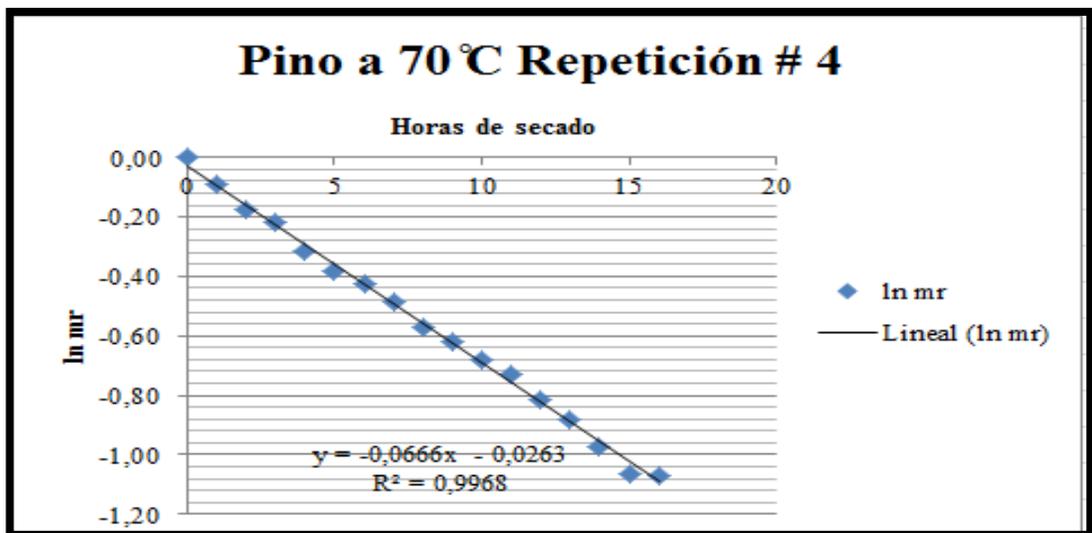


Figura # 67 Pino a 70 ° C ln mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pesos de secado del pino a 80 ° C

Repetición 1																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Peso	505,80	455,20	395,00	367,80	318,80	256,40	240,80	223,60	189,60	173,40	160,80	151,80	139,20	129,40	129,20	129,10	129,10

Cuadro # 63 Pino a 80 ° C Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Peso	507,40	460,10	399,20	369,30	321,40	263,30	242,60	227,05	191,60	177,70	163,25	155,40	142,15	137,50	137,30	137,20	137,20

Cuadro # 64 Pino a 80 ° C Repetición # 2

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Peso	503,10	459,10	387,60	367,20	323,00	277,15	253,80	233,60	198,20	180,25	169,40	158,00	147,40	139,10	138,80	138,70	138,70

Cuadro # 65 Pino a 80 ° C Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Peso	506,50	457,60	395,90	361,80	328,30	273,50	258,10	237,40	202,50	188,70	174,30	162,60	149,00	139,90	139,50	139,45	139,45

Cuadro # 66 Pino a 80 ° C Repetición # 4

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Determinación de mr y ln mr del pino a 80 ° C

Repetición 1																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
mr	1,00	0,900	0,781	0,727	0,630	0,507	0,476	0,442	0,375	0,343	0,318	0,300	0,275	0,256	0,255	0,255	0,255

Cuadro # 67 Pino a 80 ° C mr Repetición # 1
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

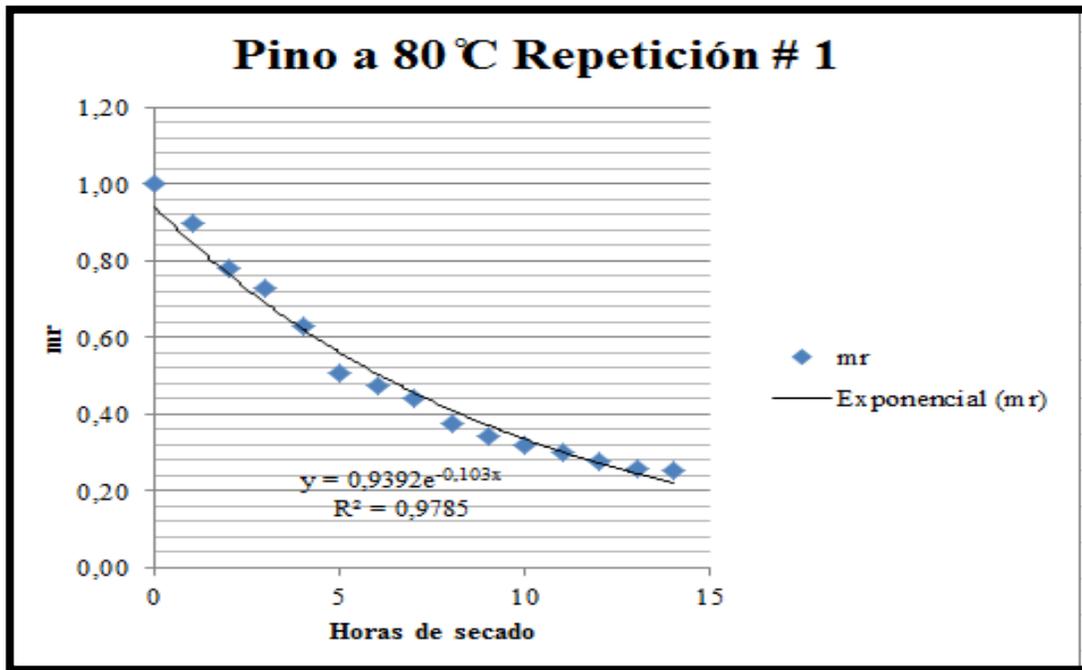


Figura # 68 Pino a 80 ° C mr Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 1																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ln mr	0,00	-0,105	-0,247	-0,319	-0,462	-0,679	-0,742	-0,816	-0,981	-1,071	-1,146	-1,204	-1,290	-1,363	-1,365	-1,366	-1,366

Cuadro # 68 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 1
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

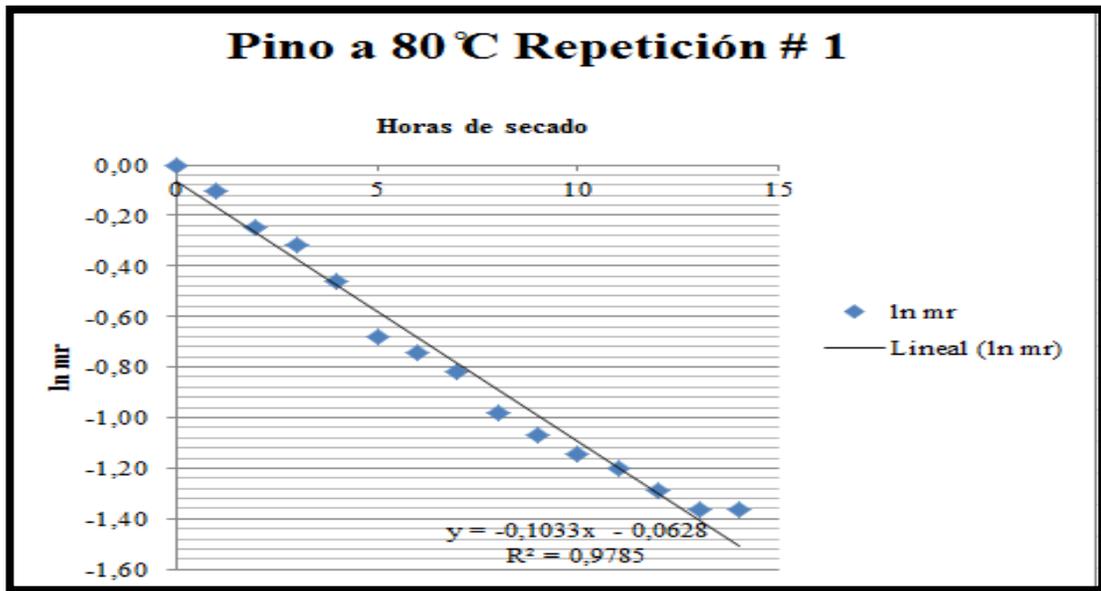


Figura # 69 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
mr	1,00	0,907	0,787	0,728	0,633	0,519	0,478	0,447	0,378	0,350	0,322	0,306	0,280	0,271	0,271	0,270	0,270

Cuadro # 69 Pino a 80 ° C mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

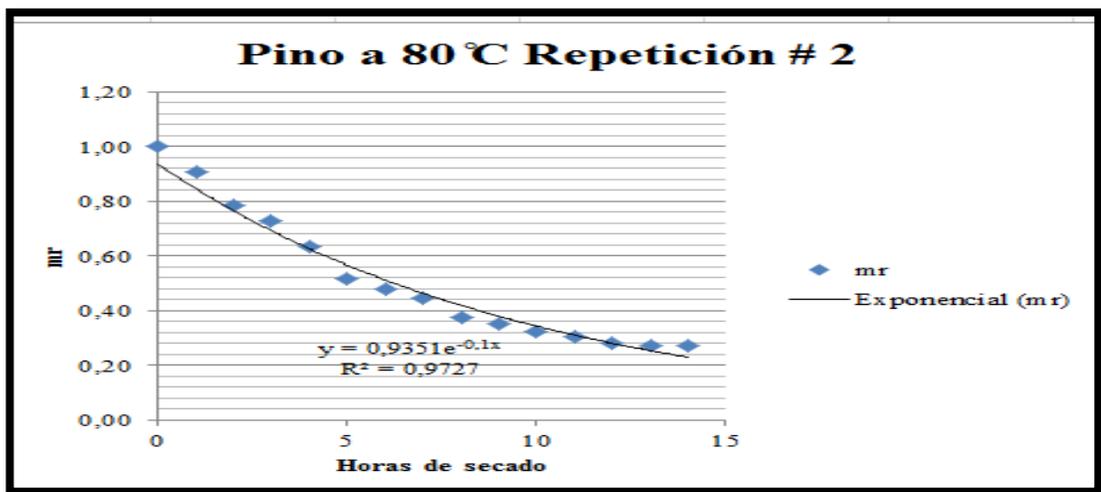


Figura # 70 Pino a 80 ° C mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ln mr	0,00	-0,098	-0,240	-0,318	-0,457	-0,656	-0,738	-0,804	-0,974	-1,049	-1,134	-1,183	-1,272	-1,306	-1,307	-1,308	-1,308

Cuadro # 70 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 2

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

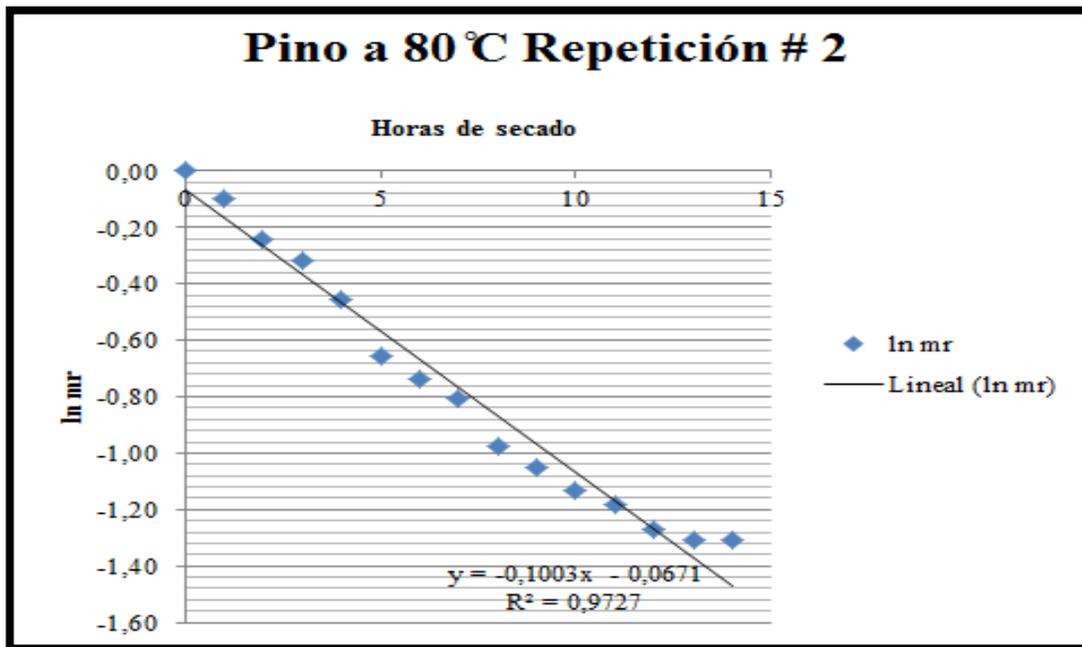


Figura # 71 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 2

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
mr	1,00	0,913	0,770	0,730	0,642	0,551	0,504	0,464	0,394	0,358	0,337	0,314	0,293	0,276	0,276	0,276	0,276

Cuadro # 71 Pino a 80 ° C mr Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

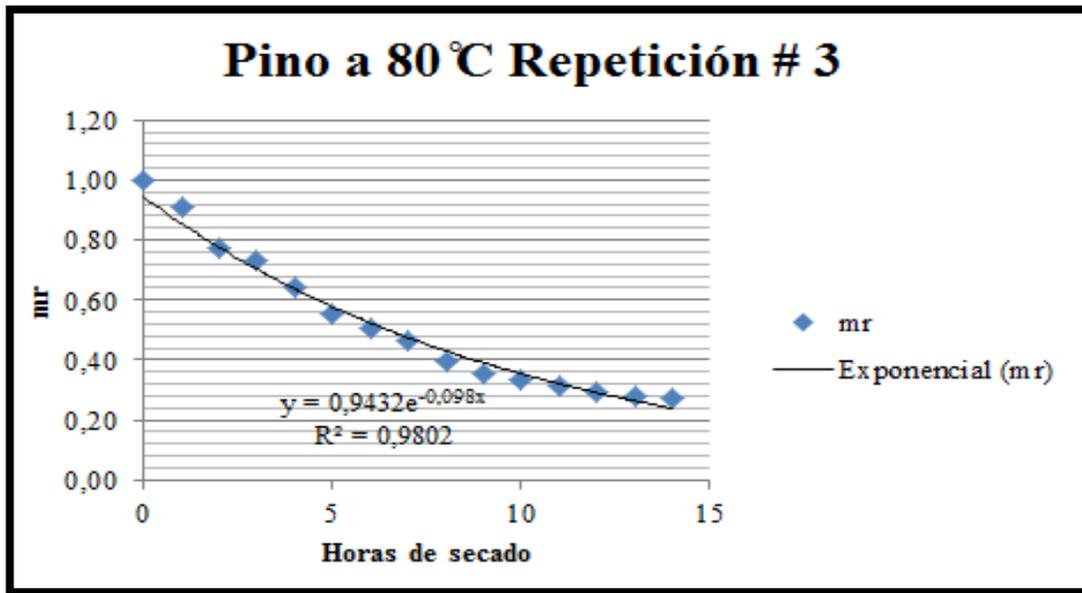


Figura # 72 Pino a 80 ° C mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ln mr	0,00	-0,092	-0,261	-0,315	-0,443	-0,596	-0,684	-0,767	-0,932	-1,026	-1,089	-1,158	-1,228	-1,286	-1,288	-1,288	-1,288

Cuadro # 72 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

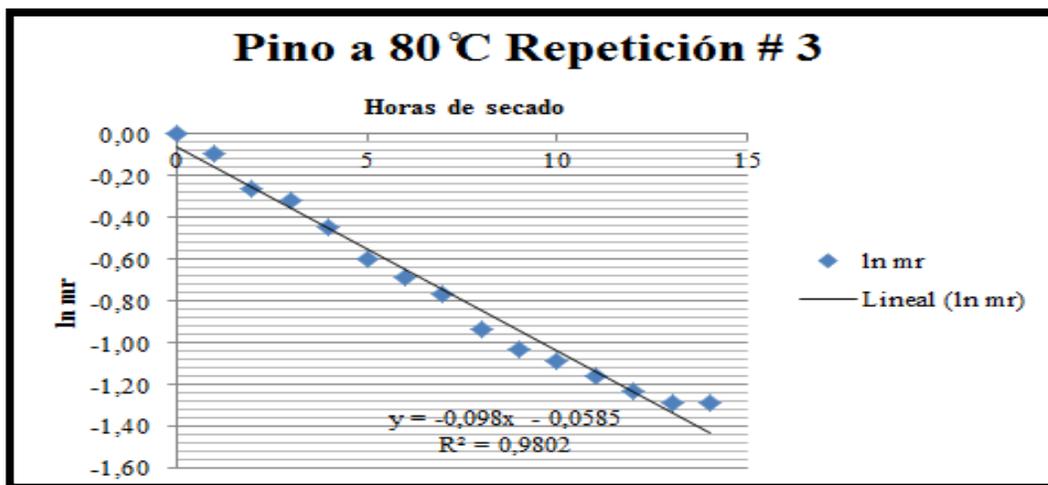


Figura # 73 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
mr	1,00	0,903	0,782	0,714	0,648	0,540	0,510	0,469	0,400	0,373	0,344	0,321	0,294	0,276	0,275	0,275	0,275

Cuadro # 73 Pino a 80 ° C mr Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

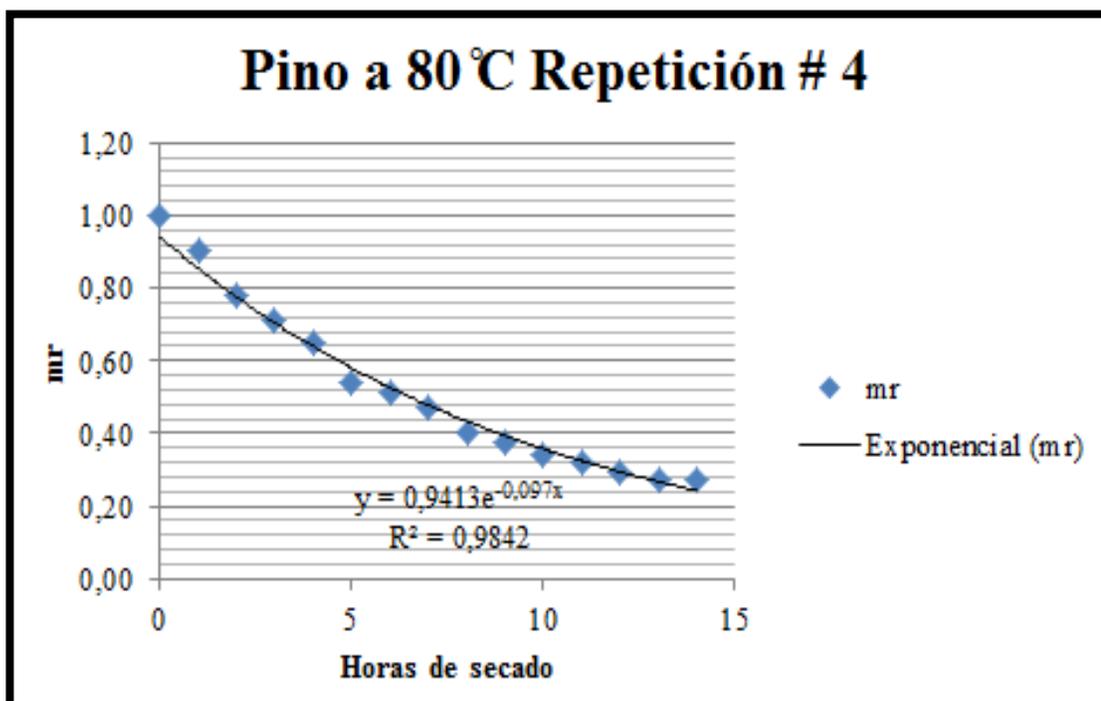


Figura # 74 Pino a 80 ° C mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																	
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ln mr	0,00	-0,102	-0,246	-0,336	-0,434	-0,616	-0,674	-0,758	-0,917	-0,987	-1,067	-1,136	-1,224	-1,287	-1,289	-1,290	-1,290

Cuadro # 74 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

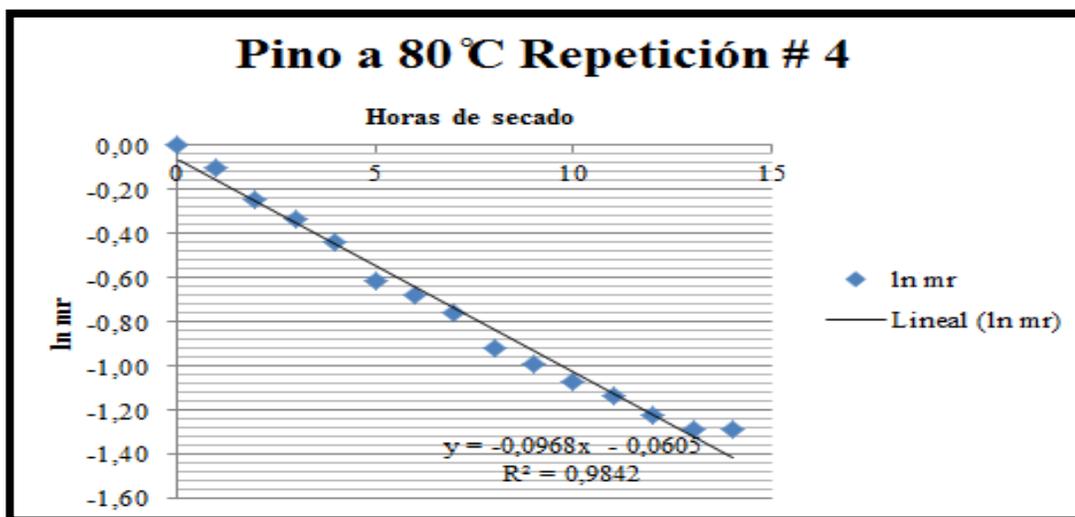


Figura # 75 Pino a 80 ° C ln mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Anexo # 2

EXPERIMENTOS DE SECADO DEL EUCALIPTO (Por repetición)

Pesos de secado del eucalipto a 60 ° C

Repetición 1																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Peso	908,40	860,80	796,80	730,80	684,40	626,80	581,60	554,00	532,40	505,20	490,10	465,80	435,60	407,70	381,20	352,90	325,30	315,70	315,00	314,60	314,10	314,10

Cuadro # 75 Eucalipto a 60 ° C Repetición # 1
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Peso	900,40	853,40	788,80	749,00	711,00	640,40	618,60	586,80	539,60	507,00	493,20	445,30	410,50	377,70	355,40	329,40	317,00	314,50	312,60	312,20	312,05	312,05

Cuadro # 76 Eucalipto a 60 ° C Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Peso	907,40	857,80	791,40	735,00	688,60	650,40	627,20	583,00	552,40	514,00	485,30	463,10	431,70	398,20	363,40	332,00	318,40	314,70	313,90	313,50	313,10	313,10

Cuadro # 77 Eucalipto a 60 ° C Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Peso	903,20	854,00	781,00	717,40	671,00	635,20	599,00	542,40	515,20	503,60	479,50	450,20	410,70	395,40	372,30	352,00	333,40	315,20	310,50	310,20	309,50	309,50

Cuadro # 78 Eucalipto a 60 ° C Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Determinación de mr y ln mr del eucalipto a 60 ° C

Repetición 1																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
mr	1,00	0,948	0,877	0,804	0,753	0,690	0,640	0,610	0,586	0,556	0,540	0,513	0,480	0,449	0,420	0,388	0,358	0,348	0,347	0,346	0,346	0,346

Cuadro # 79 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 1
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

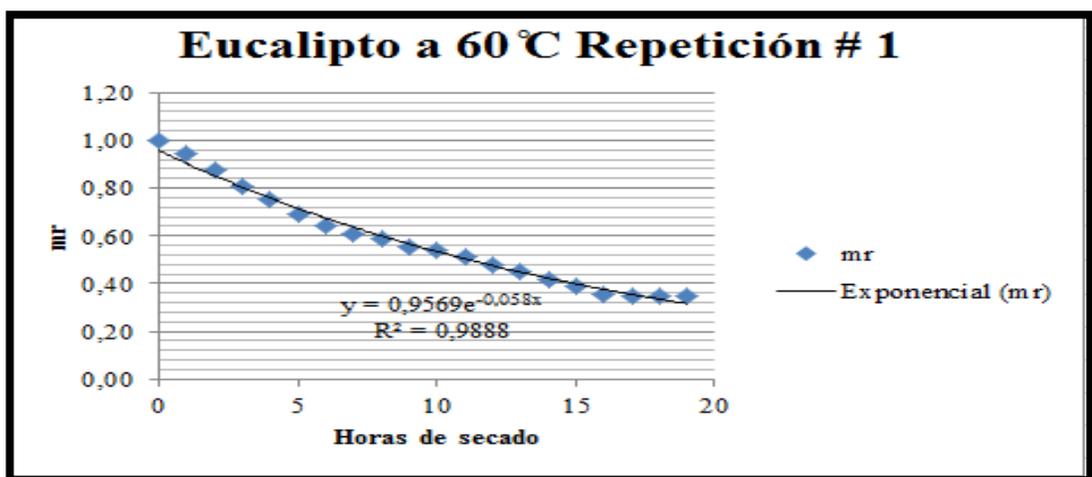


Figura # 76 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 1																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ln mr	0,00	-0,054	-0,131	-0,218	-0,283	-0,371	-0,446	-0,495	-0,534	-0,587	-0,617	-0,668	-0,735	-0,801	-0,868	-0,946	-1,027	-1,057	-1,059	-1,060	-1,062	-1,062

Cuadro # 80 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

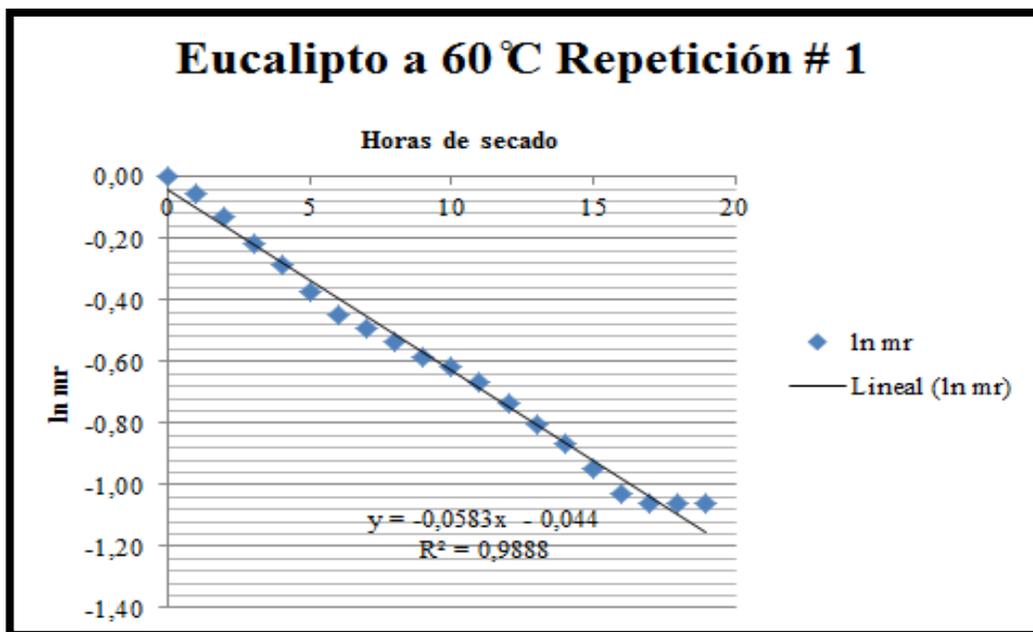


Figura # 77 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 1

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
mr	1,00	0,948	0,876	0,832	0,790	0,711	0,687	0,652	0,599	0,563	0,548	0,495	0,456	0,419	0,395	0,366	0,352	0,349	0,347	0,347	0,347	0,347

Cuadro # 81 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 2

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

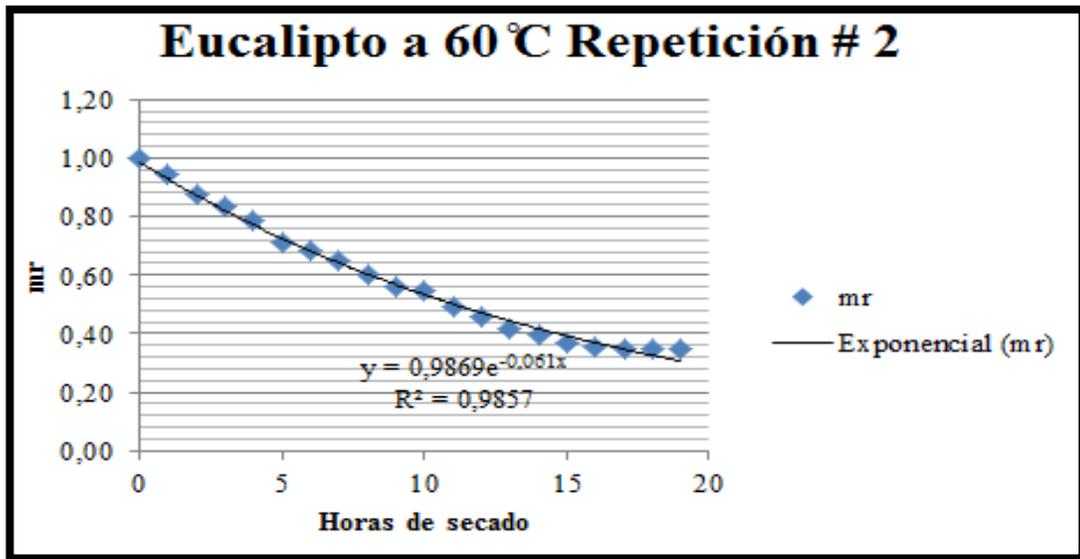


Figura # 78 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ln mr	0,00	-0,054	-0,132	-0,184	-0,236	-0,341	-0,375	-0,428	-0,512	-0,574	-0,602	-0,704	-0,785	-0,869	-0,930	-1,006	-1,044	-1,052	-1,058	-1,059	-1,060	-1,060

Cuadro # 82 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

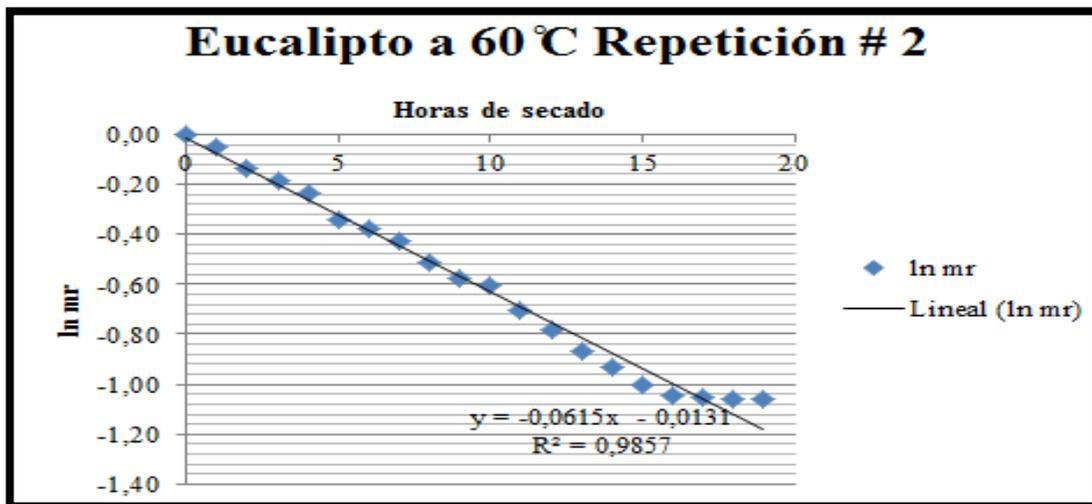


Figura # 79 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
mr	1,00	0,945	0,872	0,810	0,759	0,717	0,691	0,642	0,609	0,566	0,535	0,510	0,476	0,439	0,400	0,366	0,351	0,347	0,346	0,345	0,345	0,345

Cuadro # 83 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

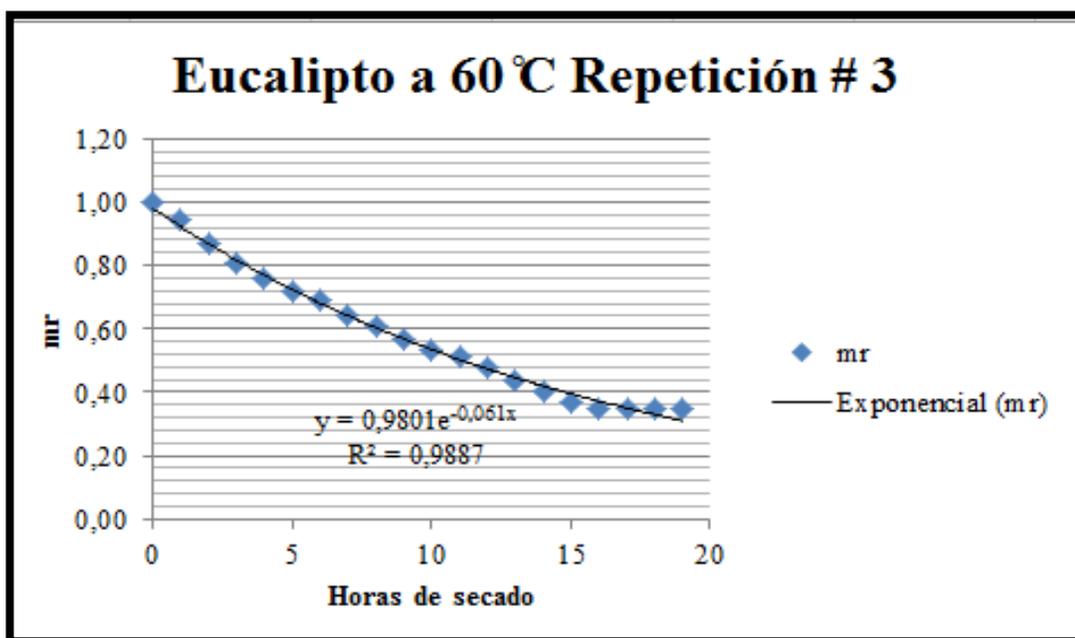


Figura # 80 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 3

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ln mr	0,00	-0,056	-0,137	-0,211	-0,276	-0,333	-0,369	-0,442	-0,496	-0,568	-0,626	-0,673	-0,743	-0,824	-0,915	-1,005	-1,047	-1,059	-1,062	-1,063	-1,064	-1,064

Cuadro # 84 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

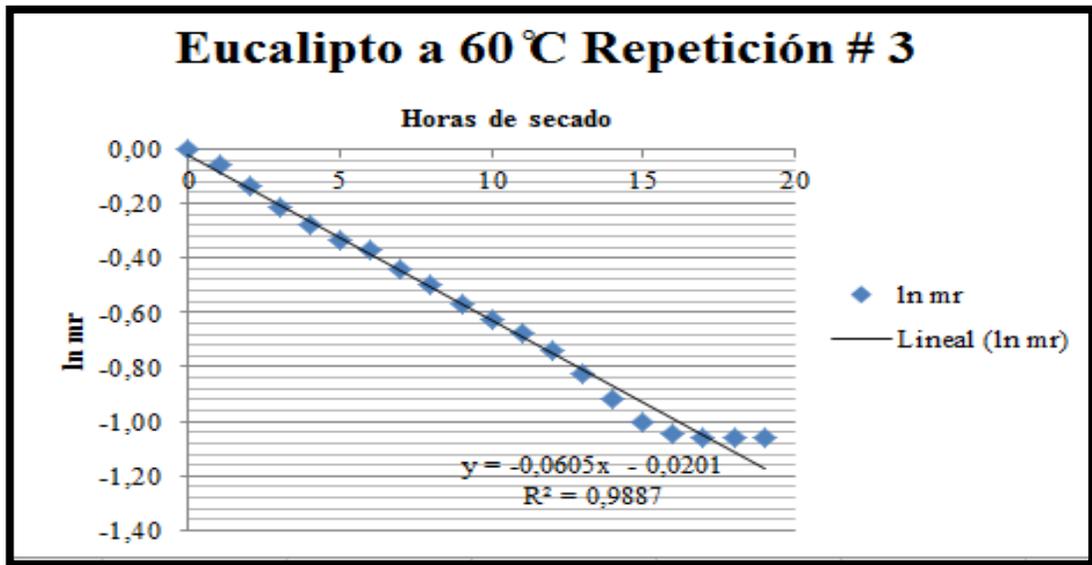


Figura # 81 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
mr	1,00	0,946	0,865	0,794	0,743	0,703	0,663	0,601	0,570	0,558	0,531	0,498	0,455	0,438	0,412	0,390	0,369	0,349	0,344	0,343	0,343	0,343

Cuadro # 85 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

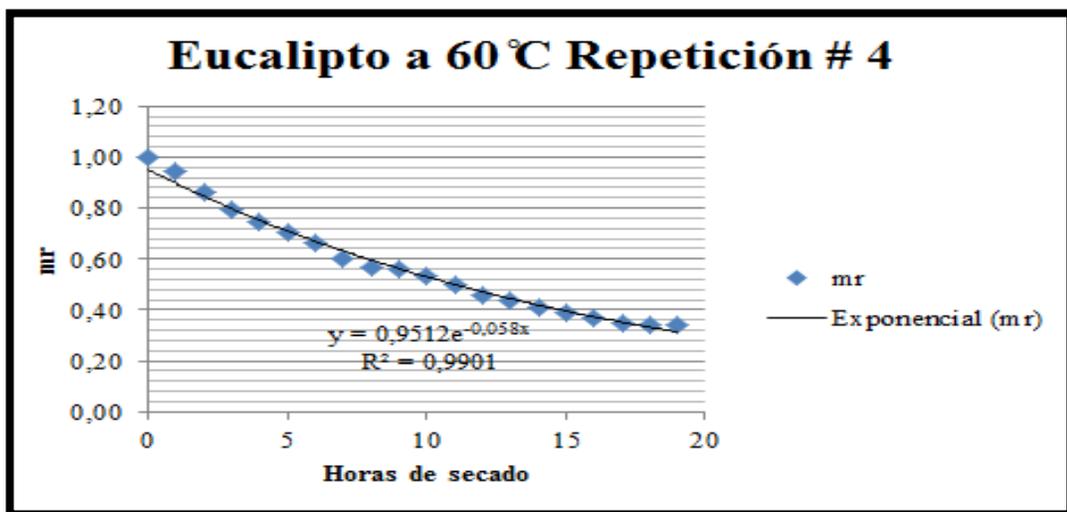


Figura # 82 Eucalipto a 60 ° C mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																						
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ln mr	0,00	-0,056	-0,145	-0,230	-0,297	-0,352	-0,411	-0,510	-0,561	-0,584	-0,633	-0,696	-0,788	-0,826	-0,886	-0,942	-0,997	-1,053	-1,068	-1,069	-1,071	-1,071

Cuadro # 86 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 4

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

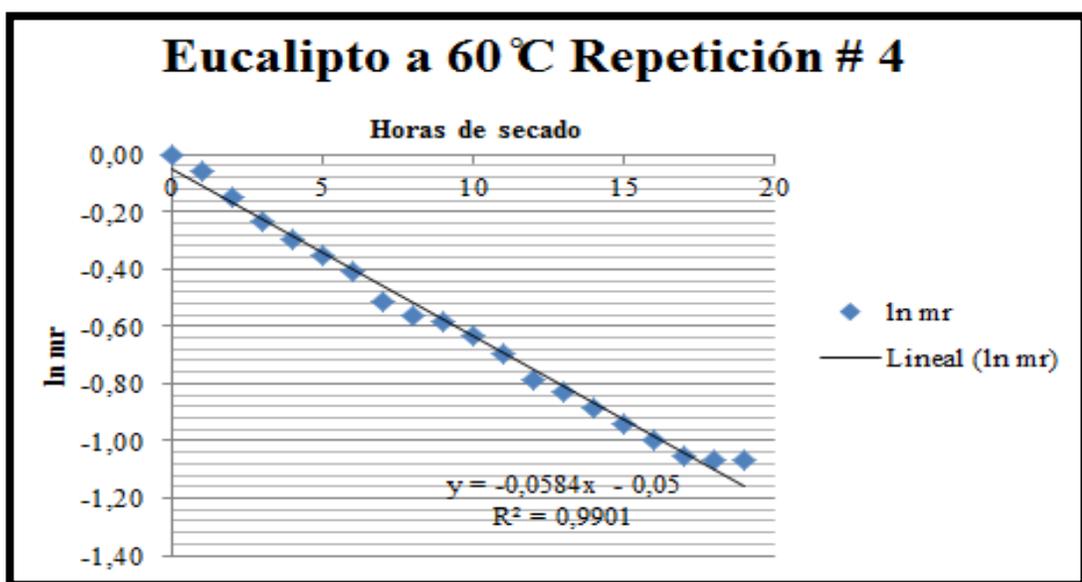


Figura # 83 Eucalipto a 60 ° C ln mr Repetición # 4

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pesos de secado del eucalipto a 70 ° C

Repetición 1																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	906,50	865,10	803,00	742,60	717,70	630,80	587,40	545,05	533,10	503,60	473,40	452,80	416,30	392,15	364,40	333,40	313,70	312,20	311,90	311,90

Cuadro # 87 Eucalipto a 70 ° C Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	903,00	842,20	792,50	746,10	715,40	635,15	606,30	592,60	555,10	512,90	493,00	456,30	417,10	388,40	362,70	325,50	311,10	308,50	308,20	308,20

Cuadro # 88 Eucalipto a 70 ° C Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	904,20	845,00	789,10	738,20	691,80	630,40	609,00	586,20	554,05	515,20	488,50	466,30	434,90	401,40	366,60	335,70	321,00	319,90	319,50	319,50

Cuadro # 89 Eucalipto a 70 ° C Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Peso	907,60	857,60	784,60	736,00	697,10	638,90	601,60	583,40	545,90	509,30	481,05	453,80	429,50	411,90	372,30	349,30	331,60	328,10	327,80	327,80

Cuadro # 90 Eucalipto a 70 ° C Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Determinación de m_r y $\ln m_r$ del eucalipto a 70 ° C

Repetición 1																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
m_r	1,00	0,954	0,886	0,819	0,792	0,696	0,648	0,601	0,588	0,556	0,522	0,500	0,459	0,433	0,402	0,368	0,346	0,344	0,344	0,344

Cuadro # 91 Eucalipto a 70 ° C m_r Repetición # 1
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

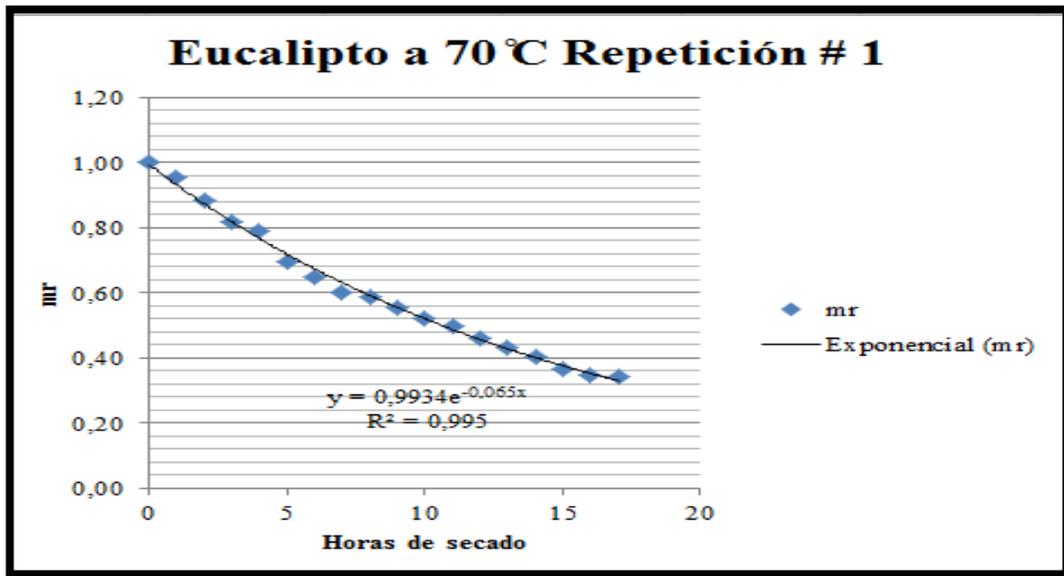


Figura # 84 Eucalipto a 70 ° C mr Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 1																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\ln mr$	0,00	-0,047	-0,121	-0,199	-0,234	-0,363	-0,434	-0,509	-0,531	-0,588	-0,650	-0,694	-0,778	-0,838	-0,911	-1,000	-1,061	-1,066	-1,067	-1,067

Cuadro # 92 Eucalipto a 70 ° C $\ln mr$ Repetición # 1
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

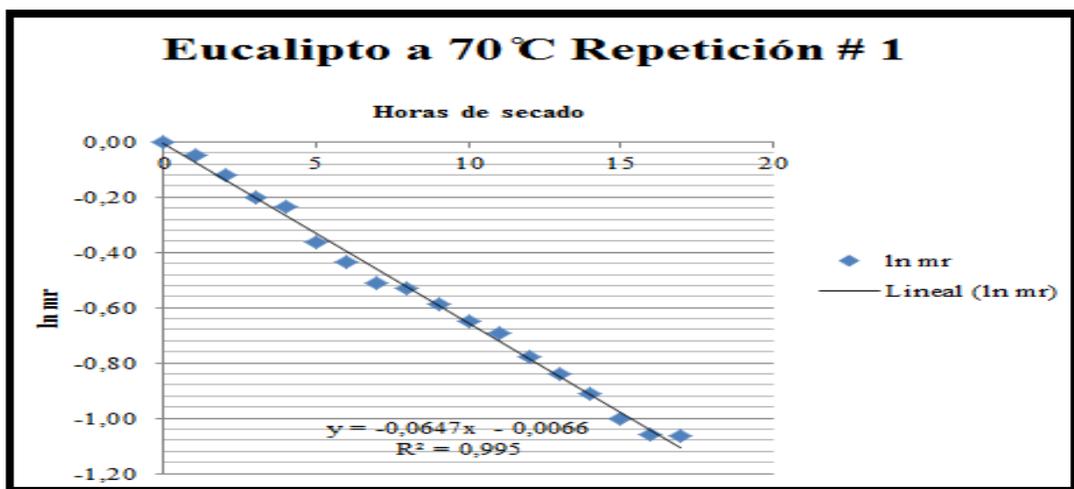


Figura # 85 Eucalipto a 70 ° C $\ln mr$ Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mr	1,00	0,933	0,878	0,826	0,792	0,703	0,671	0,656	0,615	0,568	0,546	0,505	0,462	0,430	0,402	0,360	0,345	0,342	0,341	0,341

Cuadro # 93 Eucalipto a 70 ° C mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

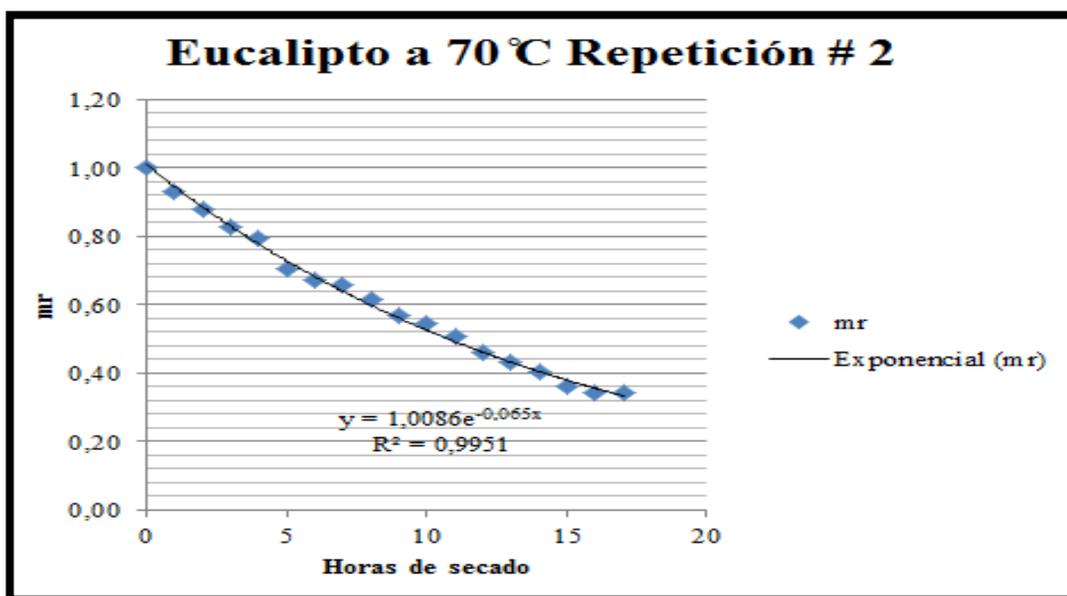


Figura # 86 Eucalipto a 70 ° C mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ln mr	0,00	-0,070	-0,131	-0,191	-0,233	-0,352	-0,398	-0,421	-0,487	-0,566	-0,605	-0,683	-0,772	-0,844	-0,912	-1,020	-1,066	-1,074	-1,075	-1,075

Cuadro # 94 Eucalipto a 70 ° C ln mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

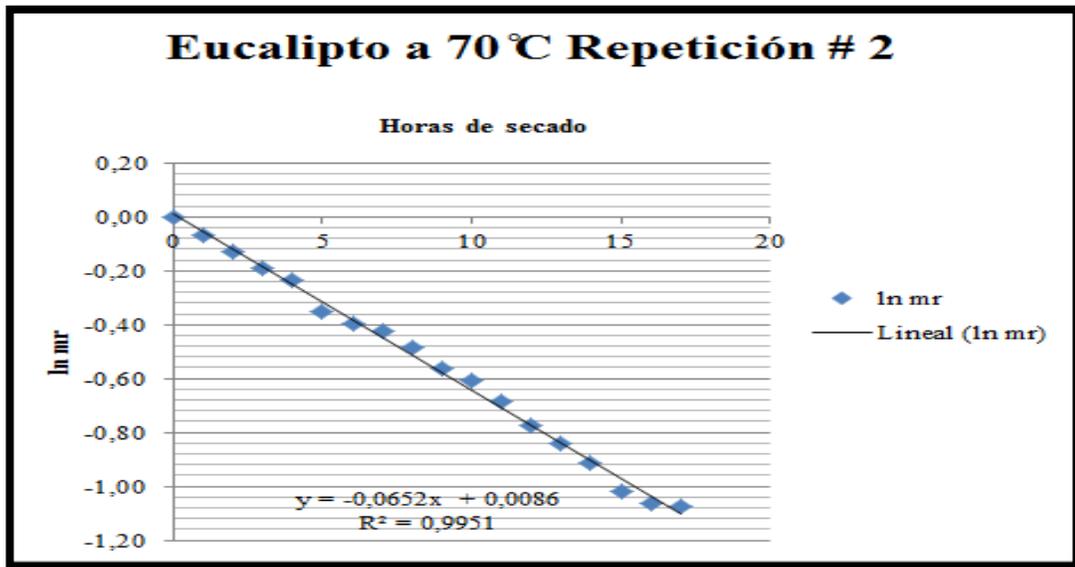


Figura # 87 Eucalipto a 70 °C ln mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mr	1,00	0,935	0,873	0,816	0,765	0,697	0,674	0,648	0,613	0,570	0,540	0,516	0,481	0,444	0,405	0,371	0,355	0,354	0,353	0,353

Cuadro # 95 Eucalipto a 70 °C mr Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

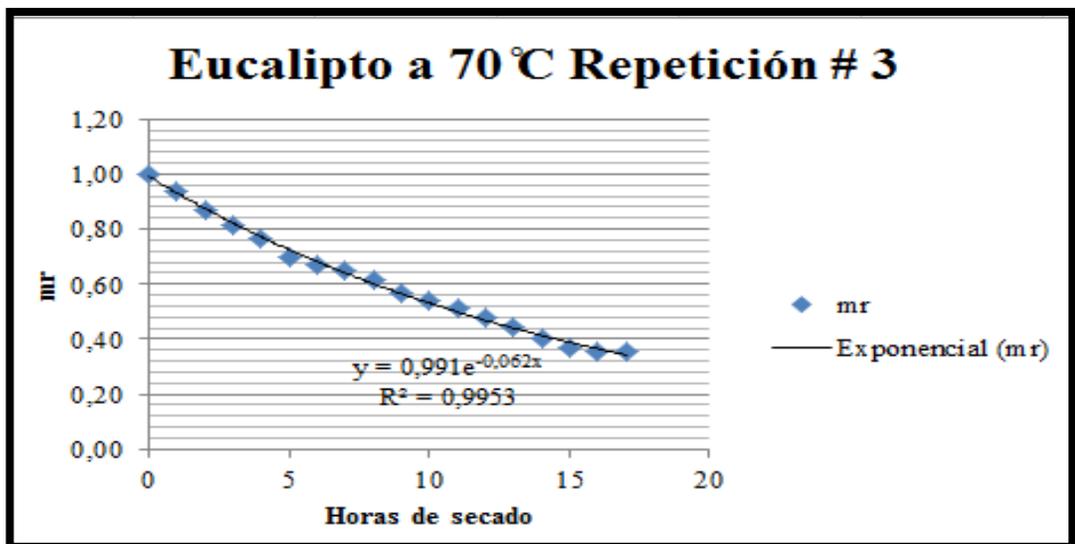


Figura # 88 Eucalipto a 70 °C mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ln mr	0,00	-0,068	-0,136	-0,203	-0,268	-0,361	-0,395	-0,433	-0,490	-0,562	-0,616	-0,662	-0,732	-0,812	-0,903	-0,991	-1,036	-1,039	-1,040	-1,040

Cuadro # 96 Eucalipto a 70 ° C ln mr Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

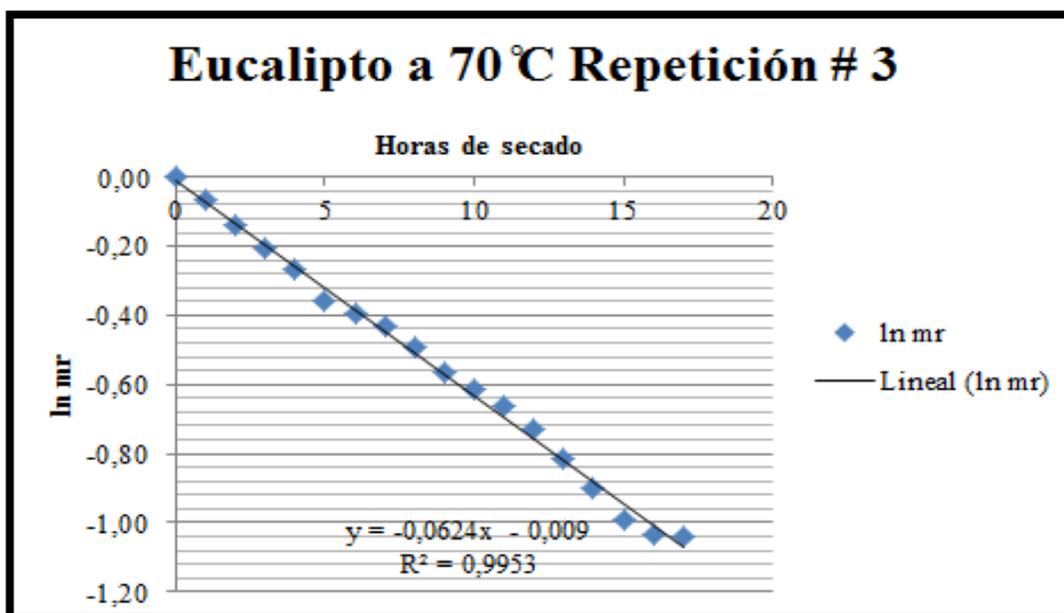


Figura # 89 Eucalipto a 70 ° C ln mr Repetición # 3

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
mr	1,00	0,945	0,864	0,811	0,768	0,704	0,663	0,643	0,601	0,561	0,530	0,500	0,473	0,454	0,410	0,385	0,365	0,362	0,361	0,361

Cuadro # 97 Eucalipto a 70 ° C mr Repetición # 4

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

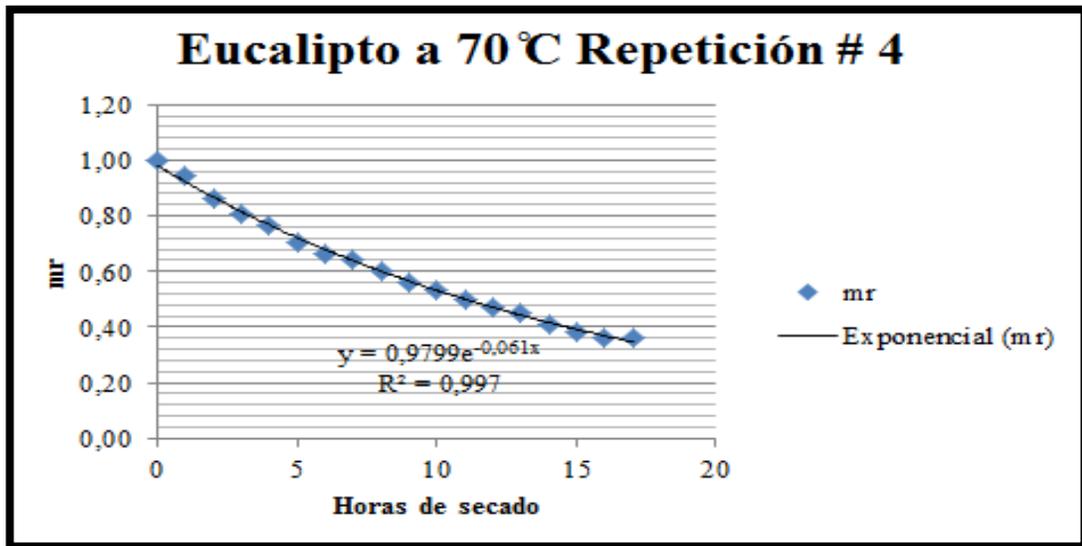


Figura # 90 Eucalipto a 70 °C mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																				
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ln mr	0,00	-0,057	-0,146	-0,210	-0,264	-0,351	-0,411	-0,442	-0,508	-0,578	-0,635	-0,693	-0,748	-0,790	-0,891	-0,955	-1,007	-1,017	-1,018	-1,018

Cuadro # 98 Eucalipto a 70 °C ln mr Repetición # 4
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

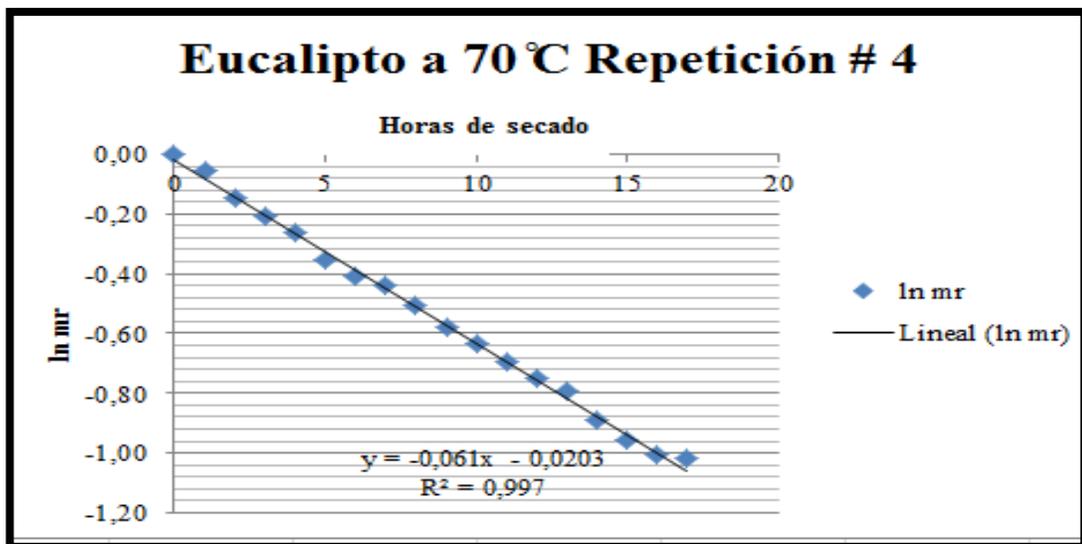


Figura # 91 Eucalipto a 70 °C ln mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Pesos de secado del eucalipto a 80 ° C

Repetición 1																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Peso	905,20	852,80	798,10	727,40	675,30	612,50	558,70	529,90	503,70	471,40	444,60	410,20	388,90	353,40	327,00	309,90	309,20	309,20

Cuadro # 99 Eucalipto a 80 ° C Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Peso	902,50	850,80	785,60	724,30	672,90	609,90	555,60	524,60	502,40	474,80	448,50	406,20	381,60	349,00	324,60	306,70	306,30	306,30

Cuadro # 100 Eucalipto a 80 ° C Repetición # 2

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Peso	904,60	853,20	789,40	734,60	676,80	614,90	560,40	527,20	505,60	477,20	451,80	409,50	385,80	354,50	328,10	309,00	308,60	308,60

Cuadro # 101 Eucalipto a 80 ° C Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Peso	907,40	856,10	792,40	737,80	679,00	618,05	564,20	530,60	509,50	481,50	454,30	412,30	388,60	357,00	331,80	312,60	312,10	312,10

Cuadro # 102 Eucalipto a 80 ° C Repetición # 4

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Determinación de mr y ln mr del eucalipto a 80 ° C

Repetición 1																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
mr	1,00	0,942	0,882	0,804	0,746	0,677	0,617	0,585	0,556	0,521	0,491	0,453	0,430	0,390	0,361	0,342	0,342	0,342

Cuadro # 103 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

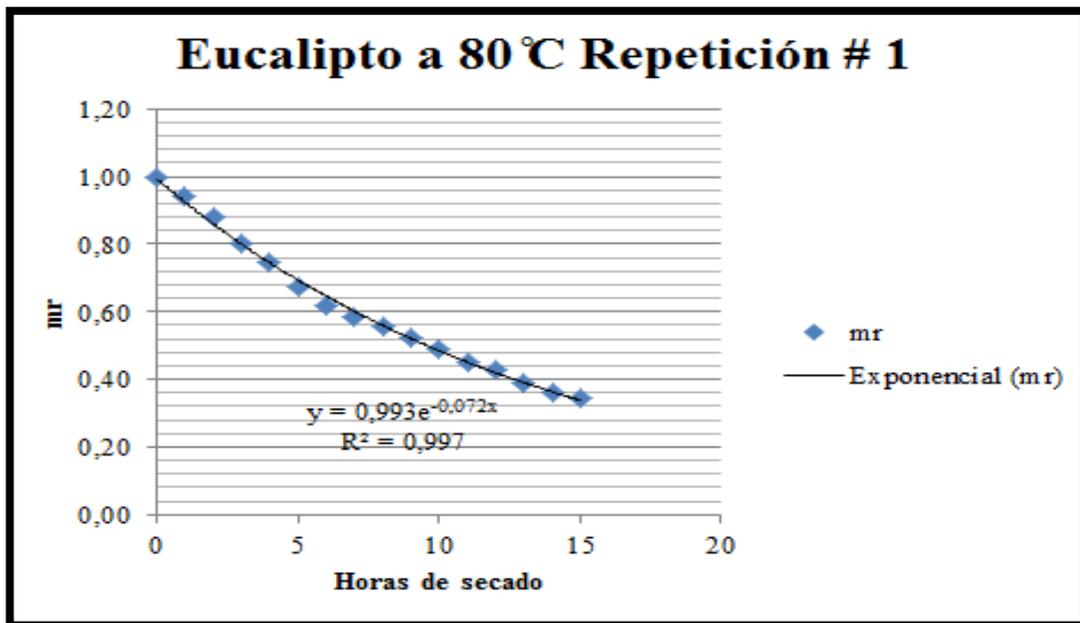


Figura # 92 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 1

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 1																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ln mr	0,00	-0,060	-0,126	-0,219	-0,293	-0,391	-0,483	-0,535	-0,586	-0,652	-0,711	-0,792	-0,845	-0,941	-1,018	-1,072	-1,074	-1,074

Cuadro # 104 Eucalipto a 80 ° C ln mr Repetición # 1

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

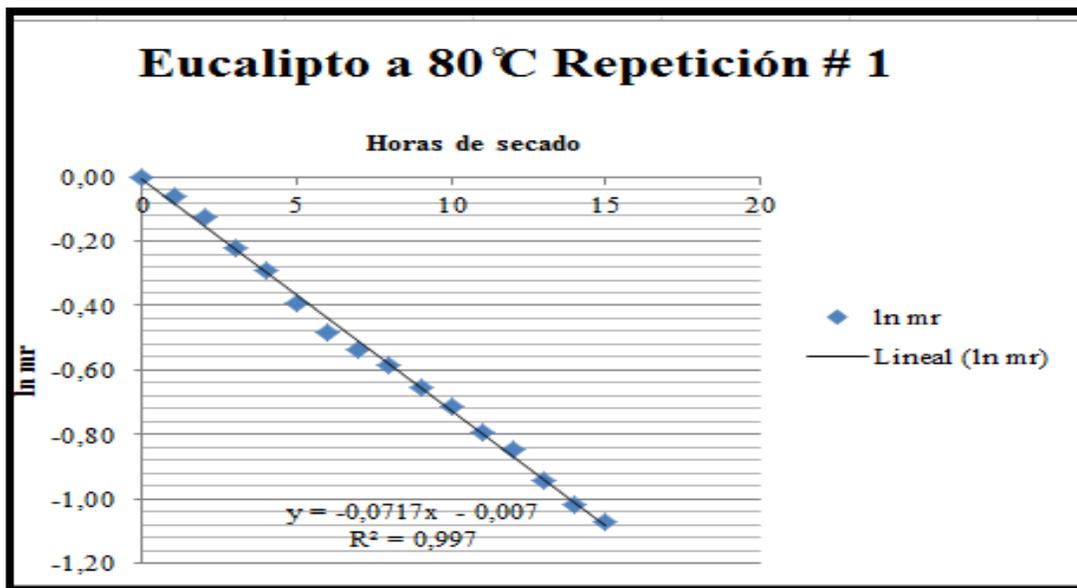


Figura # 93 Eucalipto a 80 ° C ln mr Repetición # 1
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
mr	1,00	0,943	0,870	0,803	0,746	0,676	0,616	0,581	0,557	0,526	0,497	0,450	0,423	0,387	0,360	0,340	0,339	0,339

Cuadro # 105 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 2
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

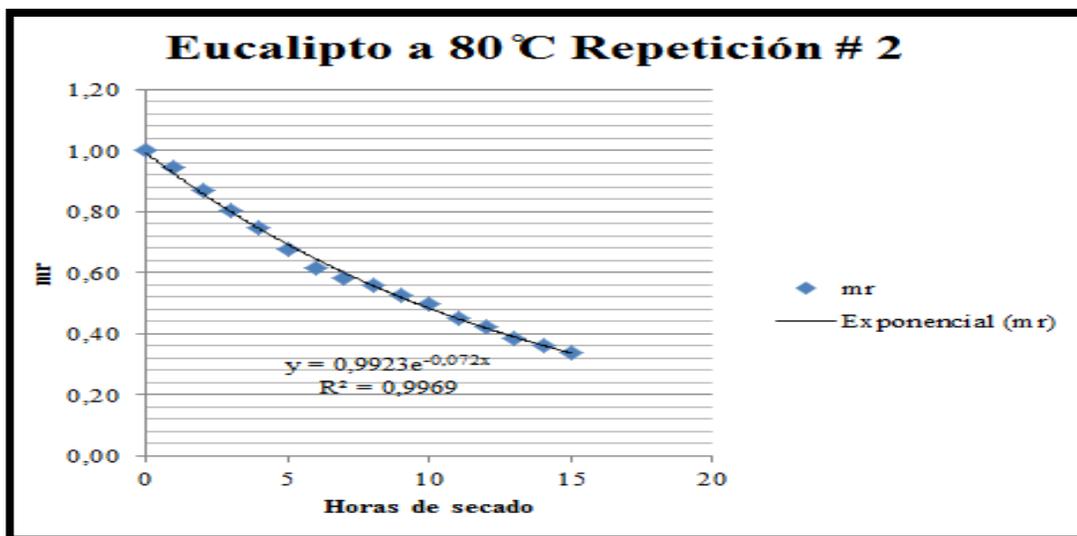


Figura # 94 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 2
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 2																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ln mr	0,00	-0,059	-0,139	-0,220	-0,294	-0,392	-0,485	-0,543	-0,586	-0,642	-0,699	-0,798	-0,861	-0,950	-1,023	-1,079	-1,081	-1,081

Cuadro # 106 Eucalipto a 80 ° C ln mr Repetición # 2

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

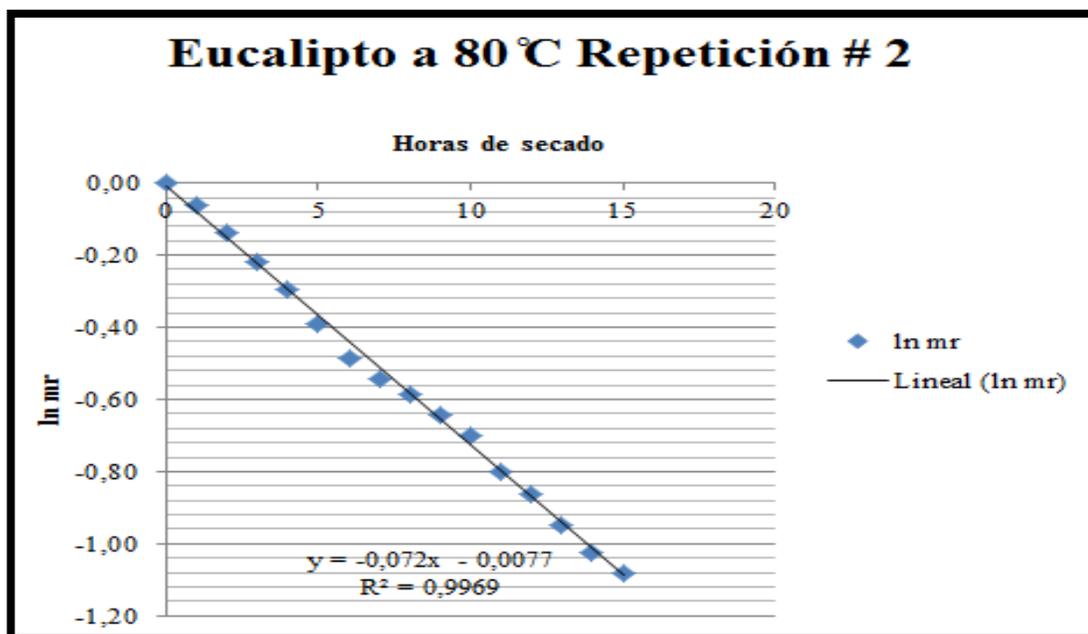


Figura # 95 Eucalipto a 80 ° C ln mr Repetición # 2

Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
mr	1,00	0,943	0,873	0,812	0,748	0,680	0,620	0,583	0,559	0,528	0,499	0,453	0,426	0,392	0,363	0,342	0,341	0,341

Cuadro # 107 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 3

Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

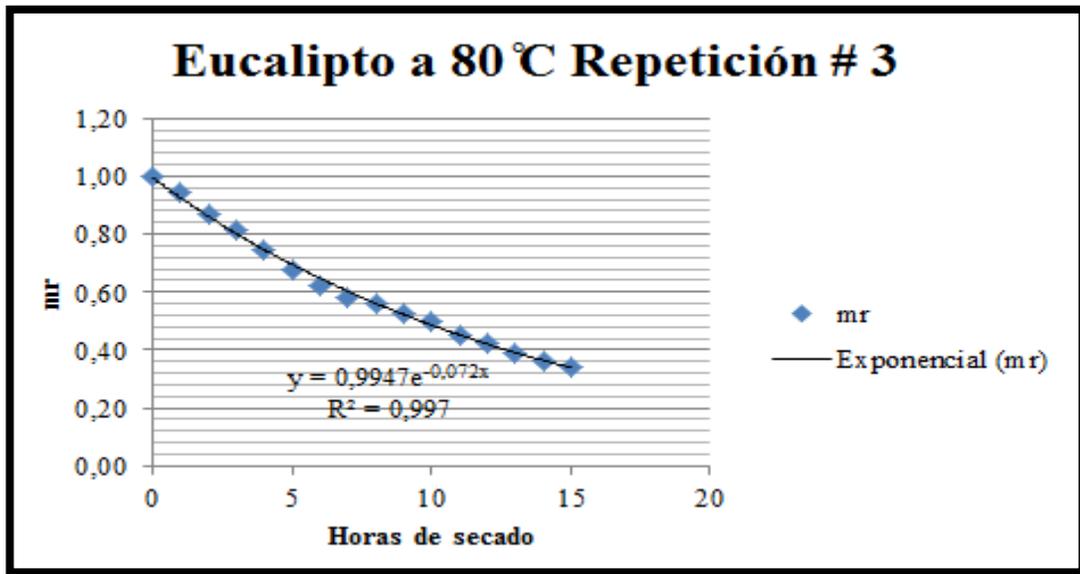


Figura # 96 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 3																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
In mr	0,00	-0,058	-0,136	-0,208	-0,290	-0,386	-0,479	-0,540	-0,582	-0,640	-0,694	-0,793	-0,852	-0,937	-1,014	-1,074	-1,075	-1,075

Cuadro #108 Eucalipto a 80 ° C In mr Repetición # 3
Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

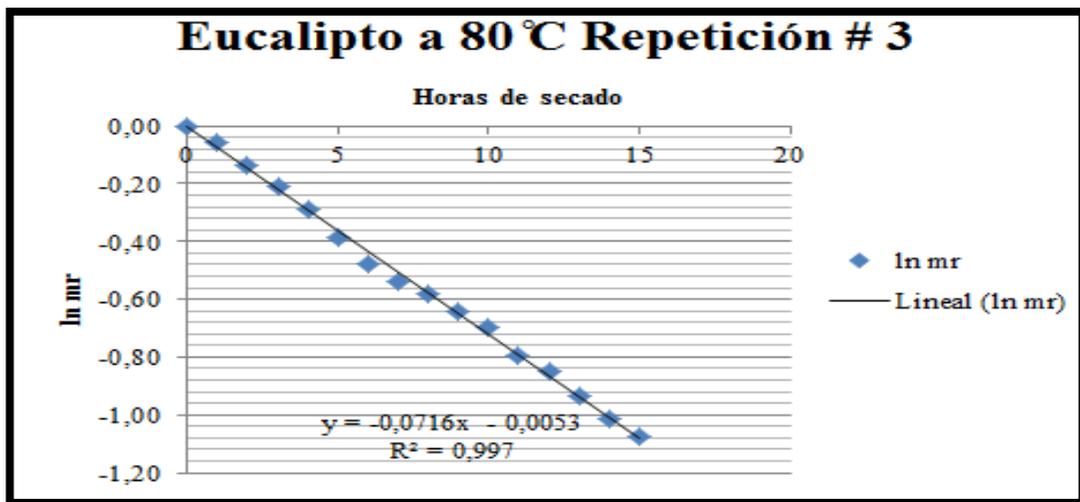


Figura # 97 Eucalipto a 80 ° C ln mr Repetición # 3
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
mr	1,00	0,943	0,873	0,813	0,748	0,681	0,622	0,585	0,561	0,531	0,501	0,454	0,428	0,393	0,366	0,345	0,344	0,344

Cuadro # 109 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 4
 Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

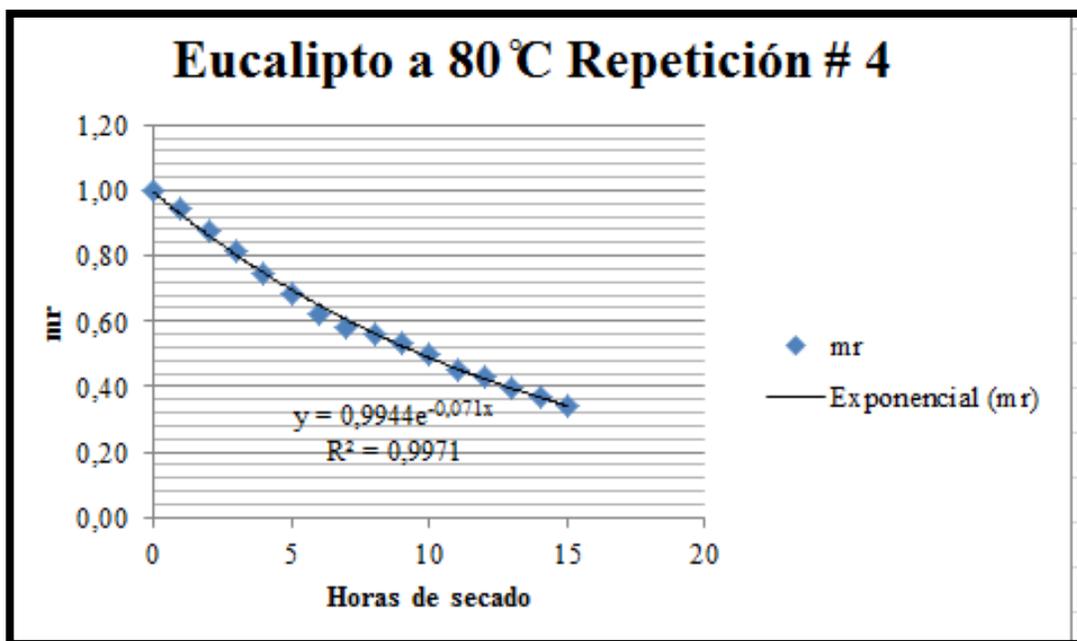


Figura # 98 Eucalipto a 80 ° C mr Repetición # 4
 Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Repetición 4																		
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ln mr	0,00	-0,058	-0,136	-0,207	-0,290	-0,384	-0,475	-0,537	-0,577	-0,634	-0,692	-0,789	-0,848	-0,933	-1,006	-1,066	-1,067	-1,067

Cuadro # 110 Eucalipto a 80 ° C ln mr Repetición # 4
 Elaborado: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

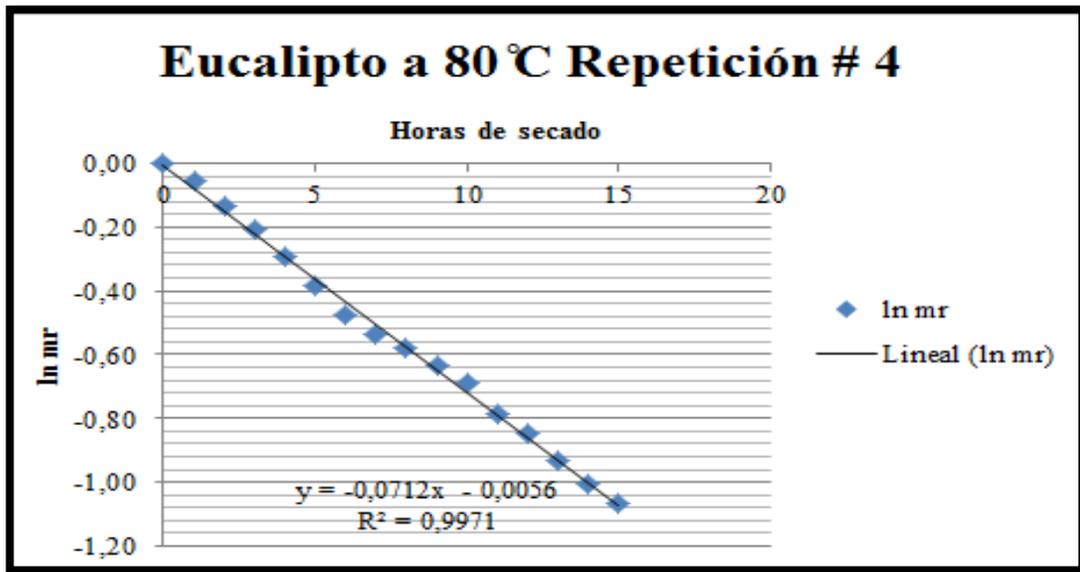


Figura # 99 Eucalipto a 80 °C ln mr Repetición # 4
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

Anexo # 3

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD INICIAL EN PINO Y EUCALIPTO (Método termobalanza)



Figura # 100 Determinación de humedad inicial en pino
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 101 Determinación de humedad inicial en eucalipto
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015



Figura # 102 Secado de muestras en termobalanza
Fuente: Bonifaz Nieto Josue David, 2015

PROGRAMA DE SECADO EUROPEO CTBA



TECNOLOGIA

Programas de secado más adecuados para las maderas más usadas en España



Hosiero Alvarez Noves
Javi Inacio Fernández-Golfín
Dico
Desarrollo de Insumos
Forestales
Laboratorio de Maderas
CTBA-IBA
Carretera de la Cometa, Km 7
28040 Madrid

Seguidamente se proponen los programas de secado más adecuados para el secado de las maderas comerciales de mayor demanda en España. Los programas de secado que se proponen están basados en las tablas de secado utilizadas por el CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement de Francia), de gran arraigo en la industria de la madera europea. Los programas adjuntos pueden ser empleados para todos los métodos de secado y para todos los gruesos de cada especie, excepto para el secado a alta temperatura y al vacío, para los que se emplearán programas especiales (Alvarez Noves y Fernández-Golfín, 1993;

Fernández-Golfín y Alvarez Noves, 1997) o las recomendaciones aportadas por los fabricantes de los secaderos. En el caso de que no sea posible alcanzar las exigencias de temperatura seca propuestas por los programas (lo que frecuentemente ocurre en los sistemas de secado por bomba de calor), se conservará en cada etapa el valor propuesto para la humedad de equilibrio de la madera y se empleará la temperatura seca más cercana, ajustándose en consecuencia la temperatura húmeda o humedad relativa del aire median-

te el empleo de gráficas de humedades de equilibrio como la adjunta. Ejemplo: supongamos que se quiere secar una madera de haya (programa 7) creada, que está al 30% de humedad, para lo cual es necesario programar en el secado una temperatura de 60°C y una humedad relativa del 70%. Si empleamos una bomba de calor que llega a 55°C, mantendremos esta temperatura así como la humedad de equilibrio de la tabla, 11%, y calcularemos en la gráfica de humedades de equilibrio la humedad relativa que para

una temperatura seca de 55°C produce una humedad de equilibrio del 11%, da 68%. Por tanto las condiciones a programar en el secadero serán de 55°C y 68% Hr. En el listado de especies comerciales que se propone, se incluye su denominación comercial más conocida, su nombre botánico, su densidad básica (Masa anhidra dividida por el volumen en verde), el programa sugerido y la velocidad de secado, de acuerdo esta última con la terminología adoptada en la tabla siguiente.

Tabla
Velocidad de secado

Velocidad	Nº de programas
Muy lento	1
Muy lento-lento	6
Lento	3
Lento-normal	2
Normal	7
Normal-rápido	9
Rápido	5
Rápido-Muy rápido	8
Muy rápido	4, 10, 11, 12

Cuando la especie a secar no figure entre las incluidas en esta lista, se elegirá como primera aproximación el programa correspondiente a una especie de densidad básica similar. En el caso de figurar varias se



TECNOLOGIA

elegirá el correspondiente a la especie de secado más lento.

Estos programas deben ser considerados como orientativos y de referencia. El conductor del secadero elaborará sus propios programas en función de los aquí expuestos, de su experiencia y del equipo que disponga.

Los programas de secado propuestos por el CTBA (por nosotros recomendados por su sencillez y corrección) son los que figuran a continuación, numerados del 1 al 12.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Azuero Novas, M. Fernández-Gouvi Saco, J.L. (1993). Análisis de diferentes métodos de control y programación al secado con vapor sobrecalentado. *Determinación del punto final del secado*. *Revista de Ingeniería Agrícola*, vol. 2(2):245-252.

Fernández-Gouvi Saco, J.L.; Azuero Novas, M. (1997). *Método de secado de maiz*. *En: ATMA*. ISBN 84-87551-15-4

Miguel Ángel Novas Juan Ignacio Fernández-Gouvi Saco
 Departamento de Ingeniería
 Forestal
 Laboratorio de Maíz
 CITA-IRIA
 Carretera de la Coruña Km 7
 50040 Madrid

NOMBRE COMERCIAL	NOMBRE BOTÁNICO	PROGRAMA DE SECADO	DENSIDAD SECA (kg/m ³)	VELOCIDAD DE SECADO
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	1	320	normal
Abad amarillo	Abies alba (MILL.)	2	320	lento - normal
Abad amarillo	Abies pinsapo	3	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	4	320	muy rápido
Abad blanco de ab	Abies balsamea (L.) Mill.	5	320	muy rápido
Abad blanco de ab	Abies balsamea (L.) Mill.	6	320	muy rápido
Abad rojo	Abies balsamea (L.) Mill.	7	320	muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	8	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	9	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	10	320	muy lento - lento
Abad rojo	Abies balsamea (L.) Mill.	11	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	12	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	13	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	14	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	15	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	16	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	17	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	18	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	19	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	20	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	21	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	22	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	23	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	24	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	25	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	26	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	27	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	28	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	29	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	30	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	31	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	32	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	33	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	34	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	35	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	36	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	37	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	38	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	39	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	40	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	41	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	42	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	43	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	44	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	45	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	46	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	47	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	48	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	49	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	50	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	51	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	52	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	53	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	54	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	55	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	56	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	57	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	58	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	59	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	60	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	61	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	62	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	63	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	64	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	65	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	66	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	67	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	68	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	69	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	70	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	71	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	72	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	73	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	74	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	75	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	76	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	77	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	78	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	79	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	80	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	81	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	82	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	83	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	84	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	85	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	86	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	87	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	88	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	89	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	90	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	91	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	92	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	93	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	94	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	95	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	96	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	97	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	98	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	99	320	rápido - muy rápido
Abad	Abies balsamea (L.) Mill.	100	320	rápido - muy rápido

PROGRAMA N° 1					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	30	27,5	82	17	-
35	30	27	80	16	-
30	40	36,5	80	15	2
28	45	41	77	14	2
25	50	44	70	11,5	2,2
22	55	48	67	11	2,2
20	60	50	57	8,5	2,4
18	60	47,5	50	7,5	2,4
15	65	49	42	6	2,5

PROGRAMA N° 7					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	50	47	85	17	-
35	50	46	80	15	-
32	55	50	75	13	-
30	60	53	70	11	2,7
25	65	55,5	62	9	2,8
20	70	57	52	7	2,9
15	70	50	35	5	3

PROGRAMA N° 2					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	50	47	85	17	-
35	50	46	80	15	-
30	55	50,5	77	13,5	2,2
28	55	49	72	12	2,3
25	60	52	65	10	2,5
20	65	53,5	55	7,5	2,7
15	70	50	35	5	3

PROGRAMA N° 8					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	60	57	85	16	-
35	60	56	80	14	-
32	60	53	70	11	-
30	65	57	67	10	3
28	65	55,5	62	9	3,1
25	70	60	60	8	3,1
20	70	57	52	7	2,9
15	70	50	35	5	3

PROGRAMA N° 3					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	50	47	85	17	-
35	50	45	75	13	-
30	50	44	70	11,5	2,6
25	60	52	65	9,5	2,6
20	60	47,5	50	7,5	2,7
15	65	47	37	5,5	2,7

PROGRAMA N° 9					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	50	47	85	17	-
35	55	50	75	12,5	-
30	60	52	65	9,5	3,2
25	65	54	55	7,8	3,3
20	70	54	45	6	3,3
15	75	53	35	4,3	3,5

PROGRAMA N° 4					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	80	77,5	90	16	-
35	80	76,5	85	14	-
30	80	75	80	12	2,5
25	80	73	75	10	2,5
20	80	68	58	7	2,9
15	80	60	40	5	3

PROGRAMA N° 10					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	70	66,5	85	15	-
35	70	66	83	14	-
32	70	65	80	13	-
30	70	62,5	70	10	3
28	75	66	65	9	3,1
25	75	64	60	8	3,1
20	75	59	47	6	3,3
15	80	58	35	4,3	3,5

PROGRAMA N° 5					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	60	57	85	15,5	-
35	60	56	80	13,5	-
30	65	59	75	11,5	2,6
25	65	57	65	9,5	2,6
20	70	57	52	7	2,9
15	70	50	35	5	3

PROGRAMA N° 11					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	70	66,5	85	15	-
35	70	66	83	14	2,5
32	70	63	72	10,7	3
30	75	66	65	8,6	3,5
28	75	64	60	7,8	3,6
25	75	60	50	6,5	3,8
20	80	60	40	5	4
15	80	54	28	3,7	4

PROGRAMA N° 6					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	40	37,5	85	18	-
35	40	36	75	14	-
32	40	34	65	11	-
30	45	37	60	11	2,7
25	55	45,5	58	9	2,7
20	60	47	48	7	2,9
15	70	50	35	5	3

PROGRAMA N° 12					
Humedad de la madera %	Temperatura:		Humedad relativa del aire %	Humedad de Equivalencia %	Gradiente de secado G
	Seca °C	Húmedo °C			
Verde	65	62	85	15	-
35	65	59	75	12	-
32	65	57	65	9,5	-
30	70	58	55	7,5	4
28	70	57	52	7	4
25	75	60	48	6,2	4
20	80	60	40	5	4