UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL

PERFECCIONAMIENTO DE UN PROGRAMA DE SECADO PARA MADERA DE *Miroxylon balsamun* Harms (ESTORAQUE) A NIVEL LABORATORIO, EN LA CIUDAD DE PUCALLPA - PERÚ

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO FORESTAL

PRESENTADO POR:

LUIS ORLANDO ALVAREZ ACUÑA

PUCALLPA – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL

COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS Nº 388

En la ciudad de Pucallpa, siendo las 11:20 a.m. del día viernes 22 de febrero del 2019, de acuerdo a lo dispuesto por el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Ucayali, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador en los ambientes del Auditorio de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, la misma que estuvo conformado por;

- ✓ Dr. Carlos Panduro Carbajal (Presidente)
- ✓ Dra. Maria Angelica Flores Romayna (Miembro)
- ✓ Ing. M. Sc. Moises Torres Velasco (Miembro)

Se procedió a evaluar la sustentación de tesis denominado **"Perfeccionamiento de un programa de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel laboratorio, en la ciudad de Pucallpa – Perú",** presentado por el Bach. Luis Orlando Alvarez Acuña, asesorado por el Dr. Manuel Ivan Salvador Cardenas, habiendo finalizado la sustentación, se procedió a la formulación de preguntas por parte del Jurado Evaluador, las que fueron absueltas por el sustentante, en consecuencia, la tesis fue **APROBADO POR UNANIMIDAD Y RECOMENDACIÓN DE PUBLICACIÓN**, quedando expedito para el otorgamiento del TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL, después de las correcciones respectivas. Siendo las 12:10 p.m. horas del mismo día, se da por finalizado el acto académico firmando los miembros en señal de conformidad.

Dr. Carlos Panduro Carbajal
(Presidente)

Dra. Maria Angelica Flores Romayna
(Miembro)

Ing. M. Sc. Moises Torres Velasco
(Miembro)

ACTA DE APROBACIÓN

Tesis aprobada por el jurado de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali, conformado por:

Dr. Carlos Panduro Carbajal
Presidente

Dra. Maria Angelica Flores Romayna
Miembro

Ing. M. Sc. Moises Torres Velasco
Miembro

Dr. Manuel Iván Salvador Cárdenas
Asesor

Bach. Luis Orlando Alvarez Acuña
Tesista

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
VICERRECTORADO DE INESTIGACION
DIRECCION GENERAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Constancia

N° 086

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACION SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

La Dirección General de Producción Intelectual, hace constar por la presente, que el PROYECTO DE INVESTIGACION titulado:

"PERFECCIONAMIENTO DE UN PROGRAMA DE SECADO PARA MADERA DE Miroxylon balsamun Harms (ESTORAQUE) A NIVEL LABORATORIO, EN LA CIUDAD DE PUCALLPA - PERÚ"

Cuyo autor es:

Luis Orlando, Álvarez Acuña

Asesor: **Dr. Manuel Iván, Salvador Cárdenas**

Escuela: **Ingeniería Forestal**

Facultad: **Ciencias Forestales y Ambientales**

Después de realizado el análisis correspondiente en el Sistema Antiplagio, dicho documento presenta un porcentaje de similitud de **08%.**

El tal que de acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en la DIRECTIVA DE USO

DEL SISTEMA ANTIPLAGIO (10%), en el artículo 9: "Criterios de porcentaje de similitud". Se declara, que dicho trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de plagio, por lo que SI se aprueba su originalidad.

En señal de verificación se FIRMA Y SELLA la presente constancia.

Fecha: 06/03/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYAL
DIRECCION GENERAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL
DRA. DINA PARI QUISPE
Direc. Gral Prod Intel

Firma: _____

REPOSITORIO DE TESIS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, Luis Orlando Alvarez Acuña
Autor de la TESIS titulada:
"Perfeccionamiento de un programa de secado para madera Miroxylon balsamum Harms (estoraque) a nivel laboratorio, en la ciudad de Pucallpa - Perú"

Sustentada el año: 2019
Con la asesoría de: Dr. Manuel Ivan Salvador Cardenas
En la Facultad de: Ciencias Forestales y Ambientales
Escuela Profesional de: Ingeniería Forestal

Autorizo la publicación de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali, bajo los siguiente términos: Primero: otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en forma digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones. Segundo: declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas. Tercero: autorizo la publicación,

- [x] Total (significa que todo el contenido de la tesis en PDF será compartido en el repositorio).
- [ ] Parcial (significa que solo la carátula, la dedicatoria y el resumen en PDF serán compartidos en el repositorio).

De mi TESIS de investigación en la página web del Repositorio Institucional de la UNU.
En señal de conformidad firma la presente autorización.

Fecha: 06 / 03 / 2019

Email: luis_orlando.aa@hotmail.com Firma: Luis

Teléfono: 935 800 059 DNI: 70750587

DEDICATORIA

A DIOS por bendecir mis días y brindarme la salud necesaria para realizar mis proyectos de vida, A mi madre y Padre; Ofelia Acuña Campos y Rafael Alvarez Daza, por apoyarme en todo momento bajo el convencimiento de que la educación es el mayor legado que se le puede dar a un hijo. A toda mi Familia que a lo largo de estos años contribuyeron para la materialización de este momento.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor, Dr. Manuel Iván Salvador Cárdenas, por brindarme las enseñanzas y dedicar su tiempo para el enriquecimiento de este documento.

A mi co-asesor, Ing. Mg.Sc. Aldo Joao Cardenas Oscanoa, por la amistad sincera y el apoyo brindado desde el génesis de esta investigación.

Al CITEforestal Pucallpa y al Ing. Kevin Isaac Rodriguez Vasquez, por brindarme todas las facilidades para la ejecución de los ensayos.

A todas las personas que directa e indirectamente han contribuido en la recopilación de los datos y a las que cada día me alientan a seguir logrando mis metas.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

DEDICATORIA ..... **VI**
AGRADECIMIENTO ..... **VII**
ÍNDICE DEL CONTENIDO ..... **VIII**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **XI**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XIII**
RESUMEN ..... **XV**
SUMMARY ..... **XVI**
INTRODUCCIÓN **1**
CAPITULO I **3**
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **3**
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA **3**
CAPITULO II **5**
MARCO TEÓRICO **5**
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA **5**
2.1.1 Internacional 5
2.1.2 Nacional 6
2.1.3 Programas existentes para la especie 7
2.2 PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL PROBLEMA. 10
2.2.1 Información técnica de la especie *Myroxylon balsamun* Harms (estoraque) 10
2.2.2 Anatomía y estructura de la madera 12
2.2.3 Propiedades de la madera 13
2.2.4 Agua en la madera 14
2.2.5 Punto de saturación de fibra 15
2.2.6 Medición de humedad de la madera 15
2.2.7 Bases físicas del secado 17
2.2.8 Principios básicos del secado 19
2.2.9 Preparación del secado 22
2.2.10 Medición y control 24
2.2.11 Control permanente del secado 26
2.2.12 Fases del secado 27
2.2.13 Protocolos o curvas del secado y su análisis 29
2.2.14 Control de calidad del secado 30

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS..... 36

CAPITULO III 38

METODOLOGÍA 38

3.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN 38

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA 38

3.3 PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS 38

3.3.1 Determinación del tiempo y calidad de secado, aplicando un programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms *(*estoraque) a nivel laboratorio. 38

3.3.2 Reducción del tiempo de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), reajustando variables del programa inicial. 44

3.3.3 Evaluación del efecto de los reajustes en la calidad de secado de madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel laboratorio 46

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS. 47

3.4.1 Técnicas.....47

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos 47

3.5 PROCESAMIENTO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS..... 47

3.6 TRATAMIENTO DE DATOS 48

CAPITULO IV..... 49

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 49

4.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO Y CALIDAD DE SECADO, APLICANDO UN PROGRAMA INICIAL PARA MADERA DE *MIROXYLON BALSAMUN* HARMS (ESTORAQUE)..... 49

4.1.1 Tiempo de secado.....49

4.1.2 Calidad de secado 51

4.2 REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE SECADO PARA MADERA DE *MIROXYLON BALSAMUN* HARMS (ESTORAQUE), REAJUSTANDO VARIABLES DEL PROGRAMA INICIAL 54

4.2.1 Reajuste de variables de secado del programa inicial 54

4.2.2 Tiempo del proceso de secado, tras aplicar los diferentes ajustes al programa inicial.....59

4.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS REAJUSTES DEL PROGRAMA INICIAL EN LA CALIDAD DE SECADO DE MADERA DE *MIROXYLON BALSAMUN* HARMS (ESTORAQUE)..... 63

4.3.1 Calidad según “Contenido de humedad” 63
4.3.2 Calidad según “tensión de secado” 66
4.3.3 Calidad según “Grietas y Colapso”.....69
4.3.4 Calidad según “Índice de alabeos” 71

CAPITULO V..... 73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 73
5.1 CONCLUSIONES 73
5.2 RECOMENDACIONES 74
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... 75
ANEXOS..... 79

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto ***Pág.***

Tabla 1. Programa de secado para Quinilla Colorada_____ 8

Tabla 2. Programa de secado para Tahuari_____ 8

Tabla 3. Programa de secado para Pumaquiro_____ 9

Tabla 4. Programa de secado para Shihuahuaco_____ 9

Tabla 5. Espesor de separadores en función a espesor de la pieza_____ 23

Tabla 6. Distancia entre separadores en función al espesor_____ 23

Tabla 7. Programa de secado inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 39

Tabla 8. Niveles de alabeos admisibles en mm_____ 41

Tabla 9. Atributos de calidad según alabeos_____ 41

Tabla 10. Tolerancia del C.H final según EDG_____ 42

Tabla 11. Intensidad de las grietas y colapso_____ 42

Tabla 12. Clase del tensionamiento admisible después del acondicionamiento 43

Tabla 13. Programa de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) – Ajuste 1_____ 44

Tabla 14. Programa de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) – Ajuste 2_____ 45

Tabla 15. Programa de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) – Ajuste 3_____ 46

Tabla 16. Tiempo por fase de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), aplicando el programa de secado inicial_____ 49

Tabla 17. Reajustes de Temperatura al programa de secado inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 54

Tabla 18. Gradiente de secado generados por los reajustes del CHE al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 57

Tabla 19. Valores estadísticos del Contenido de Humedad final de la madera (%), según los ajustes del programa inicial_____ 64

Tabla 20 Análisis de Varianza (ANVA) del promedio de contenido de humedad final, de los diferentes reajustes al programa inicial_____ 65

Tabla 21 Prueba de comparación de los promedios de contenido de humedad final, de los diferentes reajustes del programa inicial (Tukey α= 0.05) 65

Tabla 22. Valores estadísticos de la abertura por tensión (mm), según los ajustes del programa inicial_____ 68

Tabla 23 Análisis de varianza (ANVA) del promedio de abertura por tensión de los diferentes reajustes al programa inicial_____ 68

Tabla 24. Valores estadísticos de la longitud de grietas en los extremos (cm), según los ajustes del programa inicial_____ 70

Tabla 25. Intensidad del tipo de alabeo, según los ajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 72

En el Anexo

Tabla 26A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa inicial_____ 84

Tabla 27A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa inicial_____ 85

Tabla 28A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa – Ajuste 1_____ 86

Tabla 29A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa – Ajuste 1_____ 87

Tabla 30A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa – Ajuste 2_____ 88

Tabla 31A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa – Ajuste 2_____ 89

Tabla 32A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa – Ajuste 3_____ 90

Tabla 33A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa – Ajuste 3_____ 91

ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto ***Pág.***

Figura 1. Higrómetro de pines modelo GANN RTU 600 16

Figura 2. Higrómetro de contacto 17

Figura 3. Movimiento del agua en la madera durante el secado 21

Figura 4. Ejemplo de colocación de sensores 24

Figura 5. Diagrama de una curva de secado típica 27

Figura 6. Ejemplo de curva de secado con C.H promedio 30

Figura 7. Tipos de alabeos 31

Figura 8. Verificación de las tensiones (Prueba del tenedor) 35

Figura 9. Verificación de la tensión según ENV 14464 43

Figura 10. Curva de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), aplicando el programa inicial 50

Figura 11. Clase admisible para tensión de secado y C.H promedio del 10%, tras aplicar el programa inicial para el secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) 51

Figura 12. Clase admisible para grietas y colapso, tras aplicar el programa inicial para el secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) 52

Figura 13. Nº de probetas según intensidad de alabeos, tras aplicar el programa inicial para el secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) 53

Figura 14. Reajustes de Temperatura (ºC) al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), en las etapas de secado Antes y Después del PSF 55

Figura 15. Gradiente de secado de los reajustes al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), en las etapas de secado antes y después del PSF 57

Figura 16. Tiempo por etapa del proceso de secado, aplicando los diferentes ajustes al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) 59

Figura 17. Curva de secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) en la fase Antes y Después del PSF, aplicando los diferentes ajustes del programa inicial_____ 61

Figura 18. Clase admisible del contenido de humedad, según reajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).____ 63

Figura 19. Clase admisible del tensionamiento de secado, según reajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).____ 66

Figura 20. Clase admisible para grietas y colapso, según reajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).____ 69

Figura 21. Índice de Calidad de Alabeos, según reajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 71

En el Anexo

Figura 22. Lectura del contenido de humedad final de las probetas de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 92

Figura 23. Lectura de la abertura por tensión de las probetas de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 92

Figura 24. Grietas en los extremos en las probetas de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 93

Figura 25. Aberturas provocadas por la tensión en la madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)_____ 93

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en el laboratorio de secado de la madera del CITEforestal Pucallpa, con el objetivo de perfeccionar un programa de secado que mantenga la calidad y aumente la productividad en el proceso de secado de la madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

Para ello se realizaron 4 ensayos en un prototipo de horno convencional, con ajustes sucesivos de las variables de secado del programa inicial, que permita disminuir el tiempo del proceso. El efecto de los programas en la calidad de secado, se evaluó siguiendo los estándares del Grupo Europeo de Secado (EDG), para; contenido de humedad, tensión en la madera, grietas y colapso, mientras que para los alabeos se utilizó la norma Chilena “NCH993. EOF72”

El ultimo reajuste al programa inicial, permitió reducir el tiempo de secado de 156 a 85 horas, aplicando temperatura mínima - máxima de 53 y 58 °C respectivamente y un contenido de humedad de equilibrio máximo de 10% y mínima de 4%. La calidad en función al contenido de humedad se clasificó como un secado “Estándar, en cuanto a la tensión de la madera se clasificó como un secado de “Calidad”, en referencia a la intensidad de defectos de grietas y colapso, el secado se clasificó con intensidad “Leve”. Finalmente, el índice de calidad en base a los alabeos fue de 0,05, definiéndose el proceso como un secado “Excelente” y de certificación “Adecuada”.

Palabras claves: Programa de secado, variables de secado, calidad de secado.

SUMMARY

The present investigation was developed in the wood drying laboratory of the CITEforestal Pucallpa, with the objective of perfecting a drying program that maintains the quality and increases the productivity in the drying process of the wood of *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

For this, 4 tests were carried out on a prototype of a conventional oven, with successive adjustments of the drying variables of the initial program, which allows to reduce the time of the process. The effect of the programs on the drying quality was evaluated following the recommendations of the European Drying Group (EDG) for; moisture content, tension in the wood, cracks and collapse, while for the warping the Chilean norm was used "NCH 993. EOf72

The last readjust to the initial program, allowed to reduce the drying time from 156 to 85 hours, applying minimum - maximum temperature of 53 and 58 ° C respectively and a maximum equilibrium moisture content of 10% and minimum of 4%. The quality according to the moisture content was classified as a drying "Standard, in terms of the tension of the wood was classified as a drying of" Quality ", in reference to the intensity of defects of cracks and collapse, the drying was classified with intensity "Light". Finally, the index of quality based on the warping was 0,05, defining the process as an "Excellent" drying and certification "Adequate

Keywords: Drying program, drying variables, drying quality.

INTRODUCCIÓN

El secado de la madera es un proceso fundamental para garantizar la calidad en cualquier producto de madera ya que, siendo la madera un material orgánico, este proceso permite la estabilización dimensional al mismo tiempo que aumenta su resistencia mecánica y biológica, además de mejorar sus propiedades como aislante térmico, acústico y eléctrico, (CITEmadera 2017)

En ese sentido el secado de la madera es un proceso vital para el desarrollo del sector maderero y del mueble de cualquier país, ya que representa el primer valor agregado que se le da a este recurso, y garantiza la calidad del producto final.

Este proceso se realiza en hornos convencionales de nivel industrial a través de condiciones de temperatura y humedad de equilibrio para cada especie, y que se conocen como programas de secado.

Existen especies maderables como el *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), que a pesar de haber ser una de las especies más utilizada para pisos con demanda del mercado internacional Serfor (2016), su proceso de secado se ve limitado por la inexistencia de una curva de secado específica, ya que según las referencias de IMADPeru (2017), su secado obedece a variables aplicadas para especies de shihuahuaco, quinilla colorada, tahuari o pumaquiro. La utilización de estos criterios estaría generando una mayor demanda de energía, originada por utilizar el horno de secado mayor tiempo de lo necesario, generando sobrecostos a la empresa y disminuyendo la competitividad del sector.

Desde una perspectiva teórica la investigación aporta a la generación de la información, como fuente de consulta o antecedentes para el estudio del secado de la madera de *Miroxylon balsamun Harms* (estoraque) u otras especies.

A nivel práctico con la información generada, las industrias de la región y el país, podrán aplicar estos nuevos programas de secado generados para la especie, lo que permitirá disminuir el tiempo y los requerimientos energéticos en el proceso de secado, contribuyendo con la productividad y competitividad de las empresas.

Tomando en consideración el valor metodológico, este estudio contribuye en generar un instrumento para el perfeccionamiento de nuevos programas de secado para las especies forestales maderables de la región y el país

En ese sentido la presente investigación planteó como Objetivo General. Perfeccionar un programa de secado para mantener la calidad y aumentar la productividad en el proceso de secado de la madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel laboratorio. Y como Objetivos Específicos. Determinar el tiempo y calidad de secado, aplicando un programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms *(*estoraque) a nivel laboratorio; Reajustar las variables de temperatura (T) y contenido de humedad de equilibrio (CHE) del programa inicial, para reducir el tiempo de secado de la madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel laboratorio y Evaluar el efecto de los reajustes en la calidad de secado de madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel laboratorio.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El secado de la madera es un proceso vital para el desarrollo del sector maderero y del mueble de cualquier país, ya que representa el primer valor agregado que se le da a este recurso, y garantiza la calidad del producto final. EL CITEmadera (2012), menciona que la mayoría de las industrias de la región Ucayali realiza el secado en hornos de tipo convencional de capacidades entre 55 a 60 m^3, para ello utilizan programas o tablas de secado que permiten controlar las variables en cada etapa del proceso.

Según el Serfor (2016), la madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), es la segunda especie más utilizada para pisos con demanda del mercado internacional, a pesar de ello, su proceso de secado se ve limitado por la inexistencia de una curva de secado específica, ya que según las referencias de IMADPeru (2017), este proceso obedece a variables aplicadas para especies de shihuahuaco, quinilla colorada, tahuari o pumaquiro.

La utilización de estos programas estaría generando una mayor demanda de energía, originada por utilizar el horno de secado mayor tiempo de lo necesario, haciendo un promedio de 11 días, según referencias del CITEmadera (2012). Esto estaría generando sobrecostos a la empresa y disminuyendo la competitividad del sector, a ello debemos agregar, que en muchas empresas el porcentaje de defectos supera el 5% aceptable, generando pérdidas económicas, por la merma de materia prima, a causa de condiciones inadecuadas durante el proceso de secado.

Existe un interés por las industrias en modificar o cambiar sus programas, con el objetivo de bajar sus costos y generar una mayor productividad, sin embargo esto representa un gran riesgo comercial ya que se puede generar la pérdida parcial o total de una carga de madera en un horno de capacidad industrial.

En base a lo mencionado esta investigación busca perfeccionar un programa de secado para la madera estoraque a nivel laboratorio, los resultados permitirán aumentar la productividad (reducir tiempo deseado y los requerimientos energéticos) manteniendo o mejorando la calidad de la madera seca.

Así, ante lo anteriormente expuesto, la pregunta principal que guía esta investigación es:

¿Cómo mantener la calidad y aumentar la productividad en el proceso de secado de la madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), a nivel de laboratorio?

Asimismo, se plantea las siguientes preguntas específicas:

¿Qué tiempo y calidad de secado se obtendrá, aplicando un programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel de laboratorio?

¿Cuál es el tiempo que se puede reducir al reajustar variables de temperatura (T) y contenido humedad de equilibrio (CHE) del programa inicial para el secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel de laboratorio?

¿Cuál es el efecto de los reajustes al programa inicial en la calidad de secado de la madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel de laboratorio?

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1 Internacional

Con el propósito de estudiar dos programas de secado considerando dos espesores para madera aserrada de renovales de *Drimys winteri* (canelo). Perez, Ananias, & Hernadez (2007), realizaron seis ensayos a escala piloto en un horno de capacidad de 0,3 m^3. Se evaluaron la calidad final de la madera, basándose en estandarizaciones europeas, (homogeneidad de humedad, gradiente, tensiones, grietas y colapso) y una norma chilena (evaluación de alabeos). Los resultados concluyen que los programas de estudio, permiten secar satisfactoriamente madera de renovales de canelo.

Asimismo, Maza Chamba & Sinche Fernandez (2014), estudiaron el secado artificial de 5 especies de bosques secundarios del Sur de la Amazonía Ecuatoriana; aplicando dos programas de secado: uno con T° inicial de 40 °C y final de 55 °C y otro más severo con T° inicial de 50 °C y final de 65 °C, combinado con dos gradientes de secado 2,0 y 2,5 respectivamente. Los resultados demostraron que el tiempo de secado es afectado por la intensidad del programa, y la calidad de la madera; además se observó que los dos programas de secado liberan completamente las tensiones; sin embargo con relación a la calidad de madera expresado en presencia a los alabeos, todas las especies presentan un mejor comportamiento con el programa de secado suave,

De la misma forma, Aquino Gonzales , Rodriguez Ramirez, Mendez Lagunas, & Sandoval Torres (2010), con el objetivo de analizar el secado técnico convencional de madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl (chalamite), aplicaron dos programas de secado: uno acelerado con T° inicial de 76 °C y final de 87 °C y otro suave T° inicial de 60 °C y final de 82 °C, combinado con dos velocidades de aire: 2,05 m/s y 3,35 m/s. De acuerdo con los resultados el tiempo de secado es afectado por la

intensidad del programa, y la calidad de la madera depende del programa de secado y de la velocidad del aire. Estadísticamente se observó que un programa de secado con temperaturas de 76 ºC a 87 ºC y velocidad de aire de 3.35 m/s redujo el tiempo de secado y la generación de defectos en la madera seca.

Por otro lado, en la universidad de Bio-Bio Concepcion, Chile, Ananias, Salvo, Estrada, & Briones (2008), estudiaron programas de secado a temperaturas convencionales y la calidad de la madera seca de "*Acacia melanoxylon* R.Br y *Acacia dealbata* Link. Para ello se realizaron 8 ensayos de secado a temperaturas convencionales, usando un horno de secado convectivo de 0,3 m^3 de capacidad. El diseño experimental incluyó factores variables; especie, espesor de la madera (25 y 50 mm) y tipo de corte (tangencial y radial). Los resultados indicaron que para 25 o 50 mm de espesor, las especies en corte radial y tangencial se dejan secar satisfactoriamente bajo un mismo programa de temperaturas convencionales. La calidad de la madera seca se ve favorecida por la carencia de colapso y la baja anisotropía de la contracción transversal.

Bertoglio, 2006, estudió el efecto del secado sobre los distintos niveles de retención de sales de CCA (Cobre, Cromo, Arsénico) en madera aserrada de *Pinus radiata* D.Don, para ello se sometió la madera a un proceso de secado artificial, evaluando dos programas de secado. Los resultados en general arrojan que a medida que los niveles de retención aumentan, los defectos de secado aumentan (principalmente grietas y torceduras), sin embargo, se menciona que el segundo programa presento menos defectos (70%) consignando un 5% más en el tiempo de secado.

2.1.2 Nacional

En la cámara de secado artificial del CIEFOR Puerto Almendras, de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Davila (2016) realizó una investigación con la finalidad de evaluar el comportamiento de dos programas de secado para la espécie *Carapa guianensis* Aubl,

(andiroba) para 4/4 de pulgada de espesor. Los resultados muestran que el programa 1, alcanzó una humedad final del 06% en 245 horas (10,21días), con un rendimiento de 98,47% de madera de primera, calidad, mientras que el programa 2, alcanzó una humedad final del 06% en 241 horas (10,04 días), con un rendimiento de 98,41% de madera de primera calidad. La clasificación por comportamiento del proceso de secado de ambos programas es muy bueno.

En otro estudio realizado en la cámara de secado de la empresa forestal Inversiones La Oroza S.R.L de la ciudad de Iquitos, Reategui (2016), evaluó el comportamiento de dos programas de secado para madera corta de la especie "*Virola sp"*. Los resultados evidencian que el programa 1 alcanzó una humedad final de 9% en 168 horas (7 días), mientras que el programa 2 alcanzó una humedad final de 8% en 156 horas (6,5 días). Concluye que el programa 1 es bueno, mientras que el programa 2 es muy bueno.

En una investigación realizada en la empresa Forestal Río Piedras S.A.C con hornos convencionales de capacidad de 100 m3, Legoas, (2008), realizó dos ensayos, aplicando un programa de secado distinto para cada uno, se trabajó con una muestra de secado de 378 y 379 piezas de *Dipteryx micrantha* Harms (shihuahuaco), determinándose el CH% inicial y final, contracción, gradiente de humedad, tensiones y alabeos para determinar la calidad de secado. El índice de calidad total de secado en el ensayo 1 y 2 fueron 1,77 y 1,92 respectivamente, correspondientes a una calidad de secado "menos que regular" y condiciones "poco adecuadas" de secado; la madera tiene esfuerzos de compresión en la superficie de la pieza y de tracción en el interior, asimismo la contracción volumétrica fue de 8,12%.

2.1.3 Programas existentes para la especie

Un programa de secado consiste en la secuencia de condiciones climáticas d temperatura y humedad relativa del aire, aplicadas durante etapas de secado previamente establecidos para una determinada especie JUNAC (1989). Los programas de secado solo indican las

condiciones de la etapa de secado propiamente dicha (antes y después del PSF), y no aquellas del calentamiento, acondicionamiento inicial y acondicionamiento final, porque dependen de otros factores como; especie, espesor, humedad inicial, gradiente de humedad, humedad final de la madera, etc. Además, en vista de múltiples factores que intervienen en el secado de la madera y la variedad de diseños de hornos, ningún programa se considera ideal sino como referencial. IMADPeru (2017), menciona que para la especie estoraque se pueden secar con programas para especies como el shihuhuaco, quinilla colorada, tahuari o pumaquiro. A continuación, se presentan estos programas:

Tabla 1. Programa de secado para Quinilla Colorada

Cont. Hum (%)	Temperatura		Hum. Rel (%)
	Bulbo seco	Bulbo húmedo	
Verde	42	39	82
50	48	43	74
40	48	43	74
30	48	43	74
15	54	46	63

Fuente: IMADPeru (2017)

Este programa solo es aplicable a un espesor inferior o igual a 38 mm, para espesores de 38 a 75 mm, la humedad relativa (HR) del aire debe incrementarse en un 5% en cada paso. Para espesores superiores a 75 mm, se debe considerar un aumento del 10%.

Tabla 2. Programa de secado para Tahuari

Cont. Hum (%)	Temperatura		Hum. Rel (%)
	Bulbo seco	Bulbo húmedo	
30	42	41	94
25	42	39	82
20	48	43	74
15	48	43	74

Fuente: IMADPeru (2017)

Este programa solo es aplicable a un espesor inferior o igual a 38 mm, para espesores de 38 a 75 mm, la humedad relativa del aire debe

incrementarse en un 5% en cada paso. Para espesores superiores a 75 mm, se debe considerar un aumento del 10%.

Tabla 3. Programa de secado para Pumaquiro

Etapa	Tiempo	ºC	UGL	CH
Calentamiento	--	40	19	X
Secado	--	45	18	35
Secado	--	47	16	26
Secado	--	49	15,3	20
Secado	--	50	13,8	18
Secado	--	52	12,3	16
Acondicionamiento	12	45	15	0
Enfriamiento	--	28	12	0

Fuente: IMADPeru (2017)

Este programa es aplicable para espesor de 20 mm. Comienza con una fase de calentamiento utilizando una temperatura de 40 ºC y un UGL (Contenido de humedad de equilibrio) del 19%. En la fase de secado se utiliza una temperatura máxima de 52 ºC y un UGL del 12%, cuando el contenido de humedad de la madera (CH) alcanza el 16%. Se tiene una fase de acondicionamiento de 12 horas con temperatura de 45 ºC y UGL de 15%. Finalmente, IMADPeru (2017), menciona que para el secado de pumaquiro de 20 mm de espesor con C.H promedio inicial de 33,5%, se necesita 20,5 días para C.H final del 11,8%.

Tabla 4. Programa de secado para Shihuahuaco

Etapa	Tiempo (hora)	(ºC)	UGL (%)	C. H. (%)
Calentamiento	6	40	19	x
Secado	--	43	17	35
Secado	--	46	15,3	22
Secado	--	47	14,6	19
Secado	--	49	13,5	16
Secado	--	48	12,5	14
Secado	--	49	11	13
Secado	--	49	9,5	11,5
Secado	--	49	8	10
Acondicionamiento	14	40	14	9
Enfriamiento	10	28	9	x

Fuente: IMADPeru (2017)

Este programa es aplicable para espesor de 25 mm. Comienza con una fase de calentamiento utilizando una temperatura de 40 ºC y un UGL (Contenido de humedad de equilibrio) del 19%. En la fase de secado se utiliza una temperatura máxima de 49 ºC y un UGL del 8%, cuando el contenido de humedad de la madera (CH) alcanza el 10%. Se tiene una fase de acondicionamiento de 14 horas con temperatura de 40 ºC y UGL de 14%. Finalmente, IMADPeru (2017), menciona que para el secado de Shihuahuaco de 25 mm de espesor con humedades promedio inicial de 38,5%, se necesita 17,5 días para alcanzar una humedad final del 9,76%.

2.2 PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL PROBLEMA.

2.2.1 Información técnica de la especie *Myroxylon balsamun* Harms (estoraque)

Según la Confederación Peruana de la Madera (2008), la información técnica de la especie en estudio nos permite gestionar nuestros procesos industriales y los usos correctos de la madera, que a continuación se detalla:

- **Descripción Taxonómica**

  Nombre internacional : Balsamo
  Nombre científico : *Myroxylon balsamun* Harms
  Sinónimos : *Myroxylon toluiferun H.B.K.*
  Nombre Común : Estoraque
  Familia : FABACEAE

- **Procedencia**

  Se encuentra distribuida en los departamentos de Loreto, San Martin, Madre de Dios, Huánuco y Ucayali. El estoraque se encuentra en el bosque tropical (bs-T) y bosque húmedo tropical (bh-T).

- **Descripción del Árbol en pie**

  Presenta fuste recto, a veces presenta aristas semicirculares. Altura total de 18 a 40 m. Tronco de 20 a 40 cm de DAP

- **Propiedades físicas y mecánicas**

  Densidad básica : 0,78 g/cm^3

  Contracción Volumétrica : 9,97 %

  Relación T/R : 1,56

  Contracción tangencial : 6,52%

  Contracción radial : 4,16%

  Módulo de Elasticidad en flexión: 175,0 tn/ cm^2

  Módulo de Ruptura en flexión : 134,0 kg/ cm^2

  Comprensión Paralela : 714,0 kg/ cm^2

  Comprensión Perpendicular : 130,0 kg/ cm^2

  Corte paralelo a las fibras : 163,0 kg/ cm^2

  Dureza de lados : 1143,0 kg/ cm^2

  Tenacidad : 6.6 kg-m

- **Aserrío y secado**

  El aserrío es moderadamente difícil y lento sobre todo por su alta dureza y presencia de tensiones internas que produce un desafilado de herramientas medio. Comportamiento al clavado es difícil, se recomienda perforación previa. El secado natural es lento, pero de buen comportamiento. El secado artificial se recomienda programa suave.

- **Durabilidad Natural y usos**

  Durabilidad natural: presenta buena resistencia l ataque de hongos, termitas e insectos de madera seca. No requiere preservación

  Usos: Pisos, pilotes marinos, carrocerías, implementos agrícolas, deportivos y mangos de herramientas, torneado, durmientes y mobiliario.

- **Características organolépticas**

  Color rojo, olor no definido, veteado con arcos superpuestos y bandas paralelas, grano entrecruzado y textura media, (CITEmadera, 2008)

- **Características macroscópicas**

  Porosidad difusa, en disposición o arreglo radial, concentración no cambia, agrupación en múltiples radiales y escaso solitario, tamaño pequeño, forma oval, contenido de gomas en poros de color negro. Visible con lupa 10 X. Parénquima paratraqueal vacisentrico y escaso aliforme tipo rombo. Radios Visibles con lupas de 10 X de distribuciones estratificadas, lineales vasculares y rectilíneas, (Cumapa, 2015)

- **Características microscópicas**

  Poros pequeños (50 a 100 micras), diámetro con frecuencia de poros por mm^2 con promedio de 14, longitud de elementos vasculares pequeños (menos de 350 micras). Platina de perforación con inclinación horizontal, tipo de perforación simple, contenido de gomas oscuro. Punteado intervascular alterno de forma ovaladas y pequeñas (4 a 7 micras). Punteado radiovascular vacisentrico iguales en forma y tamaño a las intervasculares. Parénquima vacisentrico (uniseriados) y raras veces aliforme. Fibras de longitud corta, diámetro menos de 16 micras, forma libriformes disposición estratificados, punteado ausente, (Cumapa, 2015)

2.2.2 Anatomía y estructura de la madera

La JUNAC (1989), señala que la madera de latifoliadas o frondosas tiene una estructura celular más compleja que las coníferas dado que está constituida por fibras, que son células alargadas, agrupadas en haces, provistas de puntuaciones para facilitar el paso de nutrientes y que cumplen funciones de sostén en el cuerpo leñoso; además, presentan vasos que son elementos de conducción de agua y sales minerales constituidos por células tubulares unidas por sus extremos, generalmente abiertos y que en algunas maderas pueden llegar a conformar el 50% de su volumen total. Asimismo, presentan células de parénquima para la conducción y almacenamiento de nutrientes, no sólo en el sentido transversal sino en el longitudinal; ocasionalmente se pueden encontrar canales gomíferos, formados por células

especializadas de parénquima ubicadas longitudinalmente o dentro de los radios medulares.

Teniendo en cuenta los tres diferentes planos, determinados por el eje del árbol, los radios leñosos y los anillos de crecimiento, Solano (1998) menciona que se ha establecido que la madera en el sentido longitudinal se seca en promedio tres veces más rápido que en el sentido radial y dos veces más que en el sentido tangencial. El tamaño de las células, los contenidos que posean y la proporción de cada una de ellas en el leño tienen también influencia en el secado.

2.2.3 Propiedades de la madera

Según Inunza (2005), la presencia de compuestos higroscópicos como celulosa hace de la madera un material que intercambia humedad con el ambiente hasta lograr el equilibrio. Cuando los cambios del contenido de humedad afectan la humedad que está en la pared celular se producen, como resultado de estos, los cambios en las dimensiones de la madera conocidos como contracción e hinchamiento.

En otros términos, el Forest Products Laboratory (2010), explica que la madera cambia de dimensión a medida que gana humedad (hincha) o pierde humedad (contracción), porque el volumen de la pared celular depende en la cantidad de agua ligada. Este encogimiento e hinchazón puede resultar en deformación, comprobación y división de la madera, que a su vez puede conducir a una menor utilidad de los productos de madera, como aflojar mangos de herramientas, huecos en el piso u otros problemas de rendimiento. En general, una mayor contracción se asocia con una mayor densidad.

Justamente la densidad es uno de los factores con mayor influencia en el secado de la madera así lo señala Zavala (2000), que además indica que, al aumentar la densidad, los tiempos de secado se incrementan como consecuencia de la mayor resistencia al movimiento del agua hacia el exterior. Este fenómeno se produce porque las maderas densas tienen una estructura anatómica particular y con paredes

celulares más gruesas y cavidades (lúmenes) más reducidas que las maderas más ligeras, por lo que ofrecen una mayor resistencia al paso del agua. La densidad se determina con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{M}{V}$$

Dónde:

D: Densidad (gr/cm^3)
M: Masa de la madera (gr)
V: Volumen de la madera (cm^3)

2.2.4 Agua en la madera

Muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera dependen del contenido de humedad de la madera. La madera verde a menudo se define como madera recién aserrada en la cual las paredes de las celdas están completamente saturadas de agua y adicionales el agua puede residir en la lumina. El contenido de humedad de madera verde puede variar desde aproximadamente 30% a más de 200%. En maderas blandas verdes, el contenido de humedad de la albura suele ser mayor que la del duramen. En maderas duras verdes, la diferencia en el contenido de humedad entre el duramen y la albura depende de la especie, (Forest Products Laboratory, 2010).

Para profundizar en el tema es necesario citar a Arostegui (1975) quien enseña que la madera contiene agua bajo tres formas; agua libre, agua higroscópica y agua de constitución.

La NTP 251. 130 (2014) menciona que el agua libre está contenida en las cavidades celulares por encima del punto de saturación de las fibras y cuya eliminación durante el proceso de secado no produce cambios dimensionales, a diferencia del agua higroscópica que está impregnada en las paredes celulares y cuya eliminación en el secado produce fenómenos de contracción. Finalmente, el agua de constitución forma parte de la materia celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado, ya que su separación implicaría la destrucción parcial de la madera.

2.2.5 Punto de saturación de fibra

La JUNAC (1989), explica que, al iniciarse el proceso de 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 contienen 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 %.

Por encima del PSF, el CITEmadera (2017), indica que en el proceso de secado se deben aplicar condiciones mucho más suaves por el peligro de que se produzca un endurecimiento superficial de la madera y por consiguiente colapso. Por debajo del PSF, la madera soporta condiciones mucho más fuertes, mayor temperatura y menor Contenido de Humedad de Equilibrio - CHE. Asimismo, el mismo autor, menciona en su “Manual para Operadores de Secadores Convencionales” que el PSF, para la especie *Miroxylon balsamun* Harms en estudio corresponde a un contenido de humedad del 14,20%.

2.2.6 Medición de humedad de la madera

La determinación del contenido de humedad en la madera se hace considerando solo los valores del agua libre e higroscópica. La JUNAC, (1989) menciona que el método más exacto y el único científicamente satisfactorio para determinar el agua en la madera, es el método gravimétrico, que consiste en secar la madera la madera en estufa a 103 ± 2 grados centígrados hasta alcanzar su peso constante, para luego por la siguiente ecuación, determinar el contenido de humedad de la madera.

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100\ (\%)$$

CH : Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro (%)
Ph : Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial (gr)
Ps : Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante (gr)

Sin embargo, existen otros métodos de medición de la humedad de la madera como el método eléctrico, que según el Forest Products

Laboratory (2010), utiliza las relaciones entre el contenido de humedad y propiedades eléctricas mensurables de la madera, como la conductividad (o su inversa, resistividad), constante dieléctrica, o factor de pérdida de potencia.

Para la determinación del contenido de humedad de la madera por el método resistivo, se utilizan los Higrómetros de Pines (Figura 1), para ello, los electrodos son introducidos en la madera, la resistencia eléctrica o conductancia entre las puntas-electrodos es medida y convertida a lecturas de contenido de humedad. El alcance de medición para este tipo de medidores es de 7 a 30 %H2O, y su clase de exactitud esperada va de ±1,5 a ±3 % H2O, aunque otras referencias, indican que la exactitud de la medición se puede determinar de ±0,5 a ±2 % H2O. La resistencia eléctrica de las maderas varía mucho con el contenido de humedad. Esta decreciente considerablemente cuando el contenido de humedad incrementa. La resistencia también varía con las especies y es afectada por la temperatura más no por la densidad específica, (Medrano, Aranda, & Velasco, 2004).



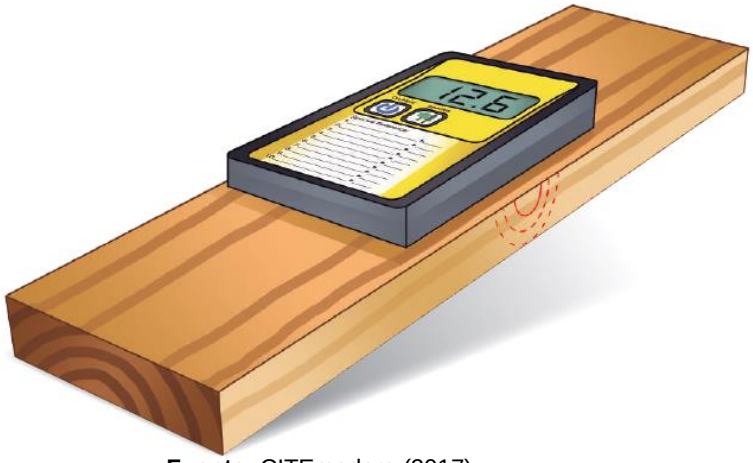
Fuente: CITEmadera (2017)

Figura 1. Higrómetro de pines modelo GANN RTU 600.

Otro método comúnmente utilizado es el método dieléctrico que se basa en otro parámetro de la madera que es; la constante dieléctrica, que describe su habilidad para absorber y almacenar energía. Depende en gran medida de la densidad de la madera, por ello es muy importante

conocerla, así como la especie con la que se está trabajando, por lo que midiendo su constante dieléctrica se determina su contenido de humedad. Este método se utiliza el higrómetro de contacto (Ver ejemplo en Figura 2), que solo se apoyan en la superficie de madera. Compara la constante dieléctrica de madera totalmente seca, que suele ser baja, frente a la constante eléctrica de la madera húmeda, que es mucho más alta. (Jimenes J. d., 2011)

La cantidad de energía absorbida depende del contenido de humedad en la madera y convertida a lecturas de contenido de humedad. El alcance efectivo de estos medidores es de 5 a 30 % H2O y su clase de exactitud esperada va de ±3 a ±6 % H2O. (Medrano, Aranda, & Velasco, 2004)



Fuente: CITEmadera (2017)

Figura 2. Higrómetro de contacto

2.2.7 Bases físicas del secado

2.2.7.1 Temperatura

De otro lado, se sabe que en el proceso de secado interviene varios factores, siendo uno de los principales la temperatura, en ese sentido Pomachagua (1993), menciona que el secado es un proceso gradual de pérdida de agua debido al incremento de la temperatura que experimenta la madera como consecuencia del calor.

Según INTA (2001), la temperatura promueve la evaporación, que es la acción del calor que evapora fácilmente el agua en la madera, por capilaridad, cuando las paredes celulares atraen el agua y la hacen subir hasta el perímetro del poro y salir de la madera, y por difusión, que es el proceso lento de pérdida de agua.

2.2.7.2 Velocidad del aire

Dentro de una estiba de madera el CITEmadera (2009), menciona que la velocidad del aire tiene dos finalidades; transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y transportar el vapor de agua saliente de la madera.

Las velocidades del aire que se deben producir en el interior de los hornos, para maderas duras deben estar comprendidas entre 1,5 a 2,5 m/s, mientras que para maderas blandas deben estar entre 3 a 5 m/s. Las velocidades por encima de los 5 m/s no aceleran el secado en los hornos convencionales. Se puede reducir la velocidad del aire cuando la madera está por debajo del punto de saturación de las fibras, ya que en esta etapa el aire no es determinante en la extracción de agua de las paredes celulares de la madera, (CITEmadera, 2017).

El mismo autor india que el cambio de giro de los ventiladores en procesos largos de secado (semanas) puede ser fijado en un rango de 3 a 8 horas, mientras que en procesos cortos (24 horas) el cambio puede establecerse cada 2 horas. Hay que tener en cuenta que la razón fundamental del cambio de giro de los ventiladores es homogenizar la humedad en el ancho de la carga.

2.2.7.3 Humedad relativa del aire (HR)

La humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene un metro cubico de aire en unas

condiciones determinadas de temperatura y presión. (Jimenes, Scarioni, & Vano, 2013)

La humedad relativa del aire influye directamente a la humedad de la madera, Morales (2004) menciona que, si la humedad relativa del aire aumenta, entonces aumenta la humedad de la madera, de igual forma se presenta esa influencia de manera inversa. Siempre y cuando la temperatura sea constante y el proceso se lleva a cabo en un sistema cerrado.

Para medir la humedad relativa del aire la JUNAC (1989) menciona que generalmente se emplea un aparato denominado psicómetro, que consta de dos termómetros, en uno de los cuales el bulbo permanece siempre seco e indica la temperatura real del aire, el otro llamado termómetro de bulbo húmedo, mantiene su parte sensitiva cubierta por una tela de algodón húmeda, altamente adsorbente. La diferencia entre la temperatura del “bulbo seco” y la temperatura del “bulbo húmedo”, denominada “depresión del bulbo húmedo” es un valor relacionado a la humedad relativa del aire que indica su nivel de saturación.

2.2.8 Principios básicos del secado

2.2.8.1 Contenido de humedad de equilibrio de la madera

El contenido de humedad de equilibrio, es una condición de humedad constante y que depende de la humedad relativa y la temperatura, cambia con las variaciones en una o ambas de estas condiciones atmosféricas. Estos cambios del contenido de humedad de la madera en respuesta a variaciones en la humedad relativa y temperatura del aire se dan en función del tiempo, con cambios rápidos al principio y despacio una vez que se acerca al contenido de humedad de equilibrio (Delgado, 1981).

La madera es un material higroscópico, lo que significa que la tiene la capacidad de absorber o ceder humedad del ambiente

que la rodea, hasta que la cantidad de agua en la madera esté en equilibrio con las condiciones ambientales: temperatura y humedad relativa, así lo menciona Foglia (2005). El mismo autor dice que el objetivo práctico de cualquier proceso de secado, es el de secar la madera a un contenido de humedad tal que se encuentre en equilibrio con las condiciones ambientales promedio del lugar en que será expuesta, con el fin de eliminar o minimizar el movimiento de la madera (contracción o hinchamiento).

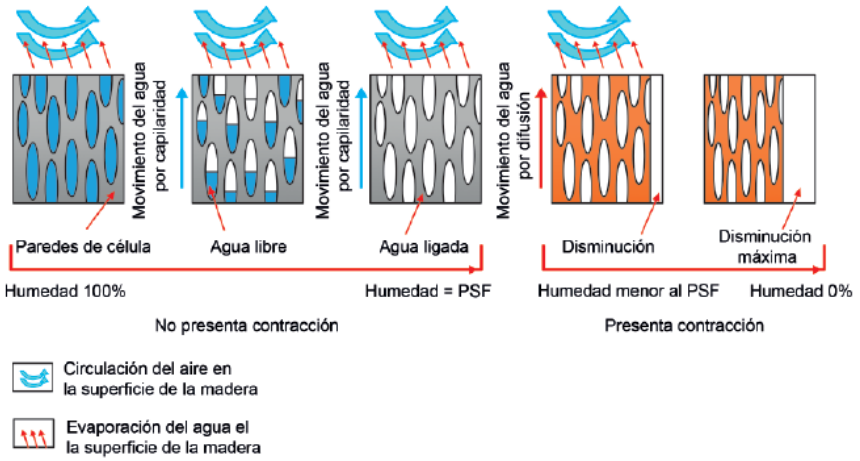
La humedad de equilibrio es la meta final de todo proceso industrial de secado teniendo siempre presente la humedad de equilibrio en el lugar del uso final de la madera y no el sitio del secado. Por tal motivo, es muy importante conocer los promedios anuales de temperatura y humedad relativa del aire, y de la humedad de equilibrio, donde se utilizará la madera finalmente (Gonzales, 1989)

2.2.8.2 Movimiento del agua en la madera

La JUNAC (1989), señala que por encima del PSF, la velocidad de secado, bajo condiciones estables de temperatura y humedad relativa de aire, permanece constante y el movimiento del agua libre liquida 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.

El mismo autor dice que por debajo del PSF, la permeabilidad de la estructura microscópica y submicroscópica de la madera entra a jugar un papel importante en el proceso de remoción del agua. En este rango higroscópico, el agua retenida en la madera por fuerzas de naturaleza molecular y/o eléctrica se mueve por difusión a través de las paredes celulares, debido a

la gradiente de humedad que se crea entre las paredes de las células vecinas, Ver figura 3.



Fuente: CITEmadera (2017)

Figura 3. Movimiento del agua en la madera durante el secado.

2.2.8.3 Gradiente de secado (GS)

El gradiente del secado GS es una medida del potencial de secado de la madera. La JUNAC (1989), expone que los gradientes demasiados elevados producen un secamiento muy rápido de las capas superficiales de la madera, con el consecuente riesgo de formación de tensiones internas, grietas, deformaciones y aun endurecimiento. Se define como el cociente entre el contenido de humedad de la madera (C.H) y el Contenido de Humedad de Equilibrio del Ambiente (CHE). Se expresa con la siguiente formula:

$$GS = \frac{CH}{CHE}$$

Esta fórmula solamente es válida cuando el CH es menor o igual al PSF de la madera a secar. Cuando el CH es mayor al PSF, no existe equilibrio higroscópico con el aire, por lo que el GS se calcula con la siguiente fórmula:

$$GS = \frac{PSF}{CHE}$$

CITEmadera (2017), Indica que, dependiendo de la especie y el espesor, el GS puede variar entre 1,5 y 4,5. Si es muy bajo, el tiempo de secado se prolongará innecesariamente; si es demasiado alto, el secado se acelerará, pero pueden generarse diferencias grandes de CH en el perfil transversal de la madera, lo que ocasiona un endurecimiento superficial y la aparición de grietas internas en los extremos de las piezas. El mismo autor, Cita a Robert Hildebrandt Maschinenbau GmbH en su "Manual para Operadores de Secadores" que para la especie en estudio "*Miroxylon balsamun*", por debajo del PSF, el GS debe de ser de 2.4, mientras que por debajo del PSF el GS debe ser 2,6

2.2.9 Preparación del secado

2.2.9.1 Pre secado

El secado al aire libre ayuda a reducir considerablemente los tiempos de secado porque se elimina una parte del agua libre que también en el secado artificial tomaría mucho tiempo por las condiciones suaves que exige esta fase. Sin embargo, es necesario aplicar algunas medidas de precaución como la protección contra la lluvia y el sol, orientación de los paquetes hacia la dirección del viento, distanciamiento suficiente hacia el suelo, eliminación de vegetación del suelo, terreno suficientemente firme para evitar hundimiento de los paquetes de madera, apilamiento de paquetes con una altura total máxima de tres veces el ancho de los mismos (3 a 1), entre las más importantes. Hay que tener presente que el secado por debajo del PSF es bastante lento; además, es imposible secar la madera a una humedad inferior al CHE del lugar del pre secado, (Camara Nacional Forestal, 2014)

2.2.9.2 Armado de paquetes

BOLFOR (1998), brinda estas recomendaciones para el armado de paquetes;

- Por especies: Separar las especies A, B, C etc. En grupos homogéneos.
- Por espesor: 1”, 2”, 3”, etc.
- Por nivel de humedad: humedad verde, humedad, seca al aire, etc.
- Port tipo de madera: de samago, de corazón o duramen, combinada.
- Por tipo de cortes: radiales, tangenciales, oblicuos.
- Por contenido de humedad final deseado.

2.2.9.3 Separadores

El espesor de los separadores a utilizar para el armado de paquetes dependerá del espesor de la madera a secar, en teoría se debe seguir la siguiente regla:

Tabla 5. Espesor de separadores en función a espesor de la pieza.

Espesor de la pieza (mm)	Espesor de separadores (mm)
< 20	20
20 – 25	25
40 – 50	30
50 – 65	35
65 – 80	40

Fuente: Norma Andina NA 0049 (2008)

La distancia entre los separadores dependerá del espesor de la pieza, en teoría se debe seguir la siguiente regla:

Tabla 6. Distancia entre separadores en función al espesor

Espesor de la pieza (mm)	Distancia entre separadores(cm)
< 20	30 – 40
20 – 25	40 – 50
40 – 50	50 – 60
50 – 65	70 – 80
65 – 80	90

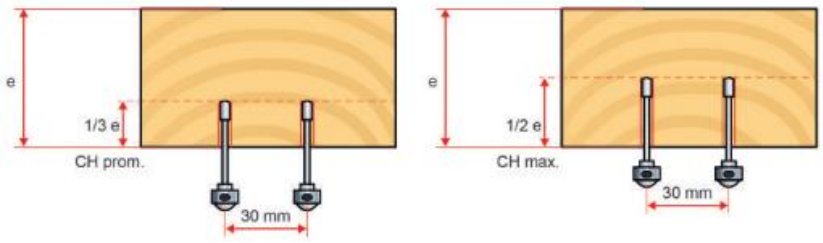
Fuente: Norma Andina NA 0049

Camara Nacional Forestal (2014) Recomienda que la pila de madera debe estar correctamente estibada, evitándose vacíos innecesarios que conllevan a un secado desuniforme. Se debe considerar un espacio mínimo en el cual el aire pueda rotar libremente dentro de la cámara, estibar mayor volumen de madera disminuyendo estos espacios conlleva a que el secado no sea uniforme y se afecte la calidad de secado, obteniéndose alto porcentaje de madera húmeda y retrasando los tiempos normales de secado. De la misma manera, se debe evitar poner pequeñas cantidades de madera en este pasadizo, pues las partes inferiores dejan de recibir el aire que necesitan.

2.2.10 Medición y control

2.2.10.1 Sensores para medición del contenido de humedad

Los sensores son electrodos que se colocan en la madera para monitorear el contenido de humedad de la madera durante el proceso de secado. Cada par de electrodos debe mantener una distancia mínima de 50 cm con respecto a los extremos de las tablas, debiendo ser colocados de manera perpendicular a las fibras y con una separación entre electrodos de 30 mm tal como muestra la Figura 4.



Fuente: CITEmadera (2017)

Figura 4. Ejemplo de colocación de sensores

2.2.10.2 Muestras para el control del contenido de humedad

Hace algún tiempo, fue la única forma de controlar el secado y hoy en día se utiliza también para verificar la confiabilidad de las lecturas que proporcionan los sensores de humedad de la cámara. Este control se realiza siguiendo las recomendaciones de BOLFOR (1998), tomar un mínimo de 6

muestras, de las cuales la mayoría, deben representar la madera húmeda o de difícil secado. Se hace corte una o dos muestras de una misma tabla (de acuerdo a las dimensiones de ella) y corte las probetas para determinación del contenido de humedad, se secan periódicamente de la cámara de secado y se determina el C.H siguiendo el procedimiento del método gravimétrico.

2.2.10.3 Verificación de la cámara de secado

Antes de iniciar con el proceso de secado, CITEmadera (2014), afirma que es muy importante revisar los siguientes puntos, especialmente lo referente a la humidificación, ya que este es un punto sensible por el frecuente taponeo de los aspersores (cal, suciedad):

- Revisar válvulas de ingreso de agua.
- Revisar y limpiar los aspersores. Es común que se "taponen".
- Cambio de la placa de celulosa / verificación del bulbo húmedo.
- Verificar disponibilidad de combustible.
- Revisar el funcionamiento de ventiladores y ventilas.
- Revisar el funcionamiento de la caldera.
- Verificar cierre hermético de puertas.
- Verificar conexión correcta de los sensores de humedad de la madera.
- Verificar el buen estado de las paredes del horno.

2.2.10.4 Conducción del secado

Según la JUNAC (1989), el control de los instrumentos reguladores de las condiciones climáticas dentro del horno puede hacerse de varias formas, de acuerdo con el grado de automatización que se tenga. Así pueden ser los siguientes:

- **La regulación o control manual**, se realiza sin ningún tipo de automatización. Son obvias las desventajas de este método, ya que periódicamente el operador deberá controlar el horno, abriendo o cerrando manualmente las válvulas de calefacción, para ajustas los valores de temperatura y humedad de acuerdo con el programa preestablecido o con el comportamiento de la madera. Esto exige la presencia de un operario con una gran experiencia en el secado artificial.
- **El control semiautomático**, se hace por medio de un regulador de dos posiciones. El tipo más simples de estos reguladores puede controlar la temperatura del horno y en casos más sofisticados también la humedad relativa. Estos aparatos de regulación semiautomática mantienen las condiciones climáticas del horno más o menos constantes y ajustadas al programa preestablecido.
- **El control automático,** no requiere un ajuste manual durante el proceso de secado, cualquiera sea la duración del proceso. El cambio de las condiciones climáticas del horno se hace automáticamente de acuerdo al programa deseado. Esto permite operar un secado continuamente, sin interrupciones, obteniéndose así una máxima utilización.

2.2.11 Control permanente del secado

CITEmadera (2017) menciona que, durante el secado, el control permanente de las variables y la documentación de los datos es algo indispensable, ya que las decisiones que se deban tomar al respecto deben basarse en datos o estadísticas y no en la intuición. Normalmente, los controladores de las cámaras de secado tienen softwares disponibles que permiten monitorear, registrar y controlar las variables del secado a través de una PC o un Smartphone. Por lo

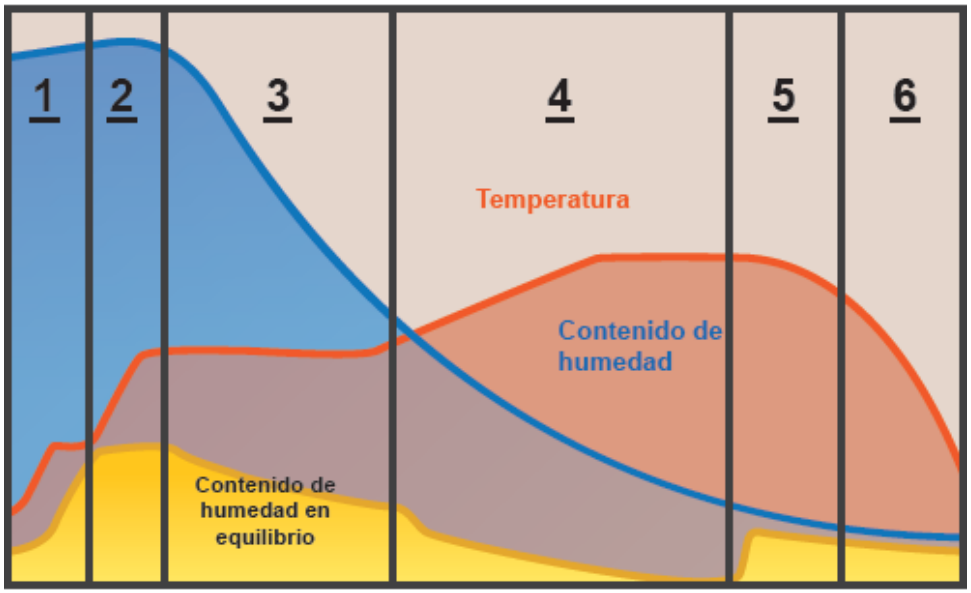
general, la pantalla principal de un software de secado muestra un corte de la cámara donde aparece la siguiente información:

- Posición de apertura de las ventilas (%)
- Función de los ventiladores (% revoluciones / dirección)
- Apertura de la válvula de la calefacción (%)
- Temperatura (actual y programada)
- CHE (actual y programada)
- CH de los sensores (individual y promedio)

Esta pantalla del software nos debe permitir evaluar rápidamente la situación actual de las variables de secado en comparación con los valores programados. Es recomendable realizar el registro de las condiciones del secado cada 2 horas, lo que se sugiere hacerlo tanto de manera digital (software del controlador) como de manera manual (formato) por si hay algún inconveniente.

2.2.12 Fases del secado

Normalmente, un secado convencional pasa por las siguientes fases:



Fuente: CITEmadera (2017)

Figura 5. Diagrama de una curva de secado típica

2.2.12.1 Calentamiento y penetración del calor

Sepulveda (2007), señala que, en esta etapa, la temperatura en la cámara debe subir lentamente al nivel deseado, este

incremento de la temperatura debe ser uniforme y lento, evitando en lo posible la entrega de humedad a la madera, el clima de precalentamiento depende de la especie de la madera, de la humedad inicial y del medio de pulverización. Por otro lado, la JUNAC (1989), indica como regla general se calcula una hora de calentamiento por centímetro de espesor para las maderas livianas y dos horas por centímetro para maderas densas, cuando su contenido de humedad inicial es superior al 30%.

2.2.12.2 Acondicionamiento inicial

La madera que ingresa al horno tiene un CH variable, además debido a que ha estado expuesta a un secado natural u oreo, es probable que su superficie esté más seca que su interior. El acondicionamiento inicial consiste en saturar de humedad la cámara para homogenizar la humedad de la madera, eliminando así las tensiones de secado. Además, esto favorece la llegada de calor al centro de las piezas. Con respecto a los controladores, es importante que estos dispongan de un bloqueo del aumento de la temperatura mientras el CHE no es alcanzado en el interior de la cámara, JUNAC (1989)

2.2.12.3 Secado antes del punto de saturación de las fibras (PSF)

En esta fase, Sepúlveda (2007), afirma es donde se produce la extracción del agua libre de la madera, teniendo mucho cuidado con la humedad relativa del aire y de no utilizar temperaturas muy elevadas. El gradiente de secado en esta fase se aplica en base al punto de saturación de fibra. Si el equipo dispone de convertidores de frecuencia para variar la velocidad de los ventiladores, en esta fase debe usarse la velocidad más alta para evacuar la mayor cantidad de humedad posible. (CITEmadera, 2017)

2.2.12.4 Secado después del punto de saturación de las fibras

Una vez alcanzado el PSF, la madera es más rígida a la entrega del agua retenida y produce que la etapa de secado disminuya su velocidad, para que esto no suceda es que se aumenta el cociente de secado y las temperaturas mientras que la humedad relativa del aire se disminuye, (Sepúlveda, 2007).

2.2.12.5 Acondicionamiento final

Esta etapa está constituida por dos fases distintas conocidas como ecualización y acondicionamiento. La primera de ellas tiene como objetivo uniformar la humedad de la carga en tormo a la humedad del medio pre-establecido, esto se logra a través de la elevación de la humedad relativa del aire después de la última fase de secado. El acondicionamiento tiene como función homogenizar la humedad dentro de la madera y reducir o eliminar las tensiones internas de cada pieza de la carga que se desenvuelven en el secado, para esto se aumenta la humedad relativa del ambiente en la cámara de secado (Klitzke, 2005)

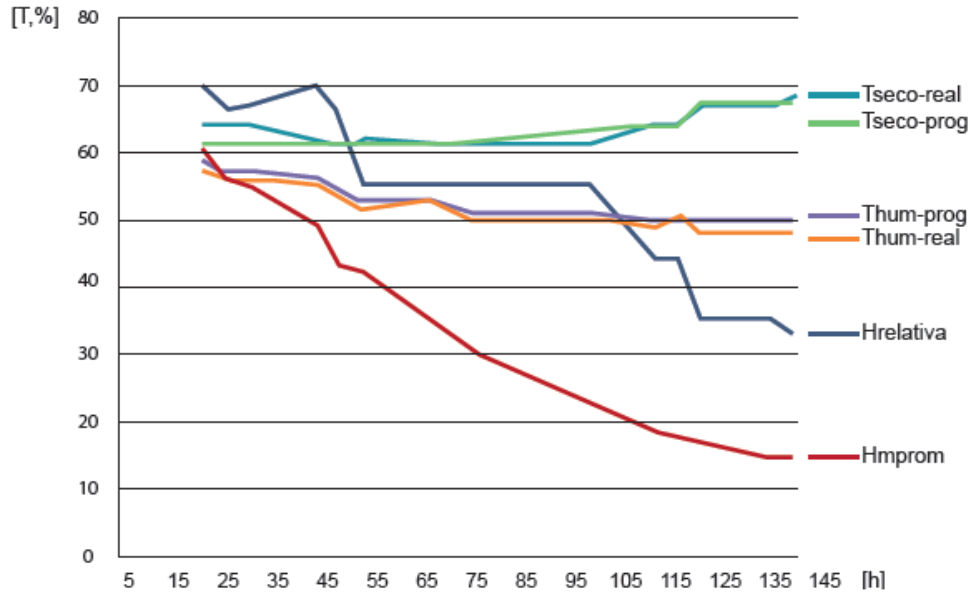
2.2.12.6 Enfriamiento

Es la última etapa del proceso, se debe evitar la abertura de la cámara con altas temperaturas para que así no se produzca un choque térmico en la carga, lo cual podría generar grietas superficiales, se debe mantener la humedad de equilibrio utilizada en la etapa de acondicionamiento y bajar la temperatura gradualmente (Sepúlveda, 2007).

2.2.13 Protocolos o curvas del secado y su análisis

Una vez terminado el secado de una carga, es recomendable imprimir el gráfico de todo el proceso (curva de secado) ya que gráficamente se puede identificar fácilmente el comportamiento de las variables

registradas. Solamente comparando los diferentes comportamientos se pueden obtener conclusiones y analizar razones de defectos y/o reclamaciones. Por otro lado, una comparación entre los valores programados y los valores reales nos permiten identificar problemas del funcionamiento de la cámara.



Fuente: CITEmadera (2017)

Figura 6. Ejemplo de curva de secado con C.H promedio

En la figura 6, se observa el comportamiento de la temperatura del bulbo seco real (Tseco-real), frente a lo programado (Tseco-prog), de igual forma a la temperatura del bulbo húmedo programado (Thum-prog) y lo real (Thum-real). Además de cómo se comporta la humedad de la madera frente a las variables de temperatura y humedad.

2.2.14 Control de calidad del secado

2.2.14.1 Alabeos

La NTP 251. 130 (2014), define al alabeo como la deformación que puede experimentar una pieza de madera por la curvatura de sus ejes; longitudinal, transversal o ambos. Los casos más frecuentes son el abarquillado, arqueadura, encorvadura y torcedura.

El abarquillado, es el alabeo de las piezas cuando los bordes longitudinales no se encuentran al mismo nivel que la zona

central. Se reconoce cuando al colocar la pieza de madera sobre una superficie plana, apoyara la parte central de la cara quedando los bordes, presentando un aspecto cóncavo o de abarquillado, (JUNAC, 1989).

La arqueadura es la curvatura a lo largo de la cara de la pieza. Se reconoce cuando al colocar la pieza sobre una superficie plana, se observa una luz o separación entre la cara de la pieza de madera y la superficie de apoyo, (JUNAC, 1989).

La encorvadura, es la curvatura a lo largo del canto de la pieza. Se reconoce cuando al colocar la pieza de canto sobre una superficie plana, se observa una luz o separación entre el canto de la pieza de madera y la superficie de apoyo, (JUNAC, 1989).

La torcedura, es el alabeo que presenta cuando las esquinas de una pieza de madera no se encuentran en el mismo plano. Se reconoce cuando al colocar la pieza sobre una superficie plana, se observa el levantamiento de una o más aristas en diferentes direcciones, (JUNAC 1989).

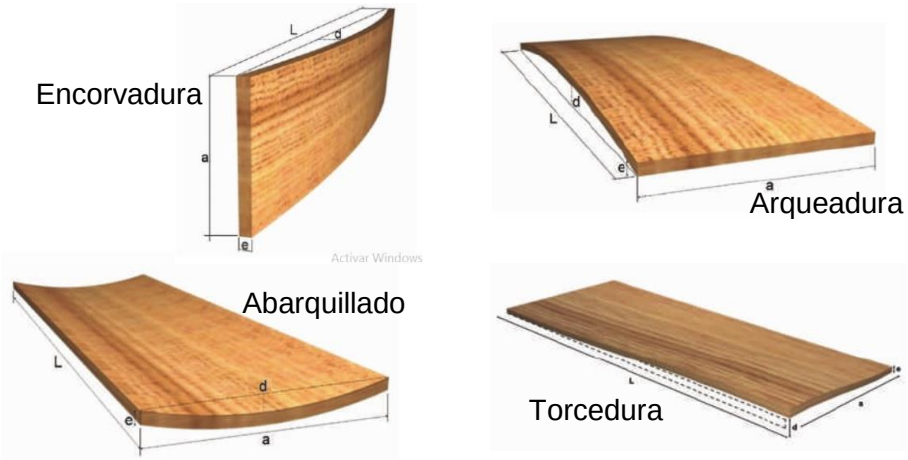


Figura 7. Tipos de alabeos

Para la evaluación de los alabeos después del proceso de secado, existe la norma técnica chilena NCH 993. EOf72. Madera. Procedimientos y criterios de evaluación para la

clasificación. El cual evalúa cuatro tipos de alabeos y se clasifican los defectos de acuerdo a la Tabla 8 (Ver pág. 41)

En base a la Norma Chilena Nch 993.EOf72, se determinaran los valores límites de alabeos y se calcula un índice de calidad, por la relación siguiente:

$$I = \frac{Na * 0 + Nb * O.5 + Nc * 2 + Nd * 2.5}{M}$$

I : Índice de Calidad.
Na : Nº de piezas sin defectos.
Nb : Nº de piezas con defecto leve.
Nc : Nº de piezas con defecto moderado.
Nd : Nº de piezas con defecto severo.
M : Nº de piezas totales de la carga.

De acuerdo al valor que se obtenga, se clasificara la calidad de secado, mediante la Tabla 9 (Ver pág. 41). Atributos de calidad según alabeos (adaptada de Kauman y Mittak, 1996)

2.2.14.2 Contenido de humedad final

Hernandez (1998), menciona que el Grupo de Secado Europeo –EDG (por sus siglas en inglés) define tres clases de calidad de secado: “Estándar” (S), “Secado de calidad” (Q) y “Exclusivo” (E), establecidas de acuerdo a la variación del contenido de humedad final de las piezas de un lote de secado.

S (Estándar): Se refiere a un lote para el cual su uso final aún no ha sido definido y que presenta requisitos de calidad no muy altos.

Q (Secado de calidad): Se sugiere para lotes con requisitos más altos.

E (Exclusivos): Se relaciona con usos finales específicos, con altos requisitos de calidad de secado.

En la tabla 10 (Ver pág. 42), se define los rangos en las que puede variar la humedad de una carga de madera, para

clasificarse en las clases S, Q o E. Por ejempló si un lote de madera tiene como contenido de humedad final el 10%, el 90% de las lecturas a realizarse deberán estar en un rango de 7,0 a 13,0 % de contenido de humedad, para que el secado sea considerado de clase Estándar.

2.2.14.3 Grietas y colapso

Las grietas superficiales y en los extremos de las piezas de madera aserrada se presentan con mayor frecuencia en las primeras etapas del secado, cuando se aplica un gradiente de secado alto. La causa de la formación de estas grietas es el secado rápido de la superficie y de las capas adyacentes y la consiguiente contracción de esta zona., así lo afirma (JUNAC, 1989).

Además, e mismo autor menciona que un severo endurecimiento artificial puede traer como consecuencia la formación de grietas internas. Esto ocurre cuando los esfuerzos de tensión perpendicular al grano y de cizalladura son superiores a la resistencia de la madera. La madera que presenta este defecto prácticamente no tiene uso. Por otro lado, el colapso celular es el resultado de un programa de secado muy severo en madera muy humedad que tiene todas sus cavidades llenas de agua libre.

Para el control de calidad de colapso y grietas, Hernandez (1998), hace referencia a las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo – EDG, que define tres grados de intensidad de grietas y colapso (Leve, moderado, severo) y que se clasifica de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 11.

El documento presentado por Hernandez (1998), sobre las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo. Menciona que las grietas internas (GI), no debe ser evaluado de acuerdo a su longitud o profundidad, sino que en relación a

su frecuencia (Tabla 11). Por ejemplo, para la intensidad Leve, el agrietamiento interno no debe exceder el 2% de la carga.

El EDG, menciona que las grietas superficiales (GS), solo abarcan extensiones en el sentido longitudinal y pueden llegar a una profundidad considerable, aunque nunca en la forma de una rajadura. En la Tabla 11, para la evaluación de calidad para intensidad Leve, serán aceptadas aquellas grietas de hasta 2 mm de profundidad, debido a que esta será removida en el proceso de cepillado.

En relación a las grietas en los extremos (GE), el EDG, dice que este tipo de defecto pude cubrir todo el espesor de la pieza como una rajadura, pero en ese caso el largo de la grieta es limitado. La evaluación se hace determinando el largo de la grieta y la frecuencia. Por ejemplo, para una clasificación de intensidad Leve, el largo de la grieta no debe ser mayora a 5 cm en más del 10 % de la carga.

Finalmente, el colapso a menudo se asocia con el agrietamiento interno y se reconoce porque las superficies de las piezas muestran un corrugado disparejo o una excesiva contracción. El grado de rugorosidad en una pieza es evaluado estableciéndose la diferencia entre el espesor transversal mayor y menor de la pieza y se clasifica según la tabla 11.

2.2.14.4 Tensiones en la madera

La expresión madera tensionada, según Alvarez & Fernandez (1992), comprende todos los síntomas que son causados por gradientes de humedad que se crean en el interior de la madera durante el proceso de secado. Incluye la disminución aparente de la permeabilidad (al flujo de salida) debida al secado de la capa superficial y muy especialmente al desarrollo de tensiones de secado que

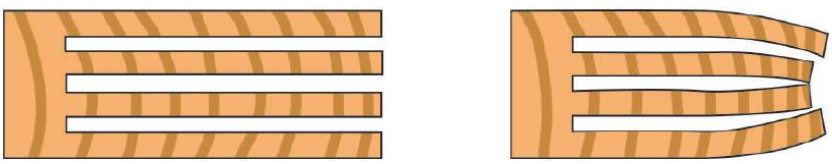
pueden permanecer en la madera aún después que el secado ha finalizado.

Para la evaluación de la tensión en la madera, citamos a Welling (2010), quien hace parte del Grupo de Secado Europeo y menciona que existe una norma propuesta de Norma Europea 14464. Madera aserrada, método para determinar endurecimiento (tensión)

Eta norma se basa en las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo y su clasificación de calidad (Estándar, Calidad, Exclusivo), obedece a las aberturas que pueden generarse en las probetas de control. Para este método se debe cortar una pieza de 15 mm de largo, ancho >75 mm, mínimo 300 mm de distancia del extremo de la tabla. La pieza obtenida debe ser cortada a la mitad de su espesor, tal como lo muestra la figura 9 (Ver pág. 42)

Se mide la abertura entre las 2 porciones de la pieza después de un tiempo de acondicionamiento de 48 horas en una bolsa plástica. Se clasifica en función de la tabla 12 (Ver pág. 42)

Otro método para determinar la tensión de la madera; es la prueba del tenedor. La posición de los “dientes” indica el nivel de tensiones que tiene la madera en su sección transversal. La Figura 8 muestra una madera libre de tensiones (dientes rectos) y una madera con un grado de endurecimiento avanzado (dientes torcidos). Para observar mejor la gravedad de las tensiones se deben quitar los dientes del centro. (JUNAC, 1989)



Fuente: CITEmadera (2017)

Figura 8. Verificación de las tensiones (Prueba del tenedor)

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Agua de constitución: Es el agua que forma parte de la estructura celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las tecnicas normales de secado. Su separación implica la destrucción parcial de la misma, (NTP 251. 130, 2014).

Agua higroscopica: Es el agua que esta impregnada en las paredes celulares, y cuya elimacion en el secado produce fenomenos de contraccion, (NTP 251. 130, 2014).

Agua libre: Es el agua contenida en las cavidades celulares por encima el punto de saturacion de las fibras y cuya eliminacion durante el proceso de secado no produce cambios dimensionales, (NTP 251. 130, 2014).

Alabeo: Es la deformación que experimenta una pieza de madera por la curva de sus ejes longitudinal, transversal o de ambos. Los casos mas frecuentes son el abarquillado, arqueadura, encorvadura, y revirado (NTP 251. 130, 2014).

Anisotropía: Se refiere al diferente o desigual comportamiento de la madera en sus tres ejes (longitudinal, radial, tangencial) (JUNAC, 1989).

Bulbo húmedo: Termómetro que mantiene su parte sensitiva cubierta por una tela de algodón húmeda, altamente adsorbente, (JUNAC, 1989).

Bulbo seco: Termómetro que permanece siempre seco e indica la temperatura real del aire, (JUNAC, 1989).

Capilaridad: Propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial la cual, a su vez, depende de la cohesión del líquido y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar, (JUNAC, 1989).

Contenido de humedad de equilibrio (UGL): Es el contenido de humedad que alcanza la madera cuando expuesta a condiciones ambientales constantes durante un tiempo adecuado. Es decir, es la condicion de equilibrio entre la humedad de la madera y el medio ambiente que lo rodea, (NTP 251.130, 2014).

Contracción: Es la disminución de las dimensiones que sufre la madera cuando pierde humedad por debajo del punto de saturación de las fibras. El valor de las contracciones se expresa en % de alguna de las dimensiones que tenía la madera

en estado verde. Puede ser longitudinal, tangencial, radial y volumetrica, (NTP 251. 130, 2014).

Difusión: Es el movimiento espontaneo del agua en la madera, desde los sitios de más alta concentración hacia aquellos de menor contracción, (JUNAC, 1989).

Electrodos: Dispositivos hechos de un material conductor de la electricidad, usualmente puntillas de acero, que sirven para conectar la madera al circuito de higrometro, (NTP 251. 130, 2014).

Higroscopicidad: Es la capacidad de ganar o perder agua según las condiciones ambientales del lugar donde se encuentre, (NTP 251. 130, 2014).

Higrómetro: Instrumento para medir contenido de humedad de la madera mediante la acción de un material higroscópico colocado en la atmosfera en contacto con la madera, o en el interior de un orificio que se hace a la pieza de madera, (JUNAC, 1989).

Humedad relativa: Es la relación entre la presión real del vapor de agua existente en la atmosfera, y la presion del vapor saturado de la misma a igual temperatura, (JUNAC, 1989).

Programa de secado: Es la serie de temperaturas y humedades relativas que se establecen previamente para el secado de una carga de madera, (JUNAC, 1989).

Punto de saturación de las fibras: Etapa en el secado de la madera en la cual las paredes celulares están saturadas de agua y las paredes celulares no contienen agua. En general, esto corresponde a un contenido de humedad de 25 a 30%, (JUNAC, 1989).

Tensión de secado: Son los esfuerzos que se originan en el interior de la madera, como consecuencia de las diferencias de contracción producidas por la variación del contenido de humedad o del gradiente de secado, (JUNAC, 1989).

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se realizó a través de un método experimental, descriptivo y comparativo.

Para ello se inició con la caracterización del tiempo y la calidad de secado del programa inicial, posteriormente se ajustaron las variables de secado (Temperatura y Contenido de humedad de equilibrio) hasta conseguir un menor tiempo de secado sin que aparezcan defectos significativos, estos ajustes se realizaron a través del análisis de la calidad de secado y gradiente de secado

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población estuvo conformada por 6000 pt de parquet de la especie estoraque, correspondiente a la producción diaria en una Industria Maderera.

La muestra estuvo conformada por 84 piezas de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) de; 25 mm x 100 mm x 450 mm, repartidas en número de 21 piezas para cada uno de los 4 experimentos realizados, de acuerdo a la capacidad del prototipo de horno convencional.

3.3 PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1 Determinación del tiempo y calidad de secado, aplicando un programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms *(*estoraque) a nivel laboratorio.

A. Tiempo de secado

- Los experimentos de la investigación se realizaron en el laboratorio de secado de la madera, perteneciente al Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica Forestal (CITEforestal Pucallpa), cuyas instalaciones se encuentra ubicada en el Jr. Flora y Fauna Nº 199 – Carretera Federico Basadre km. 4,200, dentro del distrito de Callería, provincia de Coronel Portillo, región Ucayali.

- Previamente las muestras de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) se forraron con Fil Stretch, para evitar la pérdida de humedad de las piezas de madera, que podrían ser influenciados por las condiciones ambientales del entorno.
- El ***programa de secado inicial*** corresponde al utilizado para para el secado de la madera *Dipteryx micrantha* Harms (shihuahuaco) de 25 mm de espesor y que también es utilizado para el secado de la madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), el cual se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Programa de secado inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

Fase	Tiempo (hora)	T (ºC)	CHE (%)	C. H. (%)	Gradiente
Calentamiento	6	40	19	x	0,75
Secado Antes PSF		43	17	35	0,84
Secado Antes PSF		46	15,3	22	0,93
Secado Antes PSF		47	14,6	19	0,97
Secado Después PSF		49	13,5	16	1,19
Secado Después PSF		48	12,5	14	1,12
Secado Después PSF		49	11	13	1,18
Secado Después PSF		49	9,5	11,5	1,21
Secado Después PSF		49	8	10	1,25
Acondicionamiento	14	40	14	9	0,64
Enfriamiento	10	28	9	x	

Fuente: IMADPeru (2017)

La Tabla 7, muestra que las etapas de calentamiento, acondicionamiento y enfriamiento, tienen previamente establecida la variable de tiempo, mientras que el secado antes y después del PSF, estará definida por la velocidad en la que la madera pierde humedad bajo la influencia de ciertas condiciones de secado. En el inicio de la fase de “Secado Antes del Punto de Saturación de las Fibras, cuando el contenido de humedad de la madera (C.H) es mayor a 35%, el programa indica que la temperatura (T) debe ser 43 °C; el contenido de humedad de equilibrio (CHE) 17% y la gradiente de secado 0,84. Una vez que

la humedad de la madera baja hasta 22%, se procede a programar las condiciones establecidas en el siguiente punto, hasta que la madera disminuya su humedad hasta 19%. Esta misma lógica se aplica para los siguientes pasos hasta que la madera llegué al contenido de humedad final deseado.

- En este ensayo, aplicando el programa inicial, se utilizaron 21 probetas de madera de 25 mm x 100 mm x 450 mm.
- Previo al secado se codificaron en números del 1 al 21, y se registraron sus dimensiones en espesor y ancho, seguidamente se midió el contenido de humedad inicial con la ayuda del higrómetro GANN y se evaluaron los defectos de forma (abarquillado, arqueadura, encorvadura, torcedura) y estructura (grietas). La información se registró en el formato de evaluación previa a secado experimental, que se muestran en el Anexo 4.
- El armado de la carga de madera, se realizó de forma manual directamente en el prototipo de la cámara de secado, donde a medida que se fueron apilando el paquete de probetas, se colocaron 4 sensores, para monitorear la humedad durante el proceso de secado.
- El proceso de secado inicio con la aplicación de condiciones de secado descritos en la tabla 7 (programa inicial). El prototipo de horno convencional se programó de forma manual. Para el cambio de las variables se utilizó la aplicación de control remoto (Team Wiewer 13).
- La computadora del prototipo de horno de secado, registró automáticamente cada media hora, los datos de temperatura, humedad de equilibrio y promedio de contenido de humedad de la madera.

B. Calidad de secado

- Terminado el proceso de secado, se evaluaron la calidad de las probetas siguiendo la metodología de dos estándares. La norma Chilena “NCH 993. EOf72. Madera. Procedimientos y criterios de clasificación”, para evaluar alabeos y las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo (European Drying Group), para

evaluar la homogeneidad de la humedad, tensiones de secado y grietas – colapso.

- Se evaluaron 4 tipos de alabeos (acanaladura, arqueadura, encorvadura y torcedura) determinando el nivel de alabeo, en base a los criterios establecidos en la tabla 8.

Tabla 8. Niveles de alabeos admisibles en mm.

Alabeo	Espesor	S/alabeo	Leve	Moderado	Intenso
Acanaladura	25 mm	0	1-3	3-5	>5
Arqueadura		0	1-3	3-6	>6
Encorvadura		0	1-2	2-3	>3
Torcedura		0	1-2	2-7	>7

Fuente: NCH 993. EOf72

- Con los datos obtenidos se calculó el índice de calidad, mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{Na * 0 + Nb * O,5 + Nc * 2 + Nd * 2,5}{M}$$

I : Índice de Calidad.
Na : N. º de piezas sin defectos.
Nb : Nº de piezas con defecto leve.
Nc : N. º de piezas con defecto moderado.
Nd : Nº de piezas con defecto severo.
M : Nº de piezas totales de la carga.

- De acuerdo al valor que se obtuvo, se clasificó la calidad de secado, mediante la Tabla 9. Atributos de calidad según alabeos (adaptada de Kauman y Mittak, 1996)

Tabla 9. Atributos de calidad según alabeos

Índice de Calidad	Atributo	Certificación de calidad
Menor a 0,1	Excelente	Adecuada
0,1 – 0,5	Muy bueno	
0,51 – 1,0	Bueno	
1,1 – 1,5	Satisfactorio	Poco adecuada
1,51 – 2,0	Regular	
2,1 – 3,0	Defectuoso	Inadecuado
3,1 – 5,0	Malo	
> 5,0	Muy Malo	

- Para la evaluación de la ***homogeneidad de contenido de humedad***, se utilizó las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo (EDG), que define tres clases de calidad de secado: “Estándar (S), secado de Calidad (Q) y Exclusivo €, establecidas de acuerdo a la variación del contenido de humedad final de las piezas de madera. Para ello se determinó el contenido de humedad de las probetas (Anexo 4), y se definió la calidad de secado, siguiendo los parámetros de la tabla 10.

Tabla 10. Tolerancia del CH final según EDG

Clase de calidad	90 % de las lecturas deben estar en el rango	Rango admisible para C. H al 10 %
S	C.H X 0,3	7,0 – 13,0
Q	C.H X 0,2	8,0 – 12,0
E	C.H X 0,1	9,0 – 11,0

Fuente: Recomendaciones del EDG

- La evaluación de las ***grietas y colapso***, se realizó siguiendo las recomendaciones del EDG, que define tres grados de intensidad de grietas y colapso (Leve, Moderado y Severo). Se evaluaron grietas internas (GI), grietas superficiales (GS), grietas en los extremos (GE) y colapso (CO). La información se registró en el formato de control de calidad de secado de la madera (Anexo 4), posteriormente se determinaron la intensidad de grietas y colapso en función de la tabla 11.

Tabla 11. Intensidad de las grietas y colapso

Intensidad	GI (%)	SG (mm)	GE (cm)	CO (mm)
Severa	>10	>5	>20	>6
Moderada	2-10	2-5	5-20	3-6
Leve	<2	<2	<5	<3

Fuente: Recomendaciones del EDG
Elaboración: Ananías *et. al.,* (2008)

- Finalmente se evaluaron las ***tensiones*** en la madera después del proceso de secado, utilizando la propuesta de Norma Europea 14464, presentada por EDG. Para está evaluación, de

cada probeta se cortó una pieza de 15 mm de largo, ancho >75 mm y a ½ del extremo de la pieza. La pieza se cortó a la mitad de su espesor y se acondiciono en una bolsa plástica por 48 horas. Como se muestra en la figura 9.

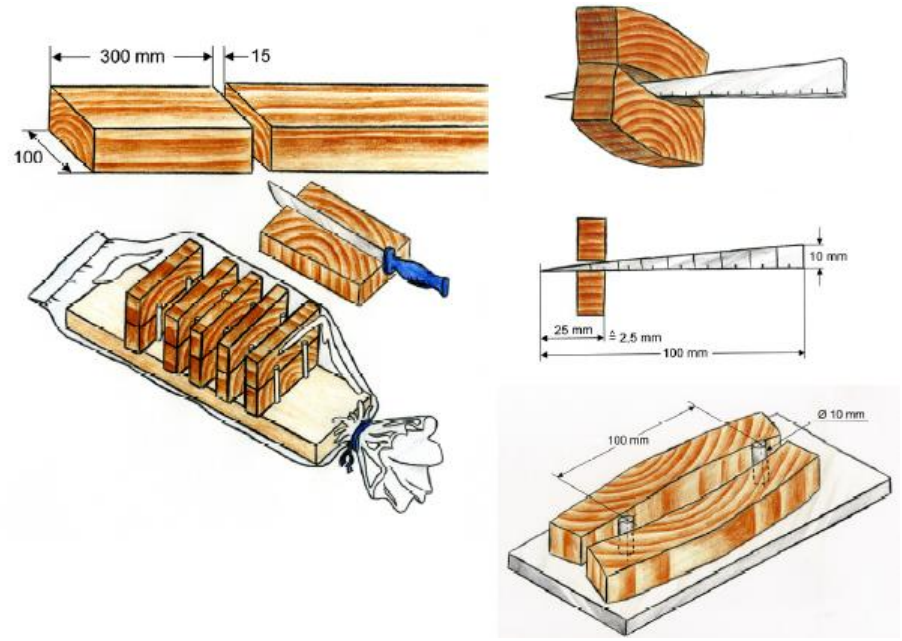


Figura 9. Verificación de la tensión según ENV 14464

Fuente: Recomendaciones del EDG

- Transcurrido el tiempo, se midió la abertura entre las porciones de cada pieza. La información se registró en el formato de control de calidad de secado de la madera (Anexo 4), para posteriormente determinar el grado de tensionamiento en función de la tabla 12.

Tabla 12. Clase del tensionamiento admisible después del acondicionamiento

Clase de calidad	El 90% de las probetas deberán presentar una abertura menor a :
S estándar	< 3 mm
Q calidad	< 2 mm
E exclusivo	< 1 mm

Fuente: Recomendaciones del EDG

3.3.2 Reducción del tiempo de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), reajustando variables del programa inicial.

- Para lograr disminuir el tiempo de secado se modificaron las variables de secado (Tº y CHE) del programa inicial.
- La primera modificación, denominado primer ajuste, se realizó después de la evaluación de la calidad de las piezas de madera, aplicando el programa inicial. El primer reajuste al programa inicial, consistió en incrementar la temperatura y disminuir el contenido de humedad de equilibrio, lo que permitió incrementar la gradiente de secado. Los valores del primer reajuste se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Programa de secado para madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) – Ajuste 1.

Etapa	Tiempo (hora)	Temp. (ºC)	CHE (%)	C. H. (%)	Gradiente
Calentamiento	6	35	22	x	X
Secado antes PSF		40	21	50	0,68
Secado antes PSF		42	18	40	0,79
Secado antes PSF		45	15	30	0,95
Secado antes PSF		49	15	25	0,95
Secado antes PSF		51	12	22	1,18
Secado antes PSF		52	11	20	1,29
Secado antes PSF		53	10	18	1,42
Secado antes PSF		53	9	14,5	1,58
Secado después PSF		55	8	13,2	1,65
Secado después PSF		57	8	10,8	1,35
Acondicionamiento	14	58	14	9	0,64
Enfriamiento	10	30	9	x	X

La tabla 13, muestra que el programa – Ajuste 1, en el inicio de la fase de “Secado Antes del Punto de Saturación de las Fibras, cuando el contenido de humedad de la madera (C.H) es mayor a 50%, el programa indica que la temperatura (T) debe ser 40 °C; el contenido de humedad de equilibrio (CHE) 21% y la gradiente de secado 0,68. Una vez que la humedad de la madera baja hasta 40%, se procede a programar las condiciones establecidas en el siguiente

punto, hasta que la madera disminuya su humedad hasta 30%. Esta misma lógica se aplica para los siguientes pasos hasta que la madera llegué al contenido de humedad final deseado.

- Para la segunda modificación, se procedió de la misma manera. Se evaluaron las piezas de madera sometidas al proceso de secado bajo las condiciones del primer ajusté. Se incrementó levemente la temperatura y disminuyó el contenido de humedad de equilibrio, lo que incrementó la gradiente de secado. Los valores del segundo reajuste se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Programa de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) – Ajuste 2

Etapa	Tiempo (hora)	Temp. (ºC)	CHE (%)	C. H (%)	Gradiente
Calentamiento	6	35	22	X	0,65
Secado antes PSF	--	43	16	35	0,89
Secado antes PSF	--	45	14	30	1,01
Secado antes PSF	--	48	12	25	1,18
Secado antes PSF	--	50	10	20	1,42
Secado después PSF	--	53	9	14,2	1,58
Secado después PSF	--	54	7	12	1,71
Secado después PSF	--	55	5,5	10	1,82
Acondicionamiento	14	57	14	9	0,64
Enfriamiento	10	28	9	X	X

La tabla 14, muestra que el programa – Ajuste 2, en el inicio de la fase de “Secado Antes del Punto de Saturación de las Fibras, cuando el contenido de humedad de la madera (C.H) es mayor a 35%, el programa indica que la temperatura (T) debe ser 43 °C; el contenido de humedad de equilibrio (CHE) 16% y la gradiente de secado 0,89. Una vez que la humedad de la madera baja hasta 30%, se procede a programar las condiciones establecidas en el siguiente punto, hasta que la madera disminuya su humedad hasta 25%. Esta misma lógica se aplica para los siguientes pasos hasta que la madera llegué al contenido de humedad final deseado.

- Para el tercer reajuste al programa inicial se procedió de la misma forma descritos en el punto anterior. Los valores del tercer reajusté se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Programa de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) – Ajuste 3

Etapa	Tiempo (Hora)	Temp. (ºC)	CHE (%)	C. H (%)	Gradiente
Calentamiento	6	35	22	X	0,65
Secado antes PSF		53	10	35	1,42
Secado antes PSF		53	7	20	2,03
Secado después PSF		55	6	14,2	2,37
Secado después PSF		57	5	12	2,40
Secado después PSF		58	4	10	2,50
Acondicionamiento	14	57	14	9	0,64
Enfriamiento	10	30	9	X	X

La tabla 15, muestra que el programa – Ajuste 3, en el inicio de la fase de “Secado Antes del Punto de Saturación de las Fibras, cuando el contenido de humedad de la madera (C.H) es mayor a 35%, el programa indica que la temperatura (T) debe ser 53 °C; el contenido de humedad de equilibrio (CHE) 10% y la gradiente de secado 1,42. Una vez que la humedad de la madera baja hasta 20%, se procede a programar las condiciones establecidas en el siguiente punto, hasta que la madera disminuya su humedad hasta 14,2%. Esta misma lógica se aplica para los siguientes pasos hasta que la madera llegué al contenido de humedad final deseado.

3.3.3 Evaluación del efecto de los reajustes en la calidad de secado de madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) a nivel laboratorio.

- La evaluación de la calidad de secado, aplicando el primer reajuste al programa inicial, se realizó siguiendo los procedimientos descritos en el ítem 3.3.1 - B
- De igual manera, se siguió el mismo procedimiento para los reajustes 2 y 3 al programa inicial.

- Los datos de la evaluación de calidad se registraron en el Anexo 5, 6 y 7 para cada reajuste.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS.

3.4.1 Técnicas

- **Observación estructurada**

  Esta técnica nos permitió observar y controlar sistemáticamente los experimentos de secado de la madera. Para lo cual se realizaron 4 ensayos en el prototipo de horno convencional a nivel laboratorio para el secado de la madera estoraque, de manera que para cada nuevo ensayo se aplicaron programas de secado con condiciones más intensas que la anterior (mayor gradiente de secado), con el objetivo evaluar el comportamiento de la madera en su velocidad y calidad de secado.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

- **Hojas de registro**

  Este instrumento, a través del controlador Nigos, permitió registrar automáticamente cada hora las variables del proceso de secado (Temperatura, Contenido de humedad de la madera y contenido de humedad de equilibrio), de cada uno de los ensayos realizados.

  Asimismo a través de los formatos pre-establecidos se evaluaron la calidad de secado de la madera para cada ensayo realizado (Anexo 4, 5, 6 y 7)

3.5 PROCESAMIENTO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos del tiempo de secado de cada uno de los ensayos (Aplicación del programa inicial y sus ajustes) se agruparon y organizaron en una tabla Excel, para la construcción de figuras.

En relación de la calidad de secado, se elaboraron tablas en Excel organizando y agrupando los datos de los experimentos en función del contenido de humedad final, tensión de secado, grietas – colapso y alabeos, para una posterior determinación del nivel de calidad.

3.6 TRATAMIENTO DE DATOS

Los resultados del tiempo de secado de los ensayos realizados, se presentaron en figuras para una descripción estadística y análisis comparativo del tiempo por fase de secado.

En referencia a la calidad de secado de la madera, se determinó la clase de calidad según el contenido de humedad final, tensión de secado, grietas y colapso en base a las Recomendaciones del Grupo de Secado Europeo (EDG). Mientras que para determinar el nivel de secado en función de alabeos se utilizó la norma Chilena “NCH 993. EOf72. Madera. Procedimientos y criterios de clasificación”. Los resultados se presentaron en tablas y figuras, para su descripción técnica y análisis comparativo.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO Y CALIDAD DE SECADO, APLICANDO UN PROGRAMA INICIAL PARA MADERA DE *Miroxylon balsamun* Harms (ESTORAQUE)

La determinación del tiempo por etapa de secado y la evaluación de la calidad de secado de las piezas de madera de estoraque, tras aplicar el programa de secado inicial para espesores de 25 mm a nivel laboratorio, se describen en los siguientes puntos;

4.1.1 Tiempo de secado

Tabla 16. Tiempo por fase de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), aplicando el programa de secado inicial.

Fase	T (°C)	CHE (%)	CH (%)	Tiempo	
				Utilizado	Acumulado
Calentamiento	40	19	x	6	6
Secado Antes PSF	43	17	31.9	43	49
Secado Después PSF	49	13,5	14,1	83	132
Acondicionamiento	40	14	9,2	14	146
Enfriamiento	28	9	9,8	10	156

La tabla 16, muestra el tiempo empleado por cada etapa del proceso de secado aplicando el programa inicial, en el que se necesitó de 156 horas de secado para alcanzar una humedad final promedio de 9,8 %.

Asimismo se observa que el proceso de secado, inició con la etapa de calentamiento, donde se aplicó una temperatura (T) de 40 ºC y un contenido de humedad de equilibrio (CHE) del 19 %, durante 6 horas. La JUNAC (1989) menciona que el objetivo de este proceso es estimular la abertura de los poros de la madera para la penetración del calor, además indica como regla general calcular una hora de calentamiento por centímetro de espesor para las maderas livianas y dos horas por centímetro para maderas densas.

El Punto de Saturación de las Fibras (PSF), para la especie "*Miroxylon balsamun"*, según él CITEmadera (2017), corresponde a un C.H de 14,20%. En el proceso de secado, antes del PSF, esté inició con la aplicación de una temperatura de 43 ºC y un CHE de 17%, y se necesitaron 43 horas para alcanzar el PSF de la especie (14,2%).

Después del PSF, inicialmente se aplicó una temperatura de 49 ºC y un CHE de 13,5% y se necesitaron 83 horas para alcanzar una humedad del 9%. Como se puede observar en la figura 10, el secado después del PSF se hace más lento, por ende, se necesita mayor tiempo de secado, debido a que el agua a remover se encuentra entre las paredes celulares (agua higroscópica) y están unidas por fuerzas de naturaleza molecular y/o eléctrica, las cuales necesitan mayor energía para ser removidas así lo explica la (JUNAC, 1989).

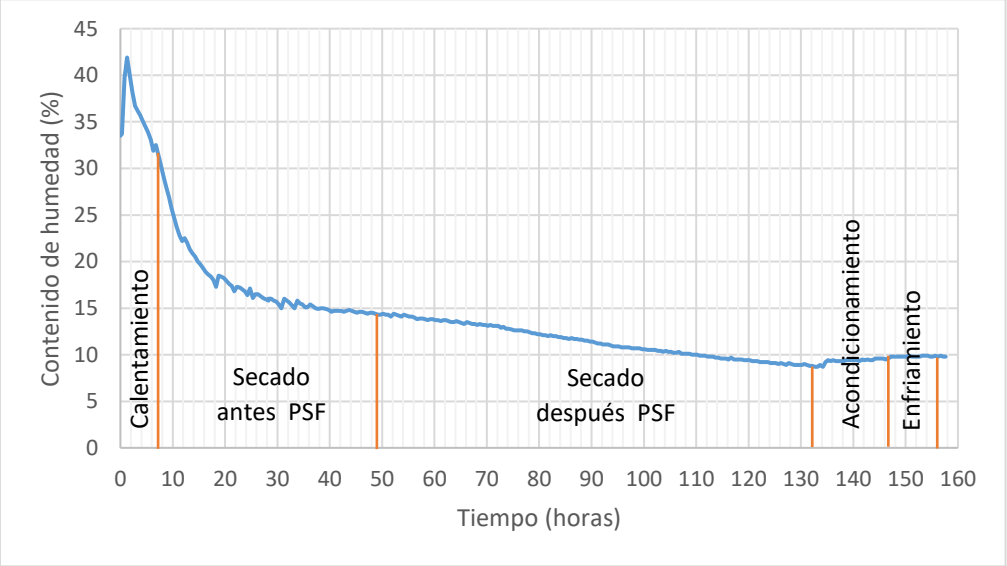


Figura 10. Curva de secado para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), aplicando el programa inicial.

Para la etapa de acondicionamiento se aplicaron 40 ºC de temperatura y 14% de CHE, durante un tiempo de 14 horas. Klitzke (2005) menciona que para esta etapa se debe elevar el CHE, con el objetivo de homogenizar la humedad dentro de la madera y reducir o eliminar las tensiones internas de cada pieza.

Finalmente, para la etapa de enfriamiento se aplicaron 28 ºC de temperatura y 9% de CHE, durante 10 horas. Sepúlveda (2007)

recomienda que se debe evitar la abertura de la cámara con altas temperaturas para que así no se produzca un choque térmico en la carga, lo cual podría generar grietas superficiales.

4.1.2 Calidad de secado

Contenido de humedad y tensión de secado

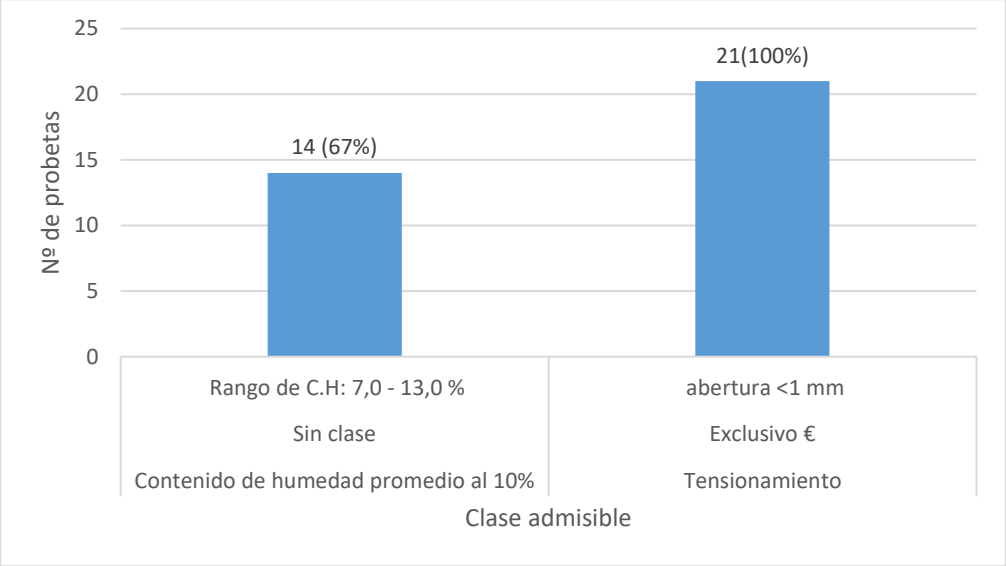


Figura 11. Clase admisible para tensión de secado y C.H promedio del 10%, tras aplicar el programa inicial para el secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

La figura 11, muestra la clase admisible para el contenido de humedad promedio del 10%, en el cual se tuvieron 14 probetas comprendidas en el rango de humedad de 7 – 13 % correspondiente a la calidad Estándar (S), representando un solo un 67% del total de probetas, clasificándolo como un secado “Sin clase”, puesto que no se cumple con el 90% de las probetas en el rango de humedad establecidas por el Grupo de Secado Europeo (Ver tabla 10). Esta variación de la humedad final está relacionada con el coeficiente de variación de la humedad inicial, correspondiente al 23,8%, el cual influenció que algunas probetas secaran más rápida que otras, así lo demuestra el coeficiente de variación de la humedad final de la madera correspondiente al 25%.

Por otro lado, la figura 11, muestra que ninguna de las 21 piezas estudiadas tuvo una abertura por tensión mayor a 1 mm, por lo cual la

clase de secado en cuanto al tensionamiento de la madera se clasifica como Exclusivo €. Para entender este fenómeno JUNAC (1989), explica que el tensionamiento durante el secado artificial, es una consecuencia de un gradiente fuerte de contenido de humedad en una pieza de madera donde las capas superficiales han perdido mucha agua, mientras que el centro permanece todavía húmedo. Este defecto se debe a la aplicación de un programa de secado severo al iniciarse el proceso, alta temperatura y gran diferencia psicométrica. Bajo estas condiciones climáticas, las capas superficiales de la madera pierden rápidamente agua alcanzando un contenido de humedad menor que el correspondiente al PSF, iniciándose por lo tanto una contracción en las capas superficiales y originándose esfuerzos de tensión perpendicular al grano.

Grietas y colapso

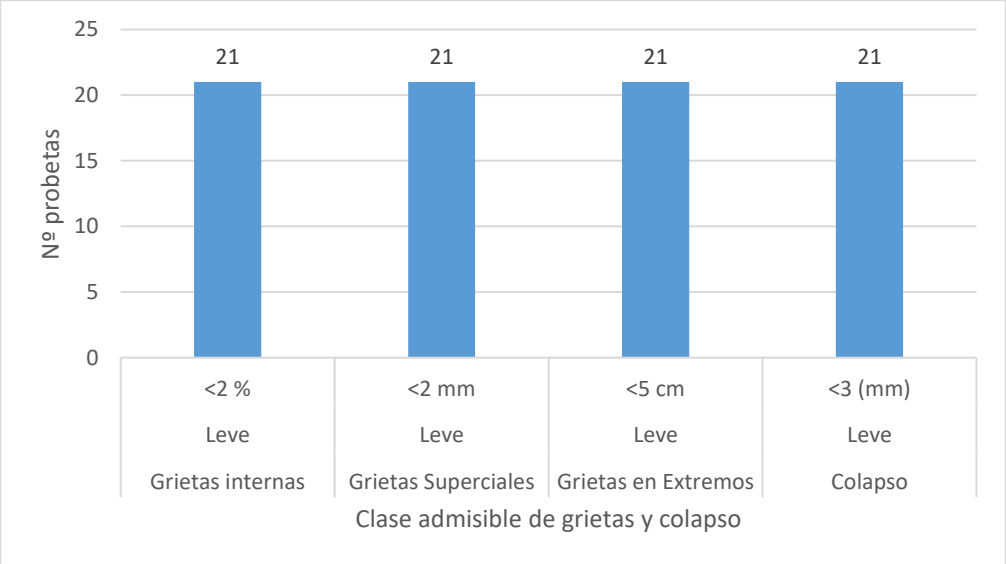


Figura 12. Clase admisible para grietas y colapso, tras aplicar el programa inicial para el secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).

En base a las recomendaciones del Grupo Europeo de Secado (EDG), el efecto en la calidad de secado de la madera, aplicando el programa inicial, en cuanto a grietas y colapso se clasifica con intensidad “Leve”.

La figura 12, muestra que en referencia Grietas Internas ninguna de las probetas evaluadas, presentaron agrietamiento en el interior de su

estructura. No existieron grietas superficiales, como tampoco las grietas en los extremos superiores a los 5 cm de longitud. Finalmente, no existió colapso celular, que pudieron ser producidos por condiciones extremas en el prototipo de secado. La JUNAC (1989), menciona que las grietas superficiales y en los extremos de las piezas de madera aserrada se presentan con mayor frecuencia en las primeras etapas del secado, cuando se aplica un gradiente de secado alto, el mismo autor menciona que la causa de la formación de estas grietas es el secado rápido de la superficie y de las capas adyacentes y la consiguiente contracción de esta zona.

Alabeos

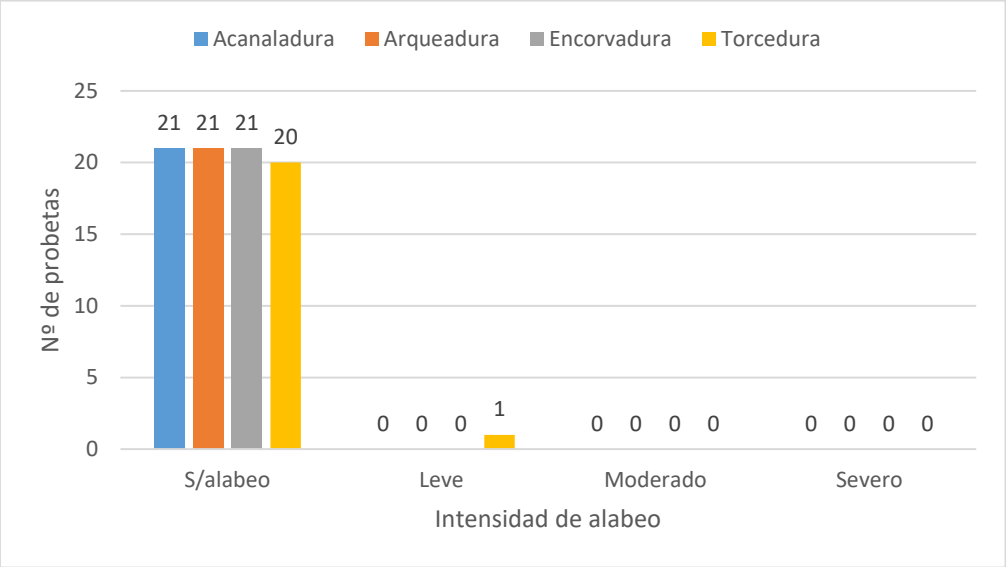


Figura 13. Nº de probetas según intensidad de alabeos, tras aplicar el programa inicial para el secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

En la figura 13, en razón a la intensidad de alabeo, gran parte de las probetas estudiadas no tuvieron alabeos de ningún tipo. Solo hubo 1 probeta con intensidad leve en alabeos de tipo torcedura. No existieron probetas con alabeos de intensidad moderada como tampoco severa. La JUNAC (1989) menciona que el alabeo o combado de piezas de madera durante el secado se debe a sus propiedades de contracción, hasta cierto punto, puesto que se debe a una propiedad natural, no puede catalogarse estrictamente como un defecto. Sin embargo debe ser el propósito de cada operación de secado mantener estas

deformaciones dentro de ciertos límites. Para esto el CITEmadera (2017), recomienda en el apilado usar separadores deben estar perfectamente alineados en dirección vertical y espaciados unos con otros de acuerdo a lo recomendado, lo que es indispensable para evitar el combado y revirado de las piezas, esto también evita el bloqueo del paso del aire entre las filas de la carga cuando los separadores tienen espesor irregular. La primera y la última fila de separadores deben estar lo más cerca posible de los extremos de las tablas para evitar el "voladizo", que ocasiona el agrietamiento y rajado de las testas.

Por otra parte el índice de calidad de secado adaptada por Kauman y Mittak (1996), en base a la norma Nch 993.EOf72, corresponde a ***0,02*** que se clasifican con atributo ***"Excelente"*** y certificación ***"Adecuada".***

4.2 REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE SECADO PARA MADERA DE *Miroxylon balsamun* Harms (ESTORAQUE), REAJUSTANDO VARIABLES DEL PROGRAMA INICIAL

Para reducir el tiempo del proceso de secado para madera estoraque, se realizaron ajustes a las variables de secado del programa inicial, logrando crear 3 programas de secado descritos en la metodología.

4.2.1 Reajuste de variables de secado del programa inicial

Temperatura

Tabla 17. Reajustes de Temperatura al programa de secado inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

Fase de secado	C.H (%)	Temperatura (°C)			
		Inicial	Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 3
Calentamiento	X	40	35	35	35
Secado Antes PSF	35	43	42	43	53
Secado Después PSF	14,2	49	53	53	55
	10	49	57	55	58
Acondicionamiento	9	40	58	57	57
Enfriamiento	X	28	30	28	30

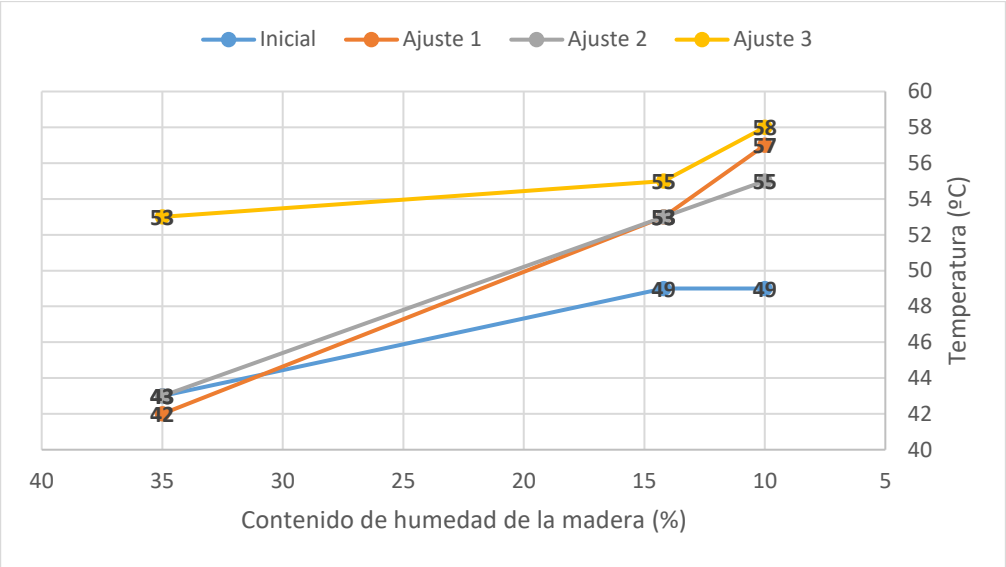


Figura 14. Reajustes de Temperatura (ºC) al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), en las etapas de secado Antes y Después del PSF.

La tabla 17, muestra el resumen de las modificaciones a la variable de temperatura (T°) realizadas al programa inicial. En ella se puede observar que estos ajustes se realizaron básicamente en las etapas; "Secado Antes y Después del Punto de Saturación de las Fibras (PSF). Puesto que los valores para las fases de calentamiento, acondicionamiento y enfriamiento permanecen constantes.

Por otro lado la tabla 17 y la figura 14, muestra que en el primer ensayo, donde se aplicó el programa de secado inicial, la fase de Secado Antes del PSF, inició con la aplicación de 43 ºC para humedades superiores a 35 %. A medida que la madera fuera perdiendo agua libre, se fue incrementando la variable, de tal manera que cuando la madera alcanzó el PSF de la especie (14,2 %), se aplicó una temperatura de 49 °C. Finalmente la fase de "Secado Después del PSF", terminó con la aplicación de 49 °C para un C.H del 10%. La evaluación de la calidad de secado efectuados a las probetas, tras la aplicación de los diferentes ajustes al programa de secado inicial, demostraron que no existieron defectos significativos que pudieran ser causados por la temperatura.

En ese sentido los reajustes permitieron incrementar gradualmente la temperatura, de tal manera que el último ensayo, correspondiente al

programa de secado – ajuste 3, se logró iniciar el proceso de “Secado Antes del PSF” con una temperatura máxima de 53 °C, para contendido de humedad de la madera superiores al 35 %, mientras que en la fase de “Secado Después del PSF” la temperatura máxima aplicada fue de 58 ºC, cuando la madera alcanzo el 10 % de contenido de humedad. Según la JUNAC (1989), estos últimos valores de temperatura corresponden a “programas suaves”, propios de especies de alta densidad, así también se expresan en los programas proporcionados por IMADPeru (2017), donde para el secado de la madera pumaquiro “*Aspidosperna macrocarpon”* de 20mm de espesor se aplica una temperatura máxima de 52 °C y una mínima de 40 °C, en ese mismo sentido para madera quinilla “*Manilkara bidentata”* de espesores menor a 38 mm, soportan temperaturas máximas de 54 °C y mínimas de 42 °C.

Es importante precisar que en el secado intervienen múltiples variables (Temperatura, CHE, velocidad del aire) que interactúan unas con otras. Así lo demostraron (Aquino Gonzales , Rodriguez Ramirez, Mendez Lagunas, & Sandoval Torres, 2010) quienes observaron que un programa de secado para “*Pinus pseudostrobus”* con temperaturas de 76 ºC a 87 ºC y velocidad de aire de 3,35 m/s redujeron el tiempo de secado y la generación de defectos en la madera seca.

Sin embargo, basándonos solamente en la influencia de la aplicación de la temperatura, se puede decir que los ensayos permitieron determinar la capacidad de la madera a resistir temperaturas que pudieran haber provocado defectos como; endurecimiento superficial, colapso o grietas.

Contenido de humedad de Equilibrio y Gradiente de secado

Tabla 18. Gradiente de secado generados por los reajustes del CHE al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

Fase de secado	C.H (%)	Inicial		Ajuste 1		Ajuste 2		Ajuste 3	
		CHE	GS	CHE	GS	CHE	GS	CHE	GS
Calentamiento	x	19	X	22	X	22	X	22	X
Secado antes PSF	35	17	0,84	18	0,79	16	0,89	10	1.42
Secado después PSF	14,2	13,5	1,19	9	1,58	9	1,58	6	2,37
	10	8	1,25	8	1,35	5,5	1,82	4	2,5
Acondicionamiento	9	14	0,64	14	0,64	14	0,64	14	0,64
Enfriamiento	x	9	X	9	X	9	X	9	X

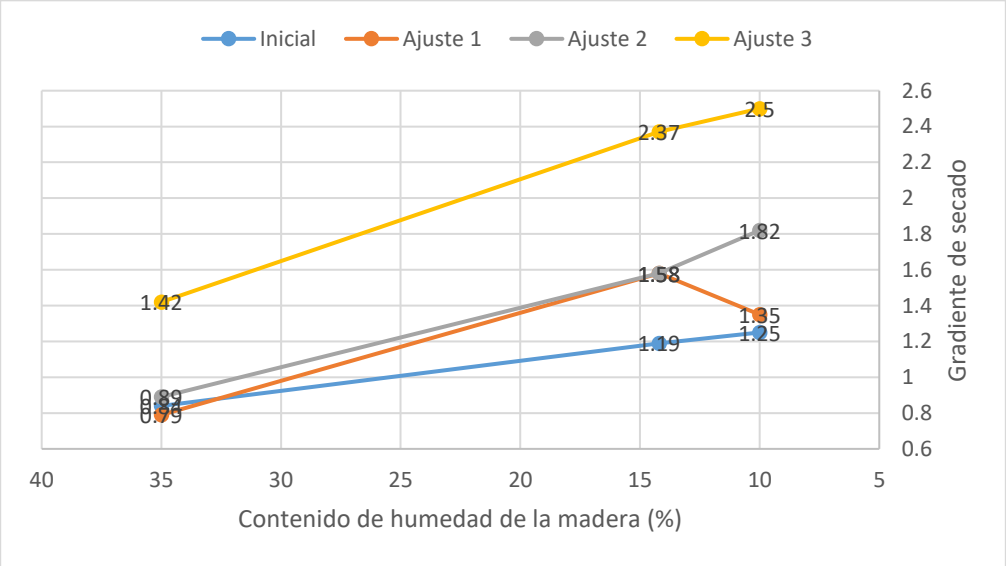


Figura 15. Gradiente de secado de los reajustes al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), en las etapas de secado antes y después del PSF.

En la tabla 18, se presenta el resumen de los Gradientes de Secado (GS) generados a partir de los reajustes del Contenido de Humedad de Equilibrio (CHE) del programa de secado inicial para madera estoraque. La gradiente de secado (GS) es una medida del potencial de secado de la madera y es definida por la JUNAC (1989) como el cociente entre el C.H de la madera y CHE.

La tabla 18 y la figura 15, muestran que el proceso de secado aplicando el programa inicial, comenzó con un CHE del 17%, generando una GS de 0,84 para C.H superior a 35%. Cuando la madera superó el PSF a un C.H de 14, 2 %, el CHE se disminuyó hasta 13,5%, creando una GS de 1,19. Finalmente se programó un CHE del 8%, el cual permitió establecer una GS máxima de 1,25 cuando la madera alcanzó el 10% de C.H. La evaluación de la calidad de secado efectuados a las probetas, tras la aplicación de los diferentes ajustes al programa de secado inicial, demostraron que no existieron defectos significativos que pudieran ser causados por la disminución del CHE y el aumento de la Tº.

Finalmente tal como se muestra en la tabla 18 y figura 15, el último ensayo donde se aplicaron las condiciones de secado del programa inicial – Ajuste 3, se logró una gradiente de secado mínima de 1,42 y una máxima de 2,5 este último valor es similar a los recomendado por Robert Hildebrand, citado por CITEmadera (2017), quien menciona que para el secado de especies de alta densidad como la "*Manilkara bidentata"* (0,96 g/cm^3), "*Hymenaea courbaril"* (0,83 g/cm^3), "*Tabebuia serratifolia"* (1,03) y "*Peltogyne paniculata"* (0,83 g/cm^3) la GS máxima por debajo del PSF debe ser 2,6.

Sin embargo la GS máxima (2,5) logrado en el presente estudio, se torna muy alto, en comparación con los programas proporcionados por IMADPeru(2017), donde por ejemplo para el secado de "*Dipteryx micrantha"* (0,87 g/cm^3) de 20 mm de espesor, se aplica una gradiente máxima de 1,44, para el mismo espesor de piezas de "*Tabebuia serratifolia"* (1,03) la GS máxima es de 1,3 mientras que el "*Cariniana decandra"* (0,59 g/cm^3) por ser una madera de densidad media la GS se eleva hasta 1,6

En ese sentido la densidad se manifiesta como uno de los un parámetro muy importante en el secado de la madera. CITEmadera (2017) explica que entre más densa es una madera, más masa hay que deshumidificar y por ende el secado demora más tiempo. En ese mismo sentido Zavala

(2000) indica que este fenómeno se produce porque las maderas densas tienen una estructura anatómica particular y con paredes celulares más gruesas y cavidades (lúmenes) más reducidas que las maderas más ligeras, por lo que ofrecen una mayor resistencia al paso del agua.

La JUNAC (1989), menciona que, dependiendo de la especie y el espesor, la GS puede variar entre 1,5 y 4,5. Sí es muy bajo, el tiempo de secado se prolongará innecesariamente; si es demasiado alto, el secado se acelerará, pudiendo ocasionar un endurecimiento superficial y la aparición de grietas internas y en los extremos de las piezas.

En ese sentido es fundamental, la determinación de GS adecuada para las especies en particular, puesto que puedan garantizar la calidad de la madera seca, teniendo presente en todo momento la productividad del proceso.

4.2.2 Tiempo del proceso de secado, tras aplicar los diferentes ajustes al programa inicial

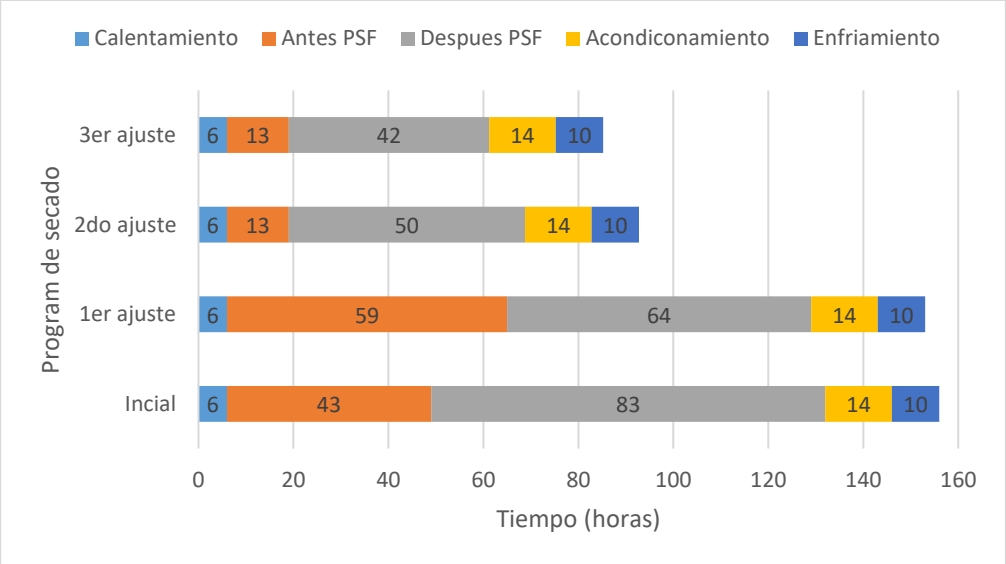


Figura 16. Tiempo por etapa del proceso de secado, aplicando los diferentes ajustes al programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)**.**

La figura 16, muestra el tiempo por etapa de secado, tras aplicar los diferentes ajustes realizados al programa inicial para el secado de

madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque). El proceso de secado inicio con la etapa de calentamiento de la madera que tuvo una duración de 6 horas en todos los ajustes realizados al programa inicial. De la misma forma en la fase de acondicionamiento y enfriamiento se programaron el uso de 14 y 10 horas respectivamente. Para entender estos valores constantes en todos los experimentos es necesario Citar al CITEmadera (2017), que nos explica que los programas de secado sólo indican las condiciones de la etapa de secado propiamente dicho (antes y después del PSF), y no aquellas del calentamiento, acondicionamiento inicial y acondicionamiento final porque dependen de otros factores como especie, espesor, humedad inicial de la madera, gradiente de humedad, humedad final de la madera, etc.

Por otro lado, la figura 16 muestra que, aplicando el programa de secado inicial, se necesitaron 43 horas para conseguir disminuir un 30% de C.H hasta el PSF de la especie (14,2%). Después de esta condición se requirieron 83 horas para alcanzar un C.H de 8,9%. El proceso de secado tuvo una duración total de 156 horas (6,5 días). Asimismo en la figura 16, se muestra que bajo las condiciones del programa inicial-ajuste 3, se necesitaron 13 horas para alcanzar el PSF de la especie estoraque. Por debajo de esta condición se requirieron 42 horas para conseguir un C.H de la madera del 8,8%. El tiempo total empleado en este proceso corresponde a 85 horas (3,5 días). Finalmente este último ensayo (Programa de secado inicial – ajuste 3) nos permitió disminuir el tiempo de secado en 71 horas (2,8 días).

Este valor resulta muy diferente, frente a lo alcanzado por Davila (2016), quien aplicó dos programas de secado para andiroba *"Carapa guianensis"*, logrando disminuir el tiempo de secado en 4 horas. Mientras que Reategui (2016), para el secado de cumala "*Virola sp"*, disminuyó el tiempo de secado en 12 horas, en ese mismo sentido Garcia (2016), aplicó dos programas de secado para Capirona "*Calycophyllum spruceanun"*, logrando disminuir el proceso de secado en 12 horas.

Es importante precisar que los autores anteriormente citados, realizaron los ensayos con programas previamente establecidos, sin modificar o ajustar las variables de secado, lo que responde el corto tiempo reducido.

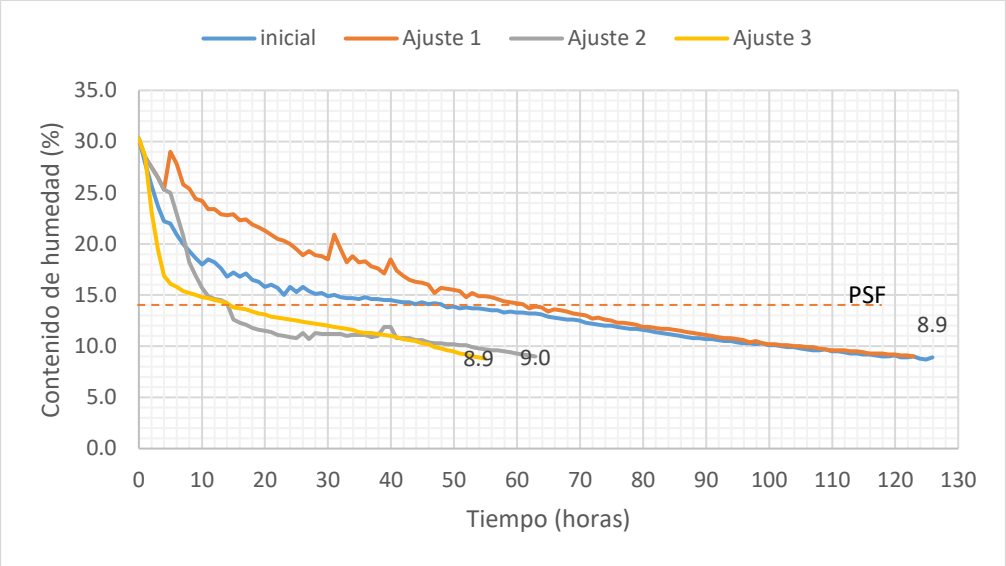


Figura 17. Curva de secado de madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) en la fase Antes y Después del PSF, aplicando los diferentes ajustes del programa inicial.

Por otro lado, la figura 17 muestra el comportamiento del secado de la madera estoraque, en la “Fase de Secado Antes y Después del PSF”. En la cual observamos que a medida que se fueron ajustando las variables de secado del programa inicial, existió una clara influencia en el comportamiento de la curva de secado de las piezas de madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque). Como se puede observar, existe diferencia en la curva de secado “Antes y Después del PSF. La JUNAC (1989), explica que en el “Secado Antes del PSF”, existe un rápido descenso de la humedad, debido a que las moléculas de agua (agua libre), se encuentran ocupando las cavidades celulares y al iniciarse el secado esta se va perdiendo fácilmente por evaporación, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles.

Tal como muestra la figura 17, tras los ajustes de las variables de secado del programa inicial, se logró disminuir desde el 30% hasta el 14,2%, en un tiempo de 13 horas sin provocar defectos en la madera.

Este último valor, difiere con lo proporcionado por IMADPeru (2017), donde para el secado de la especie Shihuahucaco "*Dipteryx micrantha*" de 20 mm de espesor, con humedad inicial de 46% hasta el PSF (22%), se necesitaron 169 horas, asimismo para el secado del Pumaquiro "*Tabebuia serratifolia"*, con humedad inicial del 30 % hasta el PSF (24%), se requieren 130 horas.

Frente a lo mencionado, se puede deducir que la especie en estudio presenta ideales características para el secado industrial, probablemente este potencial, se debe a los rasgos anatómicas ya que según Cumapa (2015), están constituidos por poros múltiples y pararenquima paratraqueal vasicentrico que facilitan una rápida evacuación del agua de la madera, sin producir colapso celular o agrietamiento interno.

La figura 17 también muestra que por debajo del PSF, el secado de la madera se vuelve más lento, debido a que el agua a remover se encuentra entre las paredes celulares (agua higroscópica) y están unidas por fuerzas de naturaleza molecular y/o eléctrica, así lo explica la JUNAC (1989). En ese sentido Sepúlveda (2007), menciona que para mantener la velocidad de secado se debe aumentar progresivamente la GS y las temperaturas.

Por otro lado, Zavala (2000), señala que un factor importante para la velocidad de secado corresponde a la densidad de la madera, pues al aumentar la densidad, los tiempos de secado se incrementan como consecuencia de la mayor resistencia al movimiento del agua hacia el exterior. Este fenómeno se produce porque las maderas densas tienen una estructura anatómica particular y con paredes celulares más gruesas y cavidades (lúmenes) más reducidas que las maderas más ligeras, por lo que ofrecen una mayor resistencia al paso del agua.

4.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS REAJUSTES DEL PROGRAMA INICIAL EN LA CALIDAD DE SECADO DE MADERA DE *Miroxylon balsamun* Harms (ESTORAQUE)

4.3.1 Calidad según "Contenido de humedad"

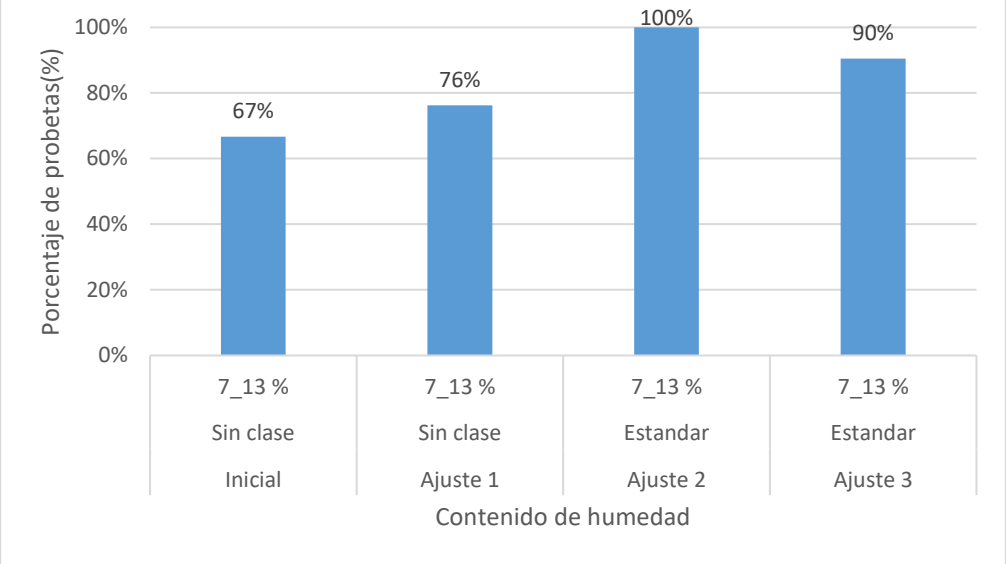


Figura 18. Clase admisible del contenido de humedad, según reajustes del programa inicial para madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).

La figura 18, muestra la clasificación del contenido de humedad del secado de madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), tras aplicar los diferentes reajustes al programa inicial. Esta clasificación se basa en la homogeneidad de contenido de humedad de la madera, siguiendo las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo (EDG), que define tres clases de calidad de secado: "Estándar (S), secado de Calidad (Q) y Exclusivo €, establecidas de acuerdo a la variación del contenido de humedad final.

En ella se observa que, tras la aplicación de las condiciones de secado del programa inicial, solo el 67% de las probetas estuvieron en el rango de humedad final entre 7 – 13 %, definiendo el proceso como un secado "Sin clase", ya que se necesita que el 90% de las probetas estén el rango de humedad mencionado. De la misma manera tras aplicar el programa inicial – Ajuste 1, la clasificación de la calidad corresponde a un secado "Sin clase", debido a que solo un 76% de las probetas

estudiadas estuvieron en el rango establecido. Por el contrario, en la aplicación de condiciones de secado del segundo y tercer ajuste, la calidad se clasifica como un secado “Estándar”, donde más del 90% de las probetas estuvieron comprendidas en el contenido de humedad de 7- 13%.

Esta misma clasificación de calidad de secado (“Estándar”), fue determinado por Ananias, Salvo, Estrada, & Briones (2008), en el estudio de secado de acacias de 50 mm de espesor de corte radial y tangencial. En ese mismo sentido Perez, Ananias, & Hernadez (2007), tras aplicar un programa de secado para canelo “*Drimys Winter”* de 25 mm de espesor, determinó una calidad superior a “Estándar”, para los diferentes ensayos realizados.

La variabilidad del contenido de humedad final está influenciado por diversos factores como; la especie, calidad, espesor, pero principalmente por el contenido de humedad inicial y el apilado de la carga de la madera, así lo menciona la JUNAC (1989). En ese sentido el autor explica que la madera con contenido de humedad inicial muy variables dificultan el secado y lo prolongan innecesariamente. Lo más conveniente es entonces seleccionar los lotes lo más homogéneos posibles. Mientras que un correcto apilado garantiza un uniforme pasó del aire a través de las pilas de madera, secando homogéneamente la madera.

Tabla 19. Valores estadísticos del Contenido de Humedad final de la madera (%), según los ajustes del programa inicial

C.H de la madera	Inicial	Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 3
Valor máx.	13,9	20,3	12,2	13,5
Valor min.	5,9	8,1	7,8	6,5
Promedio	*8,4*	*12,2*	*9,9*	*9,8*
Desv. Stand	2,1	3,5	1,2	1,8
C.V	25,0%	28,5%	12,1%	18,2%

Por otra parte, la tabla 19 muestra los valores estadísticos del contenido de humedad final de la madera. En ella se observa que, tras la aplicación del programa inicial, la evaluación de la humedad final, arrojo

un C.H promedio de 8,4 % con un Coeficiente de Variación (C.V) de 25%, mientras tanto para el ensayo donde se aplicaron las condiciones del Ajuste 1, el CH final promedio corresponde a 12,2 %, con un CV de 28,5 %, demostrando una alto grado de heterogeneidad de la humead final, la cual es causante de que en los dos primeros ensayos no se haya logrado una calidad de secado. Consecuentemente la tabla 19, también muestra que para el ensayo donde se aplicaron las condiciones de secado del ajuste 2 y 3, el CH final promedio, corresponde a 9,9 % y 9,8 % respectivamente, con un CV debajo del 18,2%.

Para probar la influencia estadística de la variación de humedad final en los promedios de contenido de humedad final de los reajustes del programa inicial, se realizó un análisis de varianza de un factor.

Tabla 20. Análisis de varianza (ANVA) del promedio de contenido de humedad final, de los diferentes reajustes del programa inicial.

F.V	***S.C***	***GL***	***CM***	***FC***	***P - Valor***	***Signif***
Reajustes	159,6	3	53,2	9,9974	0,000011*	*
Error	425,7	80	5,3			
Total	585,3	83				

* = *Significativo* (*p<0.05*)

En la Tabla 20, se observa que p-valor es menor que α= 0,05, existiendo diferencia altamente significativa entre los promedios, a un nivel de confianza de 95 %, lo que permite inferir la influencia de la variabilidad del contenido de humedad de la madera. Con el objeto de conocer cuáles de los promedios son iguales o significativamente diferentes, se realizó la comparación de promedios, utilizando la prueba de Tukey cuyo resumen se detalla en la tabla 21.

Tabla 21. Prueba de comparación de los promedios de contenido de humedad final, de los diferentes ajustes del programa inicial (Tukey α= 0.05).

Programa de secado	**Promedio**	**Significancia**
Inicial	8,4	ACD
Ajuste 1	12,2	B
Ajuste 2	9,9	CAD
Ajuste 3	9,8	DAC

En la tabla 21, se observa que promedio del contenido de humedad final del programa de secado – Ajuste 1, es significativo con respecto al programa Inicial, Ajuste 2 y Ajuste 3. Por otra parte no existe diferencia significativa entre promedio de contenido de humedad final de los programas; inicial, Ajuste 2 y Ajuste 3.

Finalmente para minimizar la heterogeneidad del contenido de humedad final de las piezas de madera, el CITEmadera (2017), menciona que se debe incluir en el proceso de secado la fase de acondicionamiento inicial, que consiste en saturar de humedad la cámara para homogenizar la humedad de la madera, eliminando así las tensiones de secado. Además esto favorece la llegada de calor al centro de las piezas. El mismo autor, con respecto a los controladores menciona que es importante que estos dispongan de un bloqueo del aumento de la temperatura mientras el CHE no es alcanzado en el interior de la cámara.

4.3.2 Calidad según “tensión de secado”

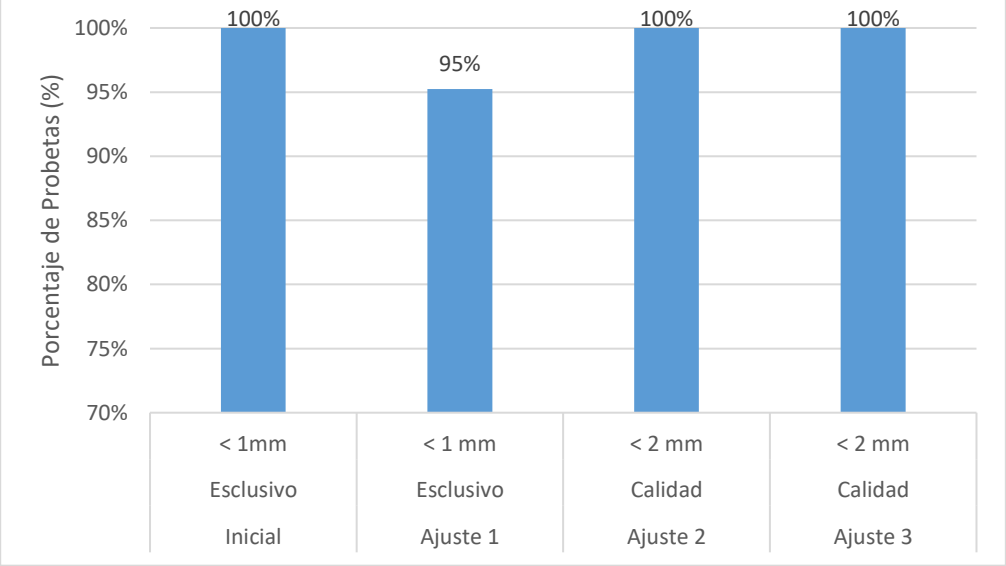


Figura 19. Clase admisible del tensionamiento de secado, según reajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).

La figura 19, muestra la clasificación de tensión de secado de los ensayos realizados siguiendo las recomendaciones del Grupo de

Secado Europeo (EDG). En ella se observa que tras realizar los dos primeros ensayos aplicando el programa inicial y ajuste 1, la calidad de secado en función de la tensión producida en la madera, se clasifica como “Exclusiva (E)”, ya que más del 95% de las aberturas producidas en las probetas fue menor de 1 mm. Mientras que para los ensayos aplicando los ajustes 2 y 3, corresponde a un secado de “Calidad (Q)”, debido a que la abertura en el 100% de las probetas fue menor de 2 mm. Estos resultados demuestran condiciones de temperatura y contenido de humedad de equilibrio adecuado para el secado de madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).

Las calidades encontradas en el estudio son diferentes a lo encontrado por Ananias, Salvo, Estrada, & Briones (2008), en el estudio de secado de acacias de 25 mm de espesor, donde determinó una calidad de secado “Estándar (S)”. De la misma manera Perez, Ananias, & Hernadez (2007), tras aplicar un programa de secado para canelo “*Drimys winteri*” de 50 mm de espesor, determinó una calidad “Estándar”, para los diferentes ensayos realizados.

CITEmadera (2017), menciona que las tensiones de secado dentro de la madera, se desarrollan en las paredes celulares y son una consecuencia del gradiente de contenido de humedad que se presenta entre las capas superficiales y el centro de la madera. Las maderas con tensiones internas se tuercen en el posterior proceso de labrado.

Klitzke (2005), explica que para reducir o eliminar estas tensiones internas de cada pieza, se debe prolongar el tiempo de acondicionamiento en el proceso de secado, con el fin de homogenizar la humedad de la madera, para ello se debe exponer la madera a altas temperaturas y elevada humedad relativa, con el fin de aumentar su plasticidad y reducir el gradiente de contenido de humedad entre las capas exteriores e interiores

Tabla 22. Valores estadísticos de la abertura por tensión (mm), según los ajustes del programa inicial

Tensión	Inicial	Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 3
Valor máx.	0,87	1,21	1,90	1,87
Valor min.	0,37	0,55	0,43	0,13
Promedio	*0,54*	*0,78*	*0,83*	*0,61*
Des. Stand	0,14	0,23	0,44	0,45
C.V	26%	30%	52%	74%

Por otra parte, la tabla 22, muestra los valores estadísticos de la tensión producida en la madera para cada ensayo realizado. Donde se observa que, aplicando el programa inicial, la prueba de tensión determinó una abertura promedio de 0,54 mm, con una tensión máxima de 0,87 mm y un Coeficiente de variación (C.V) del 26%, mientras al aplicar el Ajuste 1 del programa inicial, la tensión promedio generada fue de 0,78 mm y una máxima de 1,21 mm. Seguidamente tras aplicar los ajustes 2 y 3, se generó una tensión promedio de 0,83 mm y 0,61 mm respectivamente. El incremento de la tensión, es causado por las condiciones de secado propias de cada ajuste realizado al programa inicial.

Para determinar si existe diferencia estadística entre el promedio de abertura por tensión de los reajustes al programa inicial se realizó el análisis de varianza de un factor.

Tabla 23. Análisis de varianza (ANVA) del promedio de abertura por tensión, de los diferentes reajustes del programa inicial.

F.V	*S.C*	*GL*	*CM*	*FC*	*P - Valor*	*Signif*
Reajustes	0,7007	3	0,2335	1,7501	0,1714	*_
Error	5,60557	42	0,1334			
Total	6,3063	45				

* = *Significativo* (*p<0.05*)

En la Tabla 23, se observa que p-valor es mayor que α= 0,05, demostrando que no existe diferencia significativa entre los promedios, a un nivel de confianza de 95 %. Por lo tanto estadísticamente los programas aplicados en los experimentos no influyen en el tensionamiento de la madera.

4.3.3 Calidad según “Grietas y Colapso”

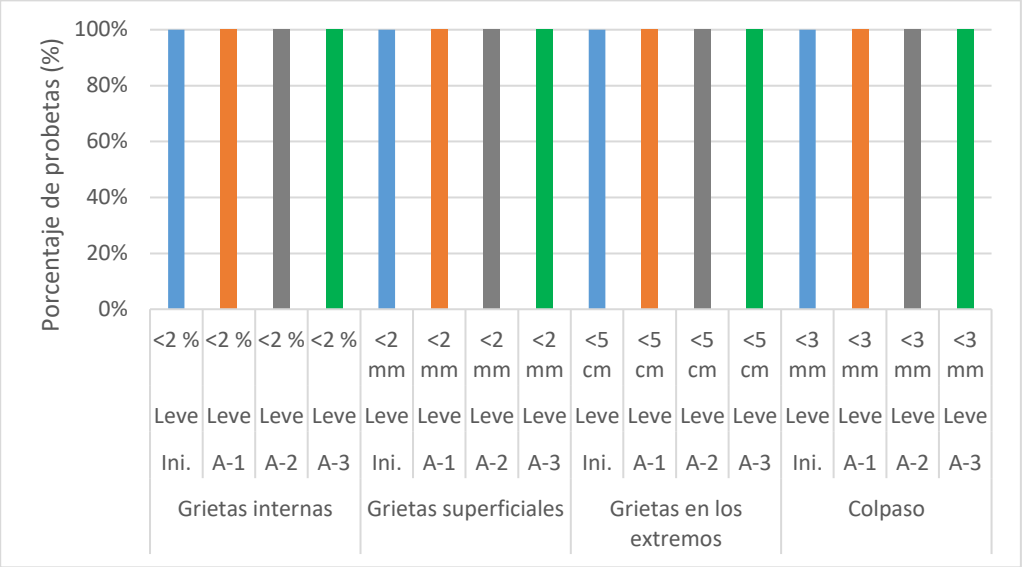


Figura 20. Clase admisible para grietas y colapso, según reajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque).

La figura 20, muestra la clasificación de calidad de secado en base a las Gritas internas, Grietas Superficiales, Grietas en los Extremos y Colapso. Esta clasificación se basa en las las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo – EDG, que define tres grados de intensidad de defectos; Leve, moderado y severo. En la figura se observa, que no se generaron “Grietas internas” tras la aplicación de los programas de secado Inicial (Ini.), Ajuste 1(A-1), Ajuste 2 (A-2) y Ajuste 3 (A-3), definiendo el secado con intensidad “Leve”. Asimismo no se presentaron Grietas superficiales y Colapso tras la aplicación de los diferentes programas de secado, definiendo el secado con intensidad “Leve”. Finalmente en cuanto a las Grietas en los extremos, el secado se clasifica con intensidad “Leve”, sim embargo existieron grietas que no superaron los 5 cm de longitud, el cual se detallan en la tabla 24.

CITEmadera (2014), explica que las aparición de grietas superficiales, son consecuencia de condiciones muy severas dentro de la cámara de secado (Tº muy alta, Humedad relativa muy baja, velocidad del aire muy alta).

Tabla 24. Valores estadísticos de la longitud de grietas en los extremos (cm), según los ajustes del programa inicial

Grietas en extremos	Ajuste 2	Ajuste 3
Valor máx.	4,40	4,90
Valor min.	0,50	1,40
Promedio	*1,52*	*2,46*
Desv. Stand	0,94	1,22
C.V	62%	50%

La tabla 24, presenta los valores estadísticos de las grietas generadas tras la aplicación de los programas Ajuste 2 y 3. En ese sentido la tabla muestra que en el ajuste 2, se generaron grietas en los extremos con una longitud promedio de 1,52 cm y un CV de 62%. Mientras que tras aplicar el programa inicial – ajuste 3, se formaron grietas con una longitud promedio de 2,46 y un C.V de 50 %. El aumento de la longitud de las grietas, principalmente es causado por el incremento sucesivo de la temperatura y el descenso de los niveles de CHE del programa inicial.

CITEmadera (2014), menciona que la presencia de grietas en los extremos, es causada por la rápida eliminación del agua por las testas o los extremos, para ello recomienda previo al secado y después de emparrillar, sellar completamente los extremos de las tablas con pintura látex, mezclado con cola, esmalte sintético o parafina.

Para entender mejor este fenómeno, la JUNAC (1989), explica que este defecto, se presenta con mayor frecuencia en las primeras etapas de secado, producto de la aplicación de un gradiente secado alto, que provoca un rápido secado de la superficie de la madera y de las capas adyacentes y la consiguiente contracción de esta zona.

Es importante citar a Hernandez (1998), quien, en referencia a las recomendaciones del Grupo de Secado Europeo, menciona que, hasta cierto nivel de longitud de las grietas, está podrá ser removida en los consiguientes procesos que se le efectué a la madera.

4.3.4 Calidad según “Índice de alabeos”

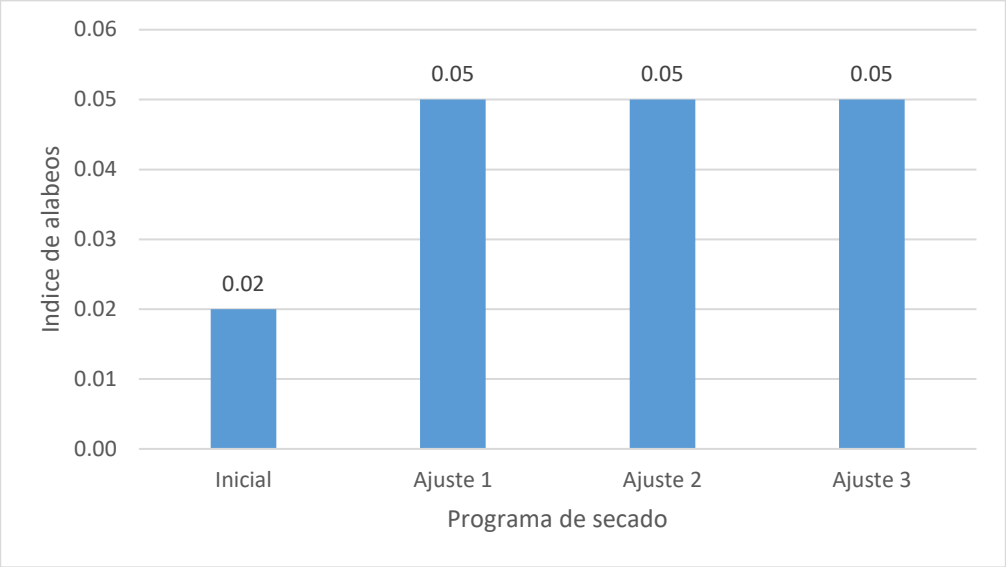


Figura 21. Índice de Calidad de Alabeos, según reajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

La figura 21 presenta el índice de calidad, según el nivel de alabeos producidos tras la aplicación de los diferentes programas de secado generados. La figura, muestra que, tras la aplicación del programa inicial, el índice de calidad, en base a nivel de alabeo corresponde a 0,02, que se clasifica con atributo de “Excelente” y certificación “Adecuada”. Mientras que los ensayos de secado aplicando los ajustes 1, 2 y 3, el índice de calidad corresponde a 0,05, el cual también se clasifica con atributo “Excelente” y certificación “Adecuada”.

Este resultado es muy superior a lo determinado por Davila (2016), quien determinó una clasificación de “Muy bueno” de dos programas para el secado de la especie “*Carapa guianensis”*. En ese mismo sentido Reategui (2016), concluye que para el secado de “*Virola sp”*, el programa 1 es “Bueno”, mientras que el programa 2 es “Muy bueno”.

Por otra parte, en relación a los estudios realizados a maderas de alta densidad, Legoas (2008), determinó para el “*Dipteryx micrantha”*, un índice de calidad de 1,77 y 1,92, correspondiente a un atributo “regular” y certificación “Poco adecuada”. Mientras que para “*Calycophyllum*

spruceanun", Garcia (2016), concluyo que el programa 1, es "Bueno", mientras que el programa 2 es "Muy Bueno".

Tabla 25. Intensidad del tipo de alabeo, según los ajustes del programa inicial para madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

Programa secado	Intensidad	Tipo de alabeo				%
		Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedura	
Inicial	S/ alabeo	21	21	21	20	98,8
	Leve	0	0	0	1	1,2
	Moderado	0	0	0	0	0,0
	Severo	0	0	0	0	0,0
Ajuste 1	S/ alabeo	21	20	20	21	97,6
	Leve	0	1	1	0	2,4
	Moderado	0	0	0	0	0,0
	Severo	0	0	0	0	0,0
Ajuste 2	S/ alabeo	21	21	21	19	97,6
	Leve	0	0	0	2	2.4
	Moderado	0	0	0	0	0,0
	Severo	0	0	0	0	0,0
Ajuste 3	S/ alabeo	21	20	20	21	97,6
	Leve	0	1	1	0	2,4
	Moderado	0	0	0	0	0,0
	Severo	0	0	0	0	0,0

Por otra parte, la tabla 25 muestra que, tras la aplicación del programa inicial, el 98,8 % de las probetas evaluadas no presentaron alabeos, solo el 1,2 % presentaron alabeo de intensidad leve. Para los ensayos donde se aplicaron los programas Ajuste 1, 2 y 3 el 97,6% no presentaron alabeos, mientras que el 2,4 % de las probetas se presentaron alabeos de intensidad "Leve".

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. El programa de secado inicial, permite secar la madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), en un tiempo de 156 horas, con calidad "Exclusivo" para tensión de secado, intensidad "Leve" para grietas – Colapso y Secado "Excelente" para alabeos.
2. Los reajustes a las variables de temperatura y contenido de humedad de equilibrio al programa de secado inicial para madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque) permitieron reducir el tiempo de secado en 71 horas (45%).
3. El secado con los diferentes ajustes del programa inicial, permitió generar efectos en la calidad de secado "Sin clase" y "Estándar" para contenido de humedad; clase "Exclusivo" y "Calidad" para tensión de secado; intensidad "Leve" para grietas y colapso; y proceso de secado "Excelente" para alabeos.
4. Los diferentes programas generados en esta investigación, demostraron ser adecuados para el secado de la madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque). Obteniendo mejores resultados con el programa – Ajuste 3, debido a que se logró secar la madera en menor tiempo y mantener la calidad de secado.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar el estudio de secado de la madera de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque), aplicando “Programa – Ajuste 3” a nivel industrial, para comparar y validar la información generada en esta investigación.
2. Impulsar este tipo de investigaciones con el objetivo de mejorar la productividad y competitividad de las industrias madereras de la región Ucayali y el País.
3. Aplicar diferentes velocidades de aire, como una variable de secado, que pueda influir en la reducción del tiempo en el proceso de secado de la madera.
4. Tener en cuenta la homogeneidad del contenido de humedad inicial de la madera, para un secado uniforme.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez, H., & Fernandez, J. (1992). *Fundamentos teoricos del secado de la madera.* Madrid: Coleccion Monografias INIA, Num 82.

Ananias, R., Salvo, L., Estrada, R., & Briones, R. (2008). ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SECADO A TEMPERATURAS CONVENCIONALES DE ACACIAS. *Maderas. Ciencia y tecnologia Vol. 10, Nº 2*, 151-162.

Aquino Gonzales , L., Rodriguez Ramirez, J., Mendez Lagunas, L., & Sandoval Torres, S. (2010). Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (Pinus pseudostrobus). *Maderas y Bosques Vol. 16 Nº 2*, 35-46.

Arostegui, A. (1975). *Estudio Tecnologico de las maderas del Peru. Tomo II. Ensayos Tecnologicos.Metodos y procedimientos.* Lima-Peru: UNAMA.

Bertoglio, J. A. (2006). *Evaluacion de un programa de secado de Pinus radiata D. Don impregnado con sales de CCA.* Valdivia: Universidad Austral de Chile.

BOLFOR. (1998). *Guia practica para el secado de madera en hornos.* Santa Cruz: El Pais.

Camara Nacional Forestal. (2014). *Giua Practica para el Secado de madera en Hornos Convencionales.* Arequipa.

Camara Nacional Forestal. (2014). *Guia Practica para el Secado de madera en Hornos Convencionales.* Arequipa.

CITEmadera. (2008). *Identificacion Organoleptica y Macroscopica de Maderas Comerciales.* Lima: FIMART S.A.C.

CITEmadera. (2009). *Tcnicas de secado de la madera.* Lima: Laura Servicios Graficos y Editoriales S.R.L.

CITEmadera. (2012). *Identificacion y Levantamiento de Informacion de las Caracteristicas Tecnicas de los Hornos de Secado de Madera de las*

Empresas de Pucallpa. Pucallpa: Centro de Innovacion Tecnologica de la Madera.

CITEmadera. (2014). Buenas Practicas para el Secado de Madera en Hornos Convencionales. En *Buenas Practicas para el Secado de Madera en Hornos Convencionales* (pág. 13). Lima: Corporacion Creagrama E.I.R.L.

CITEmadera. (2017). *Manual para Operadores de Secadores Convencionales de madera.* Lima: CITEmadera - GIZ.

Confederacion Peruana de la Madera. (2008). *COMPENDIO DE INFORMACION TECNICA DE 32 ESPECIES FORESTALES TOMO I.* Lima: Reimpresión realizada con el apoyo del Centro de Innovación Tecnológica de la Madera-CITEmadera/Ministerio de la Producción.

Cumapa, J. E. (2015). *Cracterizacion Macroscopica de especies maderables en cuatro aserraderos de Tambopata - Madre de Dios .* Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Davila, M. I. (2016). *EVALUACIÓN DE DOS (02) PROGRAMAS DE SECADO ARTIFICIAL DE LA ANDIROBA (carapa guinenses Aubl) DE 4/4 ESPESOR EN EL CIEFOR - PUERTO ALMENDRAS, IQUITOS - PERU.* Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonia Peruan.

Delgado, G. (1981). *Propiedades de la madera.* Venezuela: Escuela de Ingenieria Forestal. Universidad de los Andes Merida.

Foglia, R. C. (2005). Conceptos basicos sobre el secado de la madera. *KURU - Revista Forestal (Costa Rica) 2 (5), 2005*.

Forest Products Laboratory. (2010). *Wood Handbook.* Madison: United States Department of Agriculture Forest Service.

Garcia, E. M. (2016). *Comportamiento al Secado Artificial de la Capirona (Calycophyllum spruceanun) de 4/4 pulgada de espesor, en base a dos (02) programas de secado en el Ciefor Puerto Almendras. Iquitos. Peru.* Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.

Gonzales, R. (1989). *Secado y preservacion del Eucalipto.* La Molina - Lima: Departamento de Industrias Forestales U.N.A.

Hernandez, G. (1998). Recomendación-EDG (European Drying Group). Evaluación de la calidad del secado de la madera. *Ciencia e Investigacion Forestal Vol. 12, Nº 1*, 79-97.

IMADPeru. (3 de Octubre de 2017). Programas para secado de estoraque. (L. O. Acuña, Entrevistador)

INTA. (2001). *Contenido adecuado de humedad de la madera.* Buenos Aires, Argentina: Estacion Experimental Balcarse.

Inunza. (2005). *Manual de capacitacion de secado artificial de madera aserrada.* Chile.

Jimenes, J. d. (2011). *Influencia de la humedad de la madera en la evaluacion de las propiedades mecanicas del pino silvestre mediante tecnicas no destructivas.* Madrid - España: Universidad Politecnica de Madrid - Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Montes.

Jimenes, S., Scarioni, L., & Vano, K. (2013). Sensores de humedad de tipo capacitivo y resistivo, fabricados con NaCl, KBr y KCl. *INGENIERIA UC Vol. 20 Nro 1*, 83-86.

JUNAC. (1989). *Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas.* Cartagena: CARVAJAL S.A.C.

Klitzke, R. (2005). *Curso de secagen da madeira.* Brasil: Universidad Federal Do Parana, Brasil.

Legoas, R. C. (2008). *ESTUDIO DEL SECADO CONVENCIONAL Y RENDIMIENTO DE Dipteryx micrantha Harms. EN EL ASERRADERO FORESTAL RÍO PIEDRAS S.A.C - TAMBOPATA.* Puerto Maldonado: Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios.

Maza Chamba, H., & Sinche Fernandez, L. (2014). Calidad de secado con variaciones de planos de corte y programa de secado de cinco especies de bosque secundario. *CEDAMAZ Vol. 3,*, 37-53.

Medrano, S., Aranda, V., & Velasco, N. (2004). *Calibracion de higrometros para madera, metodos y trazabilidad.* Jalisco - Mexico: Metas y Metrologos Asociados.

Morales, E. (2004). Madera al exterior: Humedad de equilibrio higroscopico y sus valores caracteristicos. *Boletin de informacion Tecnica Nº 226, Universidad de Sevilla, España*, 44-48.

NTP 251. 130. (2014). *Secado de la madera; Terminologia y definiciones.* Lima: INDECOPI.

Perez, P., Ananias, R., & Hernadez, G. (2007). ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SECADO DE RENOVALES DE CANELO (Drimys winteri). *Maderas. Ciencia y tecnologia vol. 9, n 1*, 59-70.

Pomachagua, J. (1993). *Industria de la madera.* Huancayo - Peru.

Reategui, A. P. (2016). *Evaluación del comportamiento del secado artificial de madera corta de la especie cumala (Virola sp.), en cámaras de aire caliente en la Industria Inversiones La Oroza S.R.L. Loreto - Perú.* Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.

Sepulveda, C. (2007). *Aplicacion de un programa de secado convencional en base a perdida de humedad para madera Aromo Australiano (Acacia melanoxylon).* Valdivia: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.

Serfor. (2016). *PERU FORESTAL EN NUMEROS 2015.* Lima: SERFOR.

Solano, O. (1998). *Seminario sobre diseño de ingenieria y proceso de secado de maderas tropicales.* Medellin - Colombia: Centro Nacional de la Madera, Servicio Macional de Aprendizaje "SENA".

Welling, J. (2010). *Dried Timber.* Hamburgo: Johannes Welling.

Zavala, D. (2000). *Secado de maderas tropicales en estufas cnvenionales. Madera y Bosques.* SAGAR - Mexico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias.

ANEXOS

ANEXO 1

Descripción técnica del prototipo de Horno convencional

A. Modelo : IMAD LAB 01

B. Medio de calefacción : Resistencia eléctrica

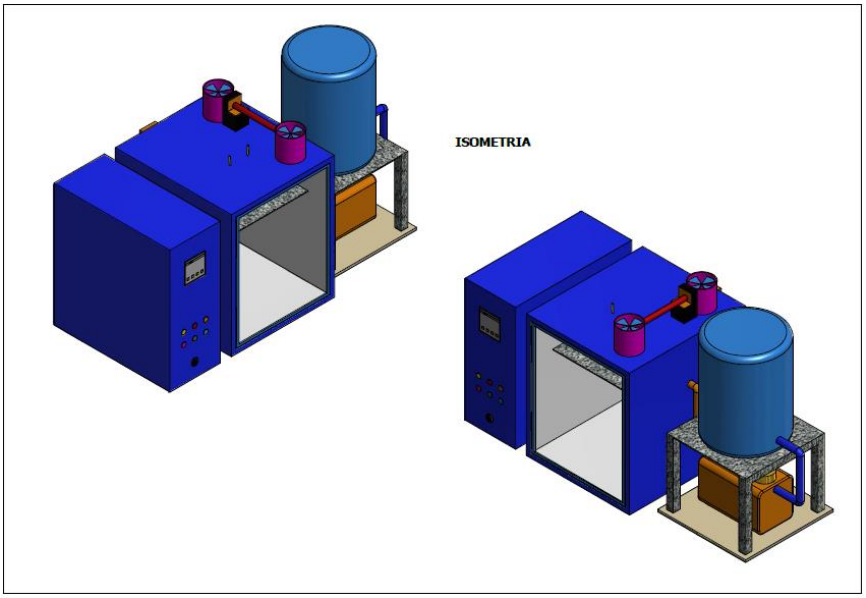
C. Cantidad de madera : 10 pt

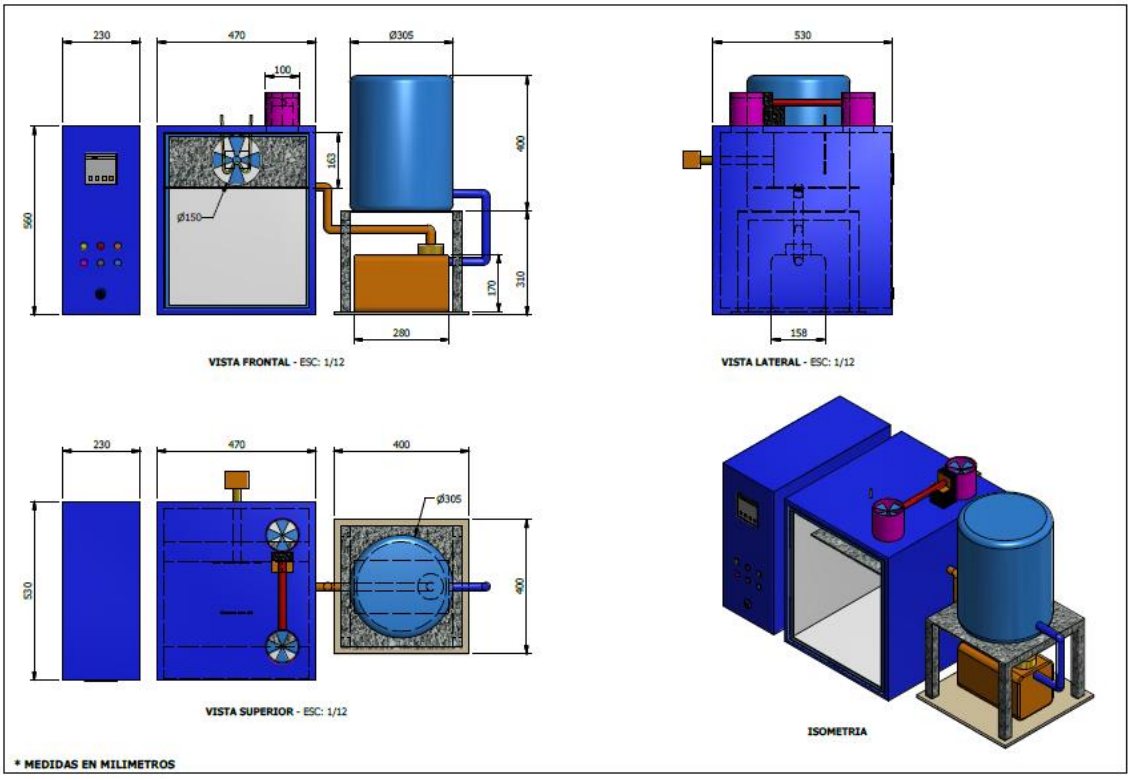
D. Descripción general del prototipo de secado modelo IMAD LAB 01

- Resistencia eléctrica 500 watts.
- Soporte de ventilador.
- Ventilador de 15 cm, diámetro con motor monofásico de 1/8 hp.
- Puerta principal a 1 hoja.
- Extractor de humedad con ventilas.
- Estructura de soporte de aluminio.
- Tablero eléctrico separado de la cabina.
- Sistema de control y registro de data Nigos modelo mc 502.
- Aluminio de 0.8 mm de espesor y aislante térmico con lana de roca para 300 °C.
- Sistema de humectación con agua a presión.

E. Descripción detallada de los equipos del modelo: IMAD LAB 01

- Resistencia eléctrica desmontable con bornes de alimentación en el exterior de horno.
- La hélice es de laton no reversible, con motor monofásico instalado al exterior del horno.
- Puerta hecha íntegramente con perfiles de paneles de aluminio. Tiene jebes especiales para un sellado hermético y el aislante térmico es lana de vidrio con un espesor de 5 cm.
- Soportes en acero pintado con epóxica
- Sistema de extracción mediante ventila automática Belimo
- Potencia instalada: 1500 Watts
- Software para registro de temperaturas





Fuente: CITEforestal (2017)

ANEXO 2

Descripción técnica del controlador

A. Marca **:** Nigos

B. Modelo **:** MC – 502R

C. Descripción detallada

- Gestión automático, semiautomático o manual del proceso de secado en secadores convencionales con regulación ON/OFF.
- Secado de todos los tipos de espesor de madera de 20 a 80 mm.
- Programas fijos (grabados) de secado para todos los tipos de maderas.
- 20 programas elementales (con combinación de grupos de madera y gruesas más de 200 programas).
- 1 entrada para medición de temperatura (-20 - 110 °C).
- 1 entrada para medición de humedad de equilibrio (2.5 - 30% EMC a 0 °C).
- 4 puntos para medición de humedad dentro de la madera (5 - 80% MC a 0 °C).
- 5 salidas de relé para gestionar al equipo: regulación de temperatura, regulación de humedad, función y cambio de la dirección del ventilador (2) y humectación.
- Indicación luminosa de alarma de temperatura y humedad.
- Protección de parámetros con una contraseña de modificaciones no autorizadas.
- Posibilidad de conectarse a un ordenador PC (estándar EIA485).



Fuente: IMADPeru (2017)

ANEXO 3

Descripción técnica de higrómetro de martillo

A. Marca : Gann

B. Modelo : RTU 600

C. Descripción detallada

- Instrumento de medida cuádruple electrónico combinado con display LCD digital para captación de humedad de la madera, humedad de obra, humedad del aire y temperatura
- Equipado con corrección universal para cada especie de madera y compensación automática de temperatura desde –10 hasta +90°C.
- Altura 180 × anchura 115 × profundidad 53 mm, peso aprox. 390 g.
- Muy elevada precisión de medición para cada especie de madera predefiniendo un índice de curva de calibración específico de la especie de madera.
- Compensación automática de temperatura (–10 hasta +90°C).
- Precisión en la medición de temperatura gracias a las resistencias de medida de Pt 100 en técnica de 4 conductores.
- Alimentación eléctrica: batería monobloque de 9 V o batería recargable de NiCd (accesorio especial).



Fuente: IMADPeru (2017)

ANEXO 4

Tabla 26A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa inicial

Nº de probeta	Cubicación y contenido de humedad			Tipo de corte			Defectos de forma (alabeos mm)				Defectos de estructura
	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Cont. Humedad (%)	Tang	Rad	Obli	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedora	Grietas
1	29,94	105,86	45,5			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
2	28,11	105,37	32,1			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
3	27,48	79,40	38,7			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
4	25,21	79,40	36,2			x	0,00	0,86	0,00	0,00	--
5	26,52	104,10	38,1	x			0,00	0,50	0,00	0,00	--
6	27,70	104,01	40,5	x			0,00	1,01	0,00	0,00	--
7	29,01	105,56	43,7	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
8	27,67	108,81	35,9			x	0,00	0,50	0,00	0,00	--
9	26,98	78,87	21,7	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
10	26,27	79,26	38,8			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
11	27,59	104,10	39,6			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
12	27,13	105,20	25,7	x			0,00	2,87	0,00	0,00	--
13	30,91	105,89	37,1	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
14	27,31	105,95	24,1	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
15	27,13	79,20	30,5			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
16	27,21	79,22	30,3	x			0,00	0,76	0,00	0,00	--
17	28,97	106,20	31,2	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
18	26,35	104,10	29,0	x			0,00	0,87	0,00	0,00	--
19	26,50	79,13	13,9	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
20	25,49	105,16	40,4	x			0,00	0,65	0,65	0,00	--
21	31,76	103,61	26,1			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--

Tabla 27A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa inicial

Nº de probeta	Cubicación		Contenido de humedad (%)	Abertura por tensión (mm)	Grietas y Colapso				Alabeos (mm)			
	Espesor (mm)	Ancho (mm)			G I (%)	G.S (mm)	G.E (cm)	CO (mm)	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedura
1	29,31	104,88	11,5	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	27,56	102,89	8,7	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	26,84	77,28	6,8	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	24,78	78,26	6,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	0,57	0,00
5	26,04	102,18	7,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
6	27,35	102,70	8,4	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00
7	28,58	103,42	11,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	27,31	107,55	11,5	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,04	0,00	0,00
9	26,51	77,28	6,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	25,80	77,58	6,8	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00
11	27,06	102,05	8,4	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	26,50	103,02	7,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,11	0,41	0,00
13	30,38	103,80	9,3	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	0,00
14	26,92	103,49	7,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,68	0,62
15	26,74	77,72	7,3	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,76
16	26,93	77,77	6,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	0,00	1,59
17	28,85	105,30	5,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,48	0,00
18	26,16	103,55	8,2	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00
19	26,22	78,50	9,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00
20	25,12	104,58	7,0	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28	0,82	0,00
21	31,92	103,40	13,9	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	0,00

ANEXO 5

Tabla 28A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa – Ajuste 1

Nº de probeta	Cubicación y contenido de humedad			Tipo de corte			Defectos de forma (alabeos mm)				Defectos de estructura
	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Cont. Humedad (%)	Tang	Rad	Obli	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedora	grietas
1	24,64	105,14	24,6	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
2	28,14	105,32	29,9			x	0,00	1,00	0,00	0,00	--
3	27,49	80,27	53,1		x		0,00	0,00	0,00	0,00	--
4	28,03	80,67	33,1	x			0,00	1,00	0,00	1,00	--
5	28,82	105,77	31,6			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
6	29,93	105,94	16,3	x			0,00	0,00	0,00	1,32	--
7	31,51	104,29	33,2			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
8	31,75	105,71	40,5			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
9	28,67	80,42	36,0			x	0,00	0,10	0,00	0,00	--
10	26,49	80,66	54,9	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
11	27,82	104,44	26,4	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
12	30,66	104,85	24,0	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
13	27,90	104,52	35,0			x	0,00	0,00	0,00	1,25	--
14	29,44	104,12	39,2	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
15	30,73	80,60	18,5		x		0,00	0,50	0,00	0,00	--
16	28,21	80,39	16,4	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
17	28,96	104,90	46,0		x		0,00	0,29	0,00	0,00	--
18	30,50	105,80	38,4			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
19	30,37	105,31	38,5	x			0,00	1,00	0,00	0,00	--
20	27,93	104,84	31,2	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
21	30,21	80,46	20,9			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--

Tabla 29A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa – Ajuste 1

Nº de probeta	Cubicación		Contenido de humedad (%)	Abertura por tensión (mm)	Grietas y colapso				Alabeos (mm)			
	Espesor (mm)	Ancho (mm)			GI (%)	GS (mm)	GE (mm)	CO (mm)	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedura
1	24,51	104.11	8,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	27,85	103,47	9,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	0,71	0,00
3	27,11	70,81	9,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	27,67	78,35	8,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,57	0,00	1,18
5	28,51	103,60	10,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	29,41	102,87	8,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,48
7	30,94	101,63	11,0	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	31,26	103,51	11,4	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	28,41	79,73	11,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,00	0,00
10	26,32	79,26	12,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	27,60	101,71	13,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	30,39	102,96	10,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00
13	27,79	102,96	10,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,36
14	29,42	102,87	11,8	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	30,78	79,76	12,2	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	0,57	0,00
16	28,17	79,10	11,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	29,01	104,44	17,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,19	0,00	0,00
18	30,44	104,36	20,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	30,44	105,20	18,5	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,65	0,00	0,00
20	28,07	104,79	14,5	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	30,27	80,07	18,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ANEXO 6

Tabla 30A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa –Ajuste 2

Nº de probeta	Cubicación y contenido de humedad			Tipo de corte			Defectos de forma (alabeos mm)				Defectos de estructura
	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Cont. Humedad (%)	Tang	Rad	Obli	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedora	Grietas
1	28,31	104,52	25,5	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
2	27,35	103,24	31,6	x			0,00	1,28	0,00	0,00	--
3	27,01	79,28	37,1	x			0,00	0,00	0,13	0,00	--
4	29,28	79,39	40,3	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
5	25,11	105,80	28,1	x			0,00	0,00	0,00	1,29	--
6	29,48	104,65	29,7	x			0,00	0,24	0,00	0,00	--
7	26,40	105,00	36,9	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
8	24,90	105,13	33,8			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
9	25,06	78,97	28,6			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
10	28,49	79,22	37,1			x	0,00	0,96	0,00	0,00	--
11	28,07	105,45	50,6			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
12	27,77	105,61	29,0	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
13	28,73	104,98	36,8	x			0,00	0,26	0,00	0,00	--
14	29,37	103,69	37,1	x			0,00	1,11	0,00	0,00	--
15	x	x	16,0	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
16	27,80	79,07	52,6		x		0,00	0,00	1,00	0,00	--
17	24,00	105,35	33,1	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
18	29,66	102,80	37,3			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
19	29,28	104,60	46,9			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
20	26,26	105,78	27,4	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
21	25,02	79,24	40,5			x	0,00	0,72	0,48	0,00	--

Tabla 31A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa – Ajuste 2

Nº de probeta	Cubicación		Contenido de humedad (%)	Abertura por tensión (mm)	Grietas y colapso				Alabeos (mm)			
	Espesor (mm)	Ancho (mm)			GI (%)	GS (mm)	GE (mm)	CO (mm)	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedura
1	28,00	103,02	9,3	0,62	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,88	0,00	1,02
2	26,85	100,90	9,4	1,59	0,00	0,00	1,60	0,00	0,00	1,64	0,73	0,00
3	26,54	77,75	10,2	0,52	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,37	0,52	0,00
4	29,15	78,30	12,2	0,58	0,00	0,00	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	24,63	103,07	7,8	0,65	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28
6	29,07	103,10	9,8	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	0,00	0,00
7	26,01	102,65	9,7	0,91	0,00	0,00	1,70	0,00	0,00	0,85	0,00	0,98
8	24,43	103,60	9,1	0,43	0,00	0,00	1,10	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
9	24,54	77,44	8,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	28,02	78,04	10,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,35	0,00	0,00
11	27,56	103,42	11,4	1,9	0,00	0,00	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	27,49	103,98	8,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	28,54	103,54	11,0	0,71	0,00	0,00	1,10	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00
14	28,87	102,32	9,9	0,00	0,00	0,00	4,40	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00
15	x	x	9,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	27,26	78,17	11,1	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	1,25	0,00
17	23,76	104,70	9,5	0,49	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	29,17	101,42	9,7	1,02	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00	0,68	0,00	0,00
19	28,82	103,29	12,1	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,77
20	25,90	104,54	10,5	1,00	0,00	0,00	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	24,75	78,24	10,6	0,00	0,00	0,00	0.00	0,00	0,00	0,72	0,48	0,00

ANEXO 7

Tabla 32A. Evaluación inicial de las probetas para el proceso de secado aplicando el programa – Ajuste 3

Nº de probeta	Cubicación y contenido de humedad			Tipo de corte			Defectos de forma (alabeos mm)				Defectos de estructura
	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Cont. Humedad (%)	Tang	Rad	Obli	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedora	Grietas
1	27,26	78,59	55,1			x	0,00	0,00	0,71	0,00	--
2	27,39	104,3	44,6			x	0,00	1,00	0,82	0,00	--
3	27,44	104	44,2	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
4	26,16	104,7	43,4			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
5	25,69	105,3	23,3			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
6	26,5	79,23	30,7	x			0,00	0,00	0,82	0,00	--
7	26,44	79,03	11,4	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
8	26,93	104,5	37,6	x			0,00	0,68	0,00	0,00	--
9	23,65	104,2	20,0	x			0,00	1,42	0,00	0,00	--
10	24,96	105,2	38,1			x	0,00	0,00	0,59	0,00	--
11	26,68	105,4	37,1			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
12	25,7	79,29	26,9			x	0,00	1,31	0,53	0,00	--
13	28,24	79,19	39,3	x			0,00	0,33	0,00	0,00	--
14	29,5	103,4	29,7			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
15	28,9	105,4	37,7	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--
16	26,7	105,3	24,8	x			0,00	1,75	0,00	0,00	--
17	27,9	105,9	29,5	x			0,00	0,47	0,00	0,00	--
18	27,97	78,05	37,2	x			0,00	1,55	0,00	0,00	--
19	27,36	79,14	21,8			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
20	26,94	104,3	55,2			x	0,00	0,00	0,00	0,00	--
21	25,81	103,9	38,5	x			0,00	0,00	0,00	0,00	--

Tabla 33A. Evaluación final de las probetas del proceso de secado, aplicando el programa – Ajuste 3

Nº de probeta	Cubicación		Contenido de humedad (%)	Abertura por tensión (mm)	Grietas y colapso				Alabeos (mm)			
	Espesor (mm)	Ancho (mm)			GI (%)	GS (mm)	GE	CO (mm)	Acanaladura	Arqueadura	Encorvadura	Torcedura
1	27,25	77,85	10,3	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,06	0,00
2	27,17	103,01	8,1	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,68	1,14	0,00
3	27,13	102,68	12,9	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	0,00	0,00
4	25,94	103,69	10,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	25,36	102,86	7,9	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89	0,00	0,00
6	26,27	78,30	11,3	0,00	0,00	0,00	1,40	0,00	0,00	1,06	0,86	0,00
7	26,02	77,48	6,5	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	26,84	103,26	9,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89	0,16	0,00
9	23,28	101,85	9,7	0,00	0,00	0,00	4,90	0,00	0,00	1,74	0,00	0,00
10	24,62	103,01	7,9	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00
11	26,37	103,23	8,8	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00
12	25,31	77,08	9,1	0,00	0,00	0,00	2,10	0,00	0,00	2,30	0,90	0,00
13	27,80	77,90	10,5	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	1,03	0,00
14	29,08	101,07	9,5	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	28,61	104,39	9,7	0,00	0,00	0,00	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	25,99	103,67	11,6	1,87	0,00	0,00	1,70	0,00	0,00	2,52	0,00	0,00
17	27,46	103,36	7,2	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	0,00	0,00
18	27,66	76,88	9,6	0,00	0,00	0,00	2,10	0,00	0,00	1,70	0,00	0,00
19	26,97	78,15	10,5	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	26,62	102,74	13,5	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	25,58	102,48	11,7	0,75	0,00	0,00	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ANEXO 8

Lectura del contenido de humedad y abertura por tensión de la madera



Figura 22. Lectura del contenido de humedad final de las probetas de *Miroxylon balsamun Harms* (estoraque)



Figura 23. Lectura de la abertura por tensión de las probetas de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)

ANEXO 9

Defectos provocados en el proceso de secado de la madera estoraque



Figura 24. Grietas en los extremos en las probetas de *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)



Figura 25. Aberturas provocadas por la tensión en la madera *Miroxylon balsamun* Harms (estoraque)