



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA**

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE  
SECADO DE MADERA**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

**JUAN IGNACIO AVILA FELLAY**

**PROFESOR GUÍA:  
FRANCISCO GRACIA CAROCA**

**PROFESOR CO-GUÍA:  
JORGE CASTILLO GUZMÁN**

**MIEMBRO DE LA COMISIÓN:  
WALTER AVILA BEDECARRATZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
MAYO DE 2012**

## Resumen.

El presente trabajo de título tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente, a nivel de factibilidad, la instalación de una planta de secado de madera en la ciudad de Osorno, X región de Los Lagos, por parte de la sociedad de inversiones Comercial Primavera. La finalidad inicial de la planta apunta a comercializar leña seca certificada y a futuro también vender maderas ornamentales de mayor valor agregado.

Para analizar la viabilidad del proyecto se comienza por estudiar y caracterizar el mercado forestal chileno y el mercado de la leña en el sur de Chile, buscando determinar una especie arbórea óptima para ser comercializada como leña certificada. Los criterios para realizar esta elección abarcan todos los aspectos relevantes de la leña: abundancia, disponibilidad, dendroenergía, preferencias del consumidor, entre otras. El eucalipto nitens resulta ser la especie escogida.

Luego se revisa el estado del arte de los secadores utilizados industrialmente para escoger un tipo de secador que cumpla con los criterios de la empresa patrocinante, los cuales se remiten principalmente a los factores tiempo de secado, costos, calidad y capacidad. La alternativa escogida es un secador solar tipo invernadero de pared inclinada (SSTI-pi) que opera por convección forzada.

Para la capacidad de producción deseada de 2000 [m<sup>3</sup>/año] se divide a la planta de secado en 5 SSTI-pi de 400 [m<sup>3</sup>] de capacidad individual. El colector diseñado para cada secador está compuesto por una cubierta única de polietileno, absorbedor de zincalum corrugado en V, aislante de lana mineral y circulación de aire de doble paso.

En relación a la evaluación económica, el proyecto de planta de secado para comercializar leña seca es conveniente en los tres escenarios analizados (proyecto puro, con financiamiento externo de un 50% y de un 100%) y puede generar la rentabilidad que la empresa patrocinante espera. Los valores actuales netos obtenidos para el proyecto base van desde 14 800 000 [CL\$] hasta 22 900 000 [CL\$] y las tasas internas de retorno, también para el proyecto base, van desde un 17% hasta un 59%, todo esto considerando un costo de oportunidad del 11% anual y una tasa de interés del 8% anual.

Se recomienda elaborar un plan de negocio que en parte consista en (i) Acordar un préstamo por el 70-80% de la inversión inicial a una tasa de interés del 7% o menor, (ii) ejecutar el proyecto base hasta estandarizar el funcionamiento de la planta, (iii) al tercer o cuarto año realizar una expansión de la producción de al menos 800 [m<sup>3</sup>] (idealmente de 2000 [m<sup>3</sup>]) con un aumento anual de 2% en el precio de venta.

## Agradecimientos.

Un proyecto educacional tan avanzado y complejo como lo es alcanzar el título de ingeniero civil de la Universidad de Chile no es bajo ningún punto de vista obra exclusiva del receptor del diploma. Ante todo es el esfuerzo de mis padres, Juan y Evelyn, que dieron inicio a este periplo con interminables horas a mi lado recortando, dibujando, leyendo, escribiendo y enseñando, y que en todos estos años nunca han decaído en el amor y dedicación con que lo han hecho. Más que agradecerles, les debo todo.

Agradezco la generosidad desinteresada de mi tío Angue por haber hecho posible el emprendimiento asociado a esta memoria, y que está lejos de terminar. También a mi tío Roberto por acompañar el proceso.

En lo que respecta a la FCFM, comienzo por agradecerle a Felipe Díaz por sus consejos y su paciencia para responder a mis solicitudes. Le agradezco al profesor Francisco Gracia por darme el honor de ser su alumno memorista, y también al profesor Jorge Castillo por su activa y decisiva participación como profesor co-guía.

Tengo que agradecer también a las innumerables personas que me son queridas y que a través del área extra-académica me han hecho una mejor persona. Si bien sería imposible mencionarlos a todos, los lugares que cada uno ocupa en mi interior tienen forjados sus nombres para siempre.

No quiero olvidarme de la Universidad de Chile, alma máter de nuestra patria, que me formó en un ambiente educacional que promueve por un lado la excelencia, el sacrificio, la abnegación y la auto-superación, y por otro el compromiso con el país, la responsabilidad social, la generosidad y la solidaridad.

Por último, le agradezco al Señor las innumerables bendiciones con que ha llenado mi vida. Gracias por la familia que tengo, por los amigos que tengo, por los talentos que me has regalado y por los defectos que me has estampado, por haberme hecho nacer en el sur de Chile, por todo lo que me ha tocado vivir, por toda esta etapa universitaria que ya se marchita y no reverdecerá nunca.

## Abreviaturas y simbología.

### Letras Latinas.

a: Ancho [m]

A: Ancho de un SSTI-pi [m]

BE: Balance de energía.

BM: Balance de masa.

CH: Contenido de humedad en base seca [%]

CHP: Contenido promedio de humedad en base seca [%]

$C_p$ : Calor específico a presión constante [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

CSA: Colector Solar calentador de Aire.

$D_H$ : Diámetro hidráulico [m]

E: Capacidad de producción anual de la planta [ $m^3$ ]

EDO: Ecuación diferencial ordinaria.

EMC: Contenido de humedad de equilibrio [%]

FOB: De las siglas en inglés para “Free On Board”, franco a bordo.

FSP: Punto de saturación de las fibras [%]

$f$ : Factor de forma [ ]

$F$ : Flujo másico [kg/s]

$Fr$ : Número de empaques que pueden observarse en un corte transversal (frontal) de un SSTI-pi.

$h$ : Altura [m]

H: Altura de un SSTI-pi [m]

int: Tasa de interés [%]

$I$ : Irradiación incidente en una superficie [ $MJ/m^2$ ]

$I_N$ : Irradiación normalizada [ $W/m^2$ ]

IR: Infrarrojo.

$k_m$ : Coeficiente global de transferencia de masa [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]

$l$ : Largo [m]

$L$ : Largo de un SSTI-pi [m]

$Lg$ : Número de empaques que pueden observarse en un corte longitudinal de un SSTI-pi.

$M$ : masa [kg]

$m$ : masa por kilogramo de madera seca [kg/kg]

$n$ : moles [mol]

$N$ : Cantidad de SSTI-pi en los cuales se divide la planta [ ].

$P$ : Presión [Pa]

$PM$ : Peso molecular [kg/mol]

$Q$ : Calor [J]

$q$ : Calor por kilogramo de madera seca [J/Kg]

$PRC$ : Periodo de recuperación de capital [año]

$RH$ : Humedad relativa [%]

SSTI: Secador solar tipo invernadero.

SSTI-pi: Secador solar tipo invernadero de pared inclinada.

SSTI-sci: Secador solar tipo invernadero sin colector individual.

SSTI-t: Secador solar tipo invernadero con forma de túnel.

$S$ : superficie [ $m^2$ ]

$S_{A,M}$ : Interfaz aire-madera [ $m^2$ ]

$t$ : tiempo [s]

$T$ : Temperatura [ $^{\circ}C$ ]

$T_{BH}$ : Temperatura de bulbo húmedo [ $^{\circ}C$ ]

$T_{BS}$ : Temperatura de bulbo seco [ $^{\circ}C$ ]

$TIR$ : Tasa interna de retorno [%]

UV: Ultravioleta.

$v$ : Velocidad [m/s]

$\dot{V}$ : Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

VAN: Valor actual neto [CL\$]

$x$ : Fracción másica de humedad [kg/kg]

$X$ : Humedad [kg]

### Letras griegas.

$\eta$ : Eficiencia [%]

$\lambda$ : Superficie de colector dividida en el volumen de madera procesada [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]

$\theta$ : Ángulo de inclinación del techo de un SSTI-pi [°]

$\rho$ : Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\Delta e$ : Grosor [m]

$\Delta H_{vap,W}$ : Calor latente de vaporización del agua [J/kg]

$\Delta P$ : Caída de presión [Pa]

$\phi$ : Factor de fricción [ ]

$\tau$ : Tiempo de residencia [s]

### Subíndices.

O: Inicial.

A: Aire.

ab: Absorbedor.

C: Colector.

disp: Disponible.

e: Empaque.

EN: Eucalipto nitens.

f: Final.

in: Entrada.

M: Madera.

max: Máximo.

mas: Másico.

mín: Mínimo.

opt: Óptimo.

out: Salida.

pi: Pared inclinada.

req: Requerido.

sat: Saturación.

T: Total.

SP: sub-periodo.

v: vacío.

vol: Volumétrico.

V: Vapor de agua.

W: Agua.

## Índice de contenidos.

Resumen.....	ii
Agradecimientos. ....	iii
Abreviaturas y simbología.....	iv
1. Introducción. ....	1
1.1 Motivación. ....	1
1.1.1 La madera como material y su secado.....	1
1.1.2 Contaminación en el sur de Chile.....	1
1.1.3 Contratación en Comercial Primavera. ....	2
1.2 Objetivos. ....	2
1.2.1 General. ....	2
1.2.2 Específicos. ....	3
1.3 Estructura de la madera. ....	3
1.3.1 Formación de la madera en árboles.....	3
1.3.2 Anatomía adicional relevante para el secado de madera.....	5
1.3.3 Composición química. ....	6
1.3.4 La anisotropía de la madera.....	6
1.4 El agua en la madera. ....	6
1.4.1 Agua libre y agua enlazada.....	6
1.4.2 El FSP y el EMC. ....	7
1.4.3 Encogimiento de la madera. ....	8
1.5 Características geográficas de la provincia de Osorno.....	8
1.5.1 Geografía política y climatología de la provincia de Osorno.....	8
1.5.2 Irradiancia recibida en Osorno.....	11
2. Elección de una especie arbórea para comercializar como leña. ....	13
2.1. La industria forestal en Chile.....	13
2.1.1 Breve historia del sector forestal chileno. ....	13
2.1.2 Flujo productivo de la industria forestal en Chile. ....	14
2.1.3 Obtención y tipos de pulpa de celulosa. ....	17
2.1.4 Principales productos forestales exportados.....	18
2.1.5 Mercados de las exportaciones chilenas.....	19
2.1.6 Actores de la cadena productiva.....	20

2.2 Especies asociadas a las plantaciones forestales. ....	20
2.2.1 A nivel país. ....	20
2.2.3 A nivel de la X región de Los Lagos.....	22
2.2.4 A nivel de la provincia de Osorno.....	23
2.3 Dendroenergía arbórea en el sur de Chile. ....	25
2.3.1 Trabajo analizado. ....	25
2.3.2 Poder calorífico superior de la madera.....	27
2.3.3 Densidad de la madera.....	27
2.4 El negocio de la leña.....	28
2.4.1 Consumo de leña en Chile.....	28
2.4.2 Precio de la leña y sus sustitutos.....	29
2.4.3 Informalidad del mercado de la leña. ....	31
2.4.4 Comportamientos del consumidor residencial. ....	32
2.5 Principales antecedentes recopilados.....	34
2.6 Indicadores para escoger una especie arbórea. ....	35
3. El proceso de secado de la madera.....	37
3.1 El proceso de secado dentro de una tabla.....	37
3.1.1 Secado convectivo a $T < 80$ [°C]. ....	37
3.1.2 Secado a alta temperatura: el efecto de la presión interna. ....	39
3.2 Variables que afectan la duración del secado.....	40
3.2.1 A nivel de tablas individuales. ....	40
3.2.2 A nivel de empaque y cancha.....	41
3.2.3 Ambientales. ....	42
3.3 Ventajas de la madera seca.....	43
3.4 Transporte radiativo en una superficie. ....	44
4. Tipos de secadores. ....	46
4.1 Secado al aire libre o natural.....	46
4.2 Secado acelerado por aire.....	47
4.3 Secado convectivo en horno. ....	47
4.4 Secado al vacío. ....	48
4.5 Deshumidificadores.....	49
4.6 Secado eléctrico de alta frecuencia. ....	50
4.7 Secado solar. ....	50

4.7.1 Clasificación en base a las fuentes de energía. ....	51
4.7.2 Clasificación por unidad de secado con respecto al colector. ....	56
4.7.3 Clasificación por exposición del material a la radiación solar. ....	57
4.7.4 Más sobre los SSTI. ....	59
4.8 Aspectos económicos. ....	63
4.9 Indicadores para la elección de un tipo de secador. ....	64
5. Diseño del SSTI-pi. ....	67
5.1 Época de realización del proceso de secado. ....	67
5.2 Estimación de la superficie requerida de colector. ....	67
5.3 Modelo matemático de las dimensiones de un SSTI-pi. ....	69
5.4 Determinación del ángulo de inclinación óptimo. ....	71
5.5 Diseño del colector y circulación de aire en el SSTI-pi. ....	71
5.5.1 Captación de la radiación solar. ....	71
5.5.2 Transferencia de calor entre el colector y el aire. ....	73
5.5.3 Grosor del canal de aire del colector. ....	77
5.5.4 Velocidad del aire. ....	78
5.6. Transporte acoplado entre el aire y la madera. ....	79
5.7 Resumen y valores de las variables de entrada y salida. ....	80
5.8 Equipos e instrumentación necesarios. ....	83
5.8.1 Medición de CHP. ....	83
5.8.2 Medición de RH y $T_{BS}$ . ....	84
5.8.3 Medición de $v_A$ . ....	84
5.8.4 Cantidad y costos de los artefactos. ....	84
5.8.5 Movimiento de los empaques. ....	85
5.8.6 Obtención de tablas a partir de trozas. ....	85
5.8.7 Convección forzada. ....	85
5.9 Especificaciones adicionales. ....	86
5.9.1 Fuentes de energía convencionales. ....	86
5.9.2 Sistema de almacenamiento de energía. ....	86
6. Comportamiento esperado de los secadores. ....	88
6.1 Flujo recirculado versus flujo de salida. ....	88
6.2 Aumento de temperatura en el colector. ....	89
6.3 Variación de EMC en función de $T_2$ . ....	92

6.4 Curvas de secado.....	94
7. Análisis económico.....	98
7.1 Inversión inicial.....	98
7.2 Ingresos anuales.....	99
7.3 Costos variables anuales.....	99
7.4 Costos fijos anuales.....	100
7.5 Depreciación anual y valor residual.....	101
7.6 Préstamos e intereses.....	102
7.7 Flujo de caja del proyecto base.....	102
7.8 Análisis de sensibilidad.....	103
8. Conclusiones.....	106
9. Bibliografía.....	107
Anexo A: Abundancia relativa de las especies plantadas en Chile.....	115
Anexo B: Características de las especies arbóreas plantadas en Chile.....	116
Anexo C: Plantaciones de pino y eucalipto por regiones.....	118
Anexo D: Mapa de las zonas madereras de Chile.....	119
Anexo E: Tablas anuales de superficies forestadas y reforestadas en Osorno.....	120
Anexo F: PCS y Densidad presentadas por Burgos, 2011.....	122
Anexo G: Reducción del punto de ebullición con respecto a la presión de vapor saturado.....	123
Anexo H: Direcciones de corte de las tablas de madera.....	124
Anexo I: Diagramas de secadores artificiales solarmente asistidos.....	125
Anexo J: Tabla de secadores solares estudiados por Wengert y Oliveira, 1987.....	126
Anexo K: Efecto del número de cubiertas en la eficiencia de un colector.....	127
Anexo L: Modelos de colectores estudiados por Koyuncu, 2006.....	128
Anexo M: Trayectoria del flujo de aire en colectores con deflectores.....	129
Anexo N: Bolsas para empaques de madera.....	130
Anexo O: Medidores de humedad por conductancia.....	131
Anexo P: Cálculo de la humedad relativa.....	132
Anexo Q: Sistema de ecuaciones fenomenológicas del SSTI-pi.....	134
Anexo R: Flujos de caja para tres escenarios de financiamiento.....	142

# 1. Introducción.

## 1.1 Motivación.

### 1.1.1 La madera como material y su secado.

La utilización de la madera por el hombre se remonta al orden de los miles de años. La versatilidad que la madera posee como material ha conducido a que se le encuentre en campos tan distintos como el arte y la calefacción. No obstante, la madera destaca por utilizarse particularmente de cuatro maneras:

- I. Como combustible, o leña, tanto para usos residenciales como industriales.
- II. Como material de construcción en vigas, paneles, compósitos, láminas, etc.
- III. Como ornamento o decoración, principalmente en mueblería y utensilios de menor tamaño.
- IV. Como pulpa para elaborar papel.

A medida que la madera fue y ha ido encontrando otros materiales y compuestos que pueden competir con ella en las áreas que alguna vez le fueron exclusivas, el secado ha tendido a convertirse en un proceso prácticamente obligado para otorgarle un mejor desempeño en sus variadas funciones, lo que a su vez se traduce tanto en una mayor calidad de la madera empleada como en un mayor valor agregado de su venta.

Exceptuando la pulpa, la madera es secada una vez que es cortada y/o separada en tablas sólidas de geometría definida. El tamaño de estas puede ir de unos pocos centímetros hasta metros de longitud. Las tablas pueden secarse de muchas maneras diferentes y de acuerdo a múltiples equipos y configuraciones de equipos que suelen estar relacionados con la complejidad del proceso de secado en sí: complejidad que hace referencia a las precauciones requeridas para hacer frente al efecto del estrés mecánico al cual se ven sometidas las tablas a medida que pierden humedad.

El proceso de secado más sencillo es el de la leña ya que la aparición de deformaciones y fisuras no tiene ninguna relevancia. El secado de la madera como material de construcción es más complejo pues bordes doblados, secciones trisadas o fisuras pronunciadas pueden afectar decisivamente su calidad y dificultar la labor de ensamblaje. Además, distribuciones heterogéneas de humedad dentro de las tablas pueden facilitar la aparición a mediano y largo plazo de moho u hongos, entre otros. La madera destinada a fines decorativos debe conservar sus propiedades estéticas (color, filamentación, marcas de anillos) durante el proceso de secado por lo que su complejidad es aún mayor.

### 1.1.2 Contaminación en el sur de Chile.

La mayor parte de las ciudades de más de 100 000 habitantes del sur de Chile utilizan leña como principal fuente energética residencial. Debido principalmente a malas prácticas en la combustión de la leña, se ha generado un complejo problema de contaminación cuyas consecuencias para la salud humana son de largo alcance. A modo de ejemplo, en la ciudad de Osorno se tuvieron 20 días por sobre la norma ambiental permitida el año 2008, mientras que en 2009 se tuvieron 38 días (Portal de noticias Surlink). En Temuco, la comuna completa fue declarada zona saturada durante el año 2008 por el servicio de salud, y es una de las pocas ciudades en el mundo en donde la contaminación proviene de

una sola fuente: 93% de las emisiones de material particulado corresponden a combustión de leña residencial (Torres, 2009).

A raíz de la preocupante problemática medioambiental existente en muchas ciudades del sur de Chile, a partir del año 2008 aparecieron numerosas iniciativas legales destinadas a regular y fiscalizar al mercado de la leña. Los proyectos de ley más importantes que ya han comenzado a ser implementados son:

- Certificación de leña y de equipos de combustión a doble cámara.
- Adquisición exclusiva de leña certificada por parte de los servicios municipales.
- Creación del ministerio de energía.
- Atribuciones de fiscalización por parte de la superintendencia de energía y combustibles.

Dentro de los conceptos y prácticas introducidos recientemente en el mercado de la leña, la certificación es claramente el más importante. Para que un productor de leña pueda adquirir el sello de certificación, el cual es otorgado por el SNCL (servicio nacional de certificación de leña), debe cumplir una serie de requisitos dentro de los que destacan dos (Portal SNCL): (i) El contenido de humedad de la leña debe ser de un 25% o menor y (ii) La madera utilizada debe provenir de bosques con planes de manejo.

El SNCL estima que se podrían disminuir en un 50% las emisiones generadas por la combustión de la leña (Mardones, 2009) si se masifica el proceso de certificación de leña junto con una sensibilización de los consumidores con respecto a los métodos correctos de calefacción. En base a la potencial solución y/o mitigación del tema de emisiones que representa la certificación, autoridades han planteado incluso subsidiar la compra de leña certificada (Portal SNCL).

### **1.1.3 Contratación en Comercial Primavera.**

Comercial Primavera es una sociedad de responsabilidad limitada conformada por un núcleo de índole familiar con base de operaciones en Osorno y que busca nichos de inversión en diversos rubros. La oportunidad reciente que representa la certificación de leña ha generado un interés por parte de Comercial Primavera en analizar la instalación de una planta de secado destinada en primera instancia a leña pero abierta también a evaluación para los demás usos de la madera. Con ese objetivo en mente, este alumno ha sido contratado para efectuar su memoria dentro de Comercial Primavera y dar un diagnóstico técnico-económico de las alternativas existentes.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 General.**

Evaluar técnica y económicamente, a nivel de factibilidad, la instalación de una planta de secado de madera en la ciudad de Osorno, X región de Los Lagos.

## 1.2.2 Específicos.

Para alcanzar exitosamente el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Escoger una especie arbórea para comercializar como leña certificada.
- Caracterizar el mercado forestal y de la leña en el sur de Chile.
- Escoger un tipo de secador que cumpla con los requerimientos de la empresa patrocinante.
- Especificar las dimensiones, características, componentes y operación del secador escogido.
- Realizar un análisis económico tendiente a evaluar el VAN, la TIR y el PRC del proyecto para distintos escenarios de financiamiento y proponer una estrategia de negocio.

## 1.3 Estructura de la madera.

### 1.3.1 Formación de la madera en árboles.

La madera es un material poroso producido en las médulas y ramas de árboles y arbustos. Estas plantas recurren a dos mecanismos de crecimiento diferentes: el crecimiento primario, responsable de la elongación del vástago y las ramas, y el crecimiento secundario, responsable del ensanchamiento de la planta a través de la formación de madera.

La sección transversal de un árbol presenta las siguientes regiones visualmente distinguibles (ver Figura 1):

- Vástago (pith): Pequeño núcleo de tejido que se origina a partir del crecimiento primario de la planta.
- Madera: La parte más importante de los árboles maduros. Se distinguen dos zonas:
  - Albura (sapwood): región externa en donde la savia migra desde las raíces hacia las hojas.
  - Duramen (heartwood): región interna que ya no se utiliza para transporte de savia.
- Corteza (bark): Se distinguen dos zonas:
  - Zona interna y viva que transporta nutrientes desde las hojas hacia los elementos en crecimiento.
  - Zona externa y muerta que sirve como protección y cuyo grosor varía drásticamente en función de la especie y edad del árbol.

En base a la geometría de crecimiento del vástago, 3 direcciones materiales pueden ser definidas: Longitudinal (L), dirección de crecimiento del vástago, y los ejes transversales Radial (R) y Tangencial (T).

Otra región de las plantas leñosas de gran importancia es el cámbium, región invisible al ojo en donde células inmaduras se diferencian en varios tipos de xilema (albura) o floema (corteza interna). Si bien el cámbium es una región tremendamente activa, las células de madera que origina viven escasas semanas pues el proceso de lignificación induce rápidamente su muerte (Perré y Keey, 2006).

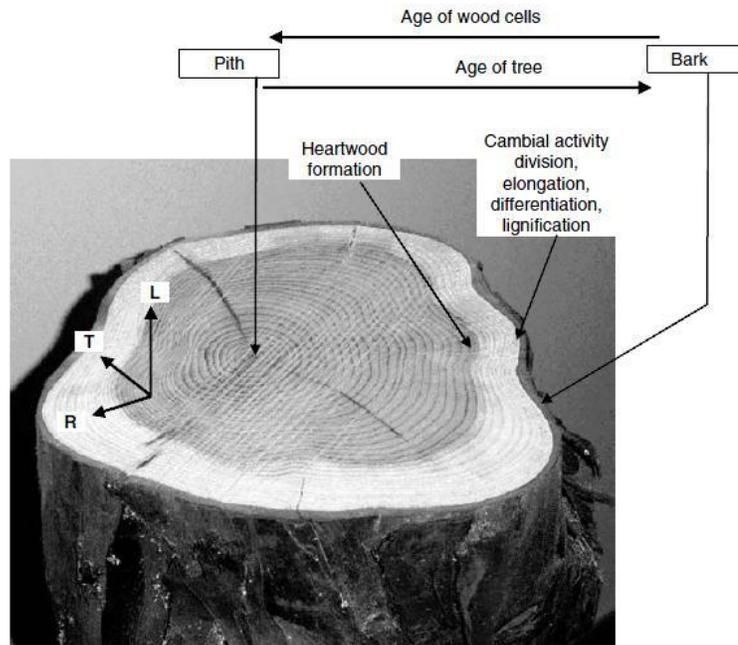


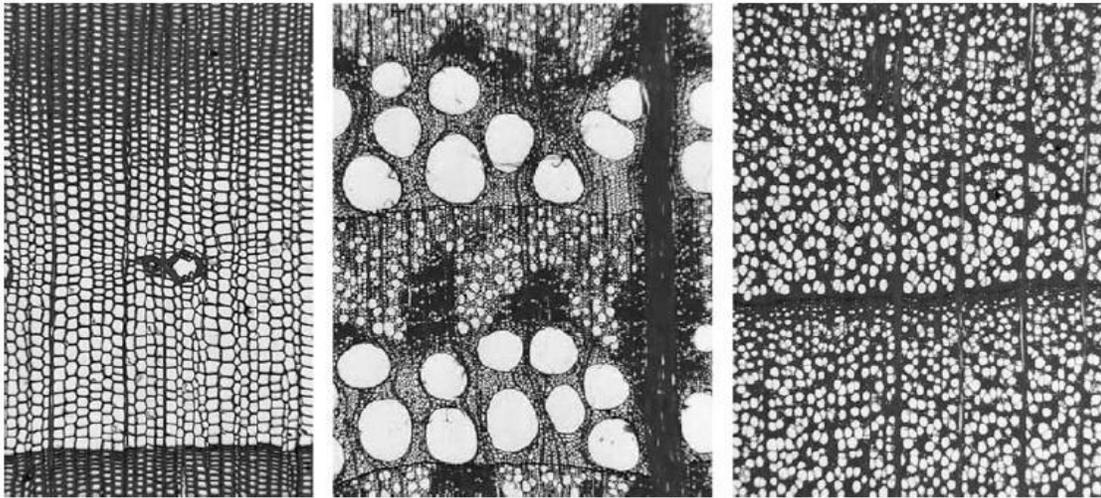
Figura 1: Sección transversal de un árbol que permite observar su estructura interna. Los anillos de crecimiento son claramente diferenciables: aquellos claros y más externos forman la albura, mientras que los más oscuros e internos forman el duramen. Fotografía: Tejo negro (*Taxus Baccata*), LERMAB-ENGREF. Fuente: Perré y Keey, 2006.

Desde un punto de vista anatómico, existen 2 tipos de maderas (Figura 2):

- Madera blanda (softwood): madera producida por las coníferas. Se caracteriza por poseer más del 90% del volumen de su albura en huecas, largas longitudinalmente y angostas transversalmente componentes unicelulares llamadas traqueidas, a través de las cuales fluye la savia.
- Madera dura (hardwood): madera producida por las angiospermas. Al ser estas especies más avanzadas en términos de evolución biológica, consecuentemente producen un complejo abanico de células capaces de adaptarse separadamente para cumplir con los requerimientos específicos del árbol. No obstante destacan por la presencia mayoritaria de vasos o poros pluricelulares en reemplazo de las más simples traqueidas.

Los nombres de madera dura y madera blanda pueden conducir a error: estos dos tipos de madera no tienen relación estricta con ninguna propiedad mecánica y menos con la dureza y/o densidad de sus fibras. Por ejemplo, la densidad de las maderas duras va desde 100 [Kg/m<sup>3</sup>] para balsa (*Ochroma pyramidale*) hasta 1200 [Kg/m<sup>3</sup>] para el ébano (*Diospyros ebenum*), mientras que la madera blanda de pino radiata (*Pinus radiata*) posee densidades de entre 450 y 550 [Kg/m<sup>3</sup>] (Cloutier et al., 2004).

En la mayoría de las especies de climas templados, la diferencia entre madera que es formada temprano en una temporada (madera temprana, earlywood) y la formada posteriormente (madera tardía, latewood) es suficiente para producir contornos concéntricos en una sección transversal. Estos anillos se conocen como anillos de crecimiento y ocurren anualmente. La diferencia de densidad entre las maderas temprana y tardía puede ser de hasta un 800% (Perré y Turner, 2001).



(A) Picea Noruega (*Picea Abis*) (B) Roble Común (*Quercus Robur*) (C) Haya Común (*Fagus Sylvatica*)

Figura 2: patrones anatómicos típicos observados en especies temperadas de (a) madera blanda, (b) madera dura anillo-porosa y (c) madera dura difuso-porosa. La altura de las imágenes es de 2 [mm]. Microfotografía: LERMAB-ENGREF. Fuente: Perré y Keeey, 2006.

### 1.3.2 Anatomía adicional relevante para el secado de madera.

Si bien las principales células de transporte de savia crecen en la dirección longitudinal, también existen células orientadas en dirección radial que permiten transferir y/o almacenar nutrientes desde el vástago hasta la corteza. Estas células son llamadas rayos y dificultan la uniformidad del secado pues su distribución es muy dispareja a lo largo del tronco.

Otro tipo de células que resultan problemáticas para el proceso de secado son aquellas que pertenecen a la madera juvenil. La madera juvenil es producida por todos los árboles durante su crecimiento inicial, es decir cuando el xilema o albura aun se encuentra rodeando al vástago, hasta alrededor de 12 anillos de crecimiento. La transición desde madera juvenil a madera madura es gradual y no existe una clara demarcación entre maderas juvenil y adulta. Sin embargo, las diferencias más notorias se observan en el menor largo celular y alto ángulo de microfibrillas. En consecuencia, la madera juvenil puede sufrir deformaciones dramáticas. El procesamiento de especies de rápido crecimiento (pino radiata, eucalipto) que producen troncos compuestos por un alto contenido de madera juvenil se hace por tanto muy problemático.

Para garantizar la ascendencia constante de la savia en árboles de 10 metros de altura o más, la presión líquida absoluta existente en la columna de savia debe ser negativa. Fases gaseosas no pueden existir en tales condiciones. Por ende, el sistema vascular debe ser capaz de controlar rápidamente una invasión de gas debida a una herida o cavitación. Este es el rol de los agujeros fronterizos (bordered pits) o agujeros entre vasos (vessel-to-vessel pits) y que ejecutan a través de un mecanismo conocido como aspiración de agujeros. La aspiración de agujeros es vital para la supervivencia de los árboles, pero provoca dificultades en el secado pues bloquea los poros por donde el agua es removida. Es virtualmente imposible evitar la aspiración de agujeros bajo condiciones de secado normales (o cercanas a las ambientales), especialmente para coníferas.

### 1.3.3 Composición química.

La madera está compuesta principalmente de 3 compuestos de naturaleza polimérica: celulosa, hemicelulosa y lignina. Los contenidos porcentuales con que se encuentran en las especies más comunes no cambian considerablemente (ver Tabla 1). Adicionalmente se encuentran bajos contenidos de compuestos inorgánicos y contenidos considerables de compuestos orgánicos llamados extractivos, principalmente resinas, ceras y polifenoles, pudiendo su presencia alcanzar hasta el 10% del peso de un árbol.

Tabla 1: Composición típica de la madera. Fuente: White, 1986.

Compuesto	Contenido (% peso)	
	Madera blanda	Madera dura
Celulosa	42 ± 2	45 ± 2
Hemicelulosa	27 ± 2	30 ± 5
Lignina	28 ± 3	20 ± 4

### 1.3.4 La anisotropía de la madera.

El duramen está compuesto casi exclusivamente de células muertas e inactivas. El árbol utiliza al duramen como depósito de metabolitos y desechos, entre los cuales se encuentran la gran mayoría de los compuestos orgánicos recién mencionados. Como consecuencia, la permeabilidad del duramen es menor en al menos un orden de magnitud en comparación a la albura.

La permeabilidad no es la única propiedad fuertemente anisotrópica de la madera. Además de las diferencias entre albura y duramen, el sistema vascular de los árboles está diseñado para que la savia fluya longitudinalmente desde las raíces hacia el cánopi, por lo que la madera genera anisotropías en la mayoría de sus propiedades (ver Tabla 2).

Tabla 2: Orden de magnitud de distintas razones adimensionales anisotrópicas encontradas en la madera con relación a la dirección tangencial. Fuente: Perré y Keey, 2006.

Propiedad	Dirección		
	T	R	L
Rigidez	1	2	20
Contracción	1	1	0
Conductividad termal	1	2	2
Difusividad másica	1	1-2	20
Permeabilidad	1	1-10	100-10 <sup>5</sup>

## 1.4 El agua en la madera.

### 1.4.1 Agua libre y agua enlazada.

El contenido de humedad de la madera suele definirse en base seca, mediante la siguiente razón:

$$X = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de madera seca}} \quad (1.1)$$

La ecuación 1 posee unidades SI de [Kg/Kg]. También es posible encontrar a la humedad expresada porcentualmente, en cuyo caso la ecuación 1 queda:

$$X = 100 \cdot \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de madera seca}} \quad (1.2)$$

Cabe destacar que el valor de la humedad no está limitado al rango 0-100% sino que a cualquier valor mayor o igual a cero y puede llegar incluso a valores de 500% (Perré y Turner, 2002).

Es conveniente separar la humedad en dos términos con diferentes propiedades que se explican a continuación:

$$X = X_W + X_B \quad (1.3)$$

1.  $X_W$ . Corresponde a la savia líquida que circula libremente por los lúmenes celulares. Es llamada simplemente agua libre ya que sus propiedades (densidad, viscosidad, presión de vapor saturado) son prácticamente idénticas a las del agua pura. Sin embargo debe tenerse presente que esta agua libre se encuentra unida a la matriz sólida mediante fuerzas capilares asociadas evidentemente a presiones capilares que originan una diferencia de presión entre las fases gaseosa y líquida.
2.  $X_B$ . Llamada agua enlazada (bound en inglés), su existencia se debe a la naturaleza higroscópica de la madera. Las paredes celulares acumulan agua en sus estructuras principalmente a través de fuerzas intermoleculares de tipo puente de hidrógeno entre los numerosos grupos hidroxilo de la holocelulosa (hemicelulosa y celulosa) y el agua, por lo que cantidades importantes de esta quedan sorbidas y en consecuencia poseen propiedades distintas a las del agua pura. Para efectos del proceso de secado se puede considerar que el agua enlazada abandona la tabla sólo cuando toda el agua libre ha sido removida, sin embargo es evidente que la transición ocurre de manera mucho más gradual a nivel molecular.

#### 1.4.2 El FSP y el EMC.

Con el objetivo de matematizar los rangos de higroscopia de la madera en términos de humedad, resulta útil definir una humedad sorbida máxima, o en otras palabras un punto de saturación de la fibra: FSP (del inglés fibre saturation point). El FSP es el punto en el proceso de secado en el cual el medio poroso (madera) ha perdido toda su agua libre pero posee la totalidad de su agua enlazada. Operacionalmente, el FSP puede ser considerado como el punto sobre el cual las propiedades físicas y mecánicas de la madera no cambian en función de la humedad.

El FSP de las especies arbóreas más comunes se encuentra en alrededor de un 30%. Ecuaciones que describen el FSP como función de la temperatura otorgan una gran exactitud dentro de amplios rangos.

Adicionalmente al FSP, otro parámetro de gran relevancia para el proceso de secado es el contenido de humedad de equilibrio: EMC (del inglés equilibrium moisture content). El EMC se define como la humedad a la cual la madera capta y pierde idénticas cantidades de agua con su entorno, es decir es la humedad a la cual no hay transferencia neta de humedad entre la madera y su entorno.

Existen en la literatura ecuaciones matemáticas y/o tablas para el EMC de diversas exactitudes y complejidades. Para alcanzar niveles de predicción aceptables, el EMC debe depender como mínimo de la humedad relativa y temperatura que circundan las tablas de madera en estudio. El modelo de Hailwood-Horrobin (1946) es el más ampliamente utilizado y la ecuación que lo describe se enuncia más adelante en la sección 6.1.

### 1.4.3 Encogimiento de la madera.

Las paredes celulares de la madera verde están en un estado de hinchazón total. Sin embargo, cuando agua enlazada es removida de la pared celular, nuevos enlaces de hidrógeno se forman entre los grupos hidroxilo de las cadenas poliméricas, reduciendo así el distanciamiento entre estas. El impacto de la variación dimensional se observa sobre todo en una dirección normal a la dirección de las microfibrillas. Así se explica la casi nula contracción de la madera en la dirección longitudinal y las significativas contracciones que ocurren en las direcciones radial y tangencial (ver Figura 3): la anisotropía se expresa también en las propiedades mecánicas de la madera.

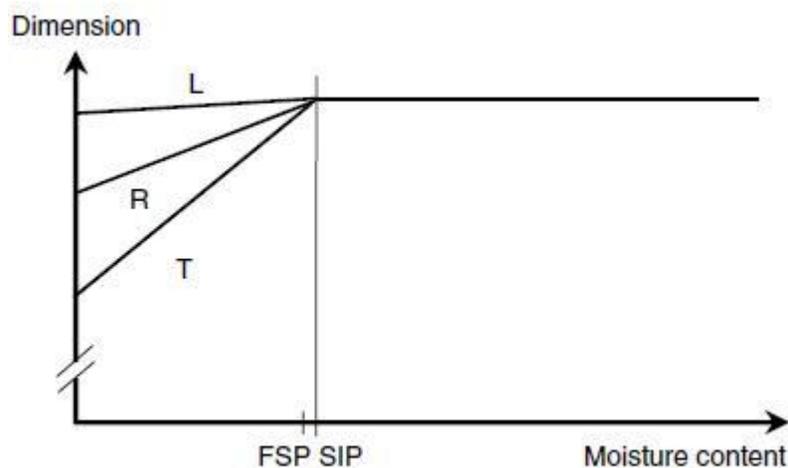


Figura 3: Variaciones dimensionales de una muestra típica de madera versus la humedad. SIP (shrinkage intersection point) indica el punto de intersección de contracción, es decir, la humedad a partir de la cual la contracción de las fibras se hace despreciable. El SIP suele ser levemente mayor al FSP, aunque normalmente se asumen idénticos. Fuente: Perré y Kee, 2006.

El encogimiento intrínseco que sufre la madera al perder agua es el desencadenante clave de los fenómenos de estrés, tales como fisuras, deformaciones y colapsos. Modelos matemáticos del estrés desarrollado durante el secado de la madera, tales como los propuestos por Gereke y Niemz (2010) o Dahlblom (1994), brindan interesantes análisis de las variables más relevantes para controlar la deformación que sufren las tablas.

## 1.5 Características geográficas de la provincia de Osorno.

### 1.5.1 Geografía política y climatología de la provincia de Osorno.

La provincia de Osorno es la provincia más nortina de la décima región de Los Lagos. Su capital es Osorno y su superficie total es de 9224 [km<sup>2</sup>] o 922 400 [ha] (Portal Gobierno Regional Los Lagos). Está

compuesta por 7 comunas (Figura 4): Osorno, Puerto Octay, Purranque, Puyehue, Río Negro, San Juan de la Costa y San Pablo.



**Figura 4: Mapa político de la provincia de Osorno. Se muestran las siete comunas que la componen, las tres carreteras principales que la cruzan (ruta 5 sur, ruta CH-215, ruta U-40) y los cuatro lagos principales (Puyehue, Rupanco, Llanquihue, Constanza). (Fuente: Portal Gobierno Regional de Los Lagos)**

Al igual que la mayoría de las provincias que se encuentran al sur de Santiago, la provincia de Osorno cuenta con numerosos microclimas asociados a las cuatro macroformas de relieve de Chile. Los aspectos más importantes de la geografía provincial son:

- La cordillera de los Andes, cuya altura es considerablemente menor a la del resto del territorio, con cúspides que no tienden a superar los 2500 [m].
- Importantes formaciones lacustres entre la depresión intermedia y la zona precordillerana, destacándose en particular los lagos Llanquihue, Puyehue y Rupanco.
- La depresión intermedia, que a partir del río Bueno se presenta ininterrumpida y de gran amplitud, en donde se encuentra la capital provincial y en donde la actividad agropecuaria se concentra.
- La cordillera de la costa que actúa como barrera orográfica y bloquea en gran medida la influencia marítima en el interior de la provincia. A lo largo de la provincia, la cordillera de la costa se conoce como cordillera Pelada y presenta macizos considerablemente más altos que en las provincias ubicadas más al norte. Además, el macizo costero crea una zona escarpada con numerosos acantilados y cerros a orilla de mar.

La temperatura media en el área sólo alcanza los 11 [°C] con una notoria uniformidad térmica causada principalmente por la homogeneidad del relieve pero también fortalecida por los numerosos lagos, que a su vez le otorga características térmicas generales muy similares a las regiones de los Ríos y de Los Lagos. La amplitud térmica anual es similar en Valdivia y Osorno, 8,8 y 8,7 [°C] respectivamente, a

pesar de la diferencia en distancia que existe entre ambas localidades con la costa (Portal Atmosfera). También es similar la amplitud térmica diaria, que ronda los 11 [°C]. En Osorno, la temperatura media del mes más cálido es de 15,2 [°C] y durante tres meses al año las temperaturas medias no superan los 8 [°C] (ver Tabla 3), siendo por lo tanto posible tener heladas considerables. Las heladas se vuelven más frecuentes en zonas de mayor altura.

**Tabla 3: Temperaturas promedio media, mínima y máxima para la ciudad de Osorno a lo largo del año. En rojo se señalan los meses dentro de los cuales las temperaturas son susceptibles de ocasionar heladas. (Fuente: Portal Atmósfera de la FCFM. Datos tomados en estación Cañal Bajo: 40°36'S, 73°03'W, 65 [msnm].)**

Temp [°C]	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOT
<b>Media</b>	15,2	15,2	13,2	10,5	9,3	7,4	7	7,4	8,6	10,4	12,7	14,9	11
<b>Mínima</b>	8	7,5	6,4	5,1	5,1	3,4	3,4	3,4	3,8	4,8	6,4	7,6	5,4
<b>Máxima</b>	22,5	22,3	20,2	16,7	13,4	11	10,6	11,9	14,1	16,3	18,7	20,9	16,6

Por otro lado, los relieves asociados a la cordillera Pelada son especialmente importantes pues si bien no son suficientes como para producir variaciones significativas en la distribución de temperaturas, sí lo son para generar importantes diferencias en la pluviometría de la zona como lo indica la Tabla 4, formándose un área particular conocida como zona de sombra pluviométrica (Montaldo et al., 1987) en la cual está contenido el grueso de las comunas de San Pablo, Osorno y las partes orientales de Río Negro y Purranque (por donde atraviesa la ruta 5 sur).

Otro rasgo pluviométrico de la provincia y en particular de la ciudad de Osorno es que carece de mes seco (menos de 50 [mm] caídos) y las lluvias se distribuyen durante todo el año, aun cuando existe un considerable descenso en los meses de verano (Portal EducarChile).

En cuanto a la humedad del aire, las formaciones lacustres son una fuente de humedad clave: no hay meses con RH media inferior a 75 [%] a lo largo de la provincia (Portal Dirección Meteorológica de Chile).

**Tabla 4: Precipitaciones promedio de distintas localidades pertenecientes a las regiones XIV y X. Fuente: Elaboración propia a partir de Huechan (1997), Portal de la dirección meteorológica de Chile y Subiabre (1994).**

Lugar	Comuna	Precipitaciones [mm]
<b>Valdivia</b>	Valdivia	1871
<b>Futrono</b>	Futrono	1641
<b>Osorno</b>	Osorno	1332
<b>Aguas Calientes</b>	Puyehue	3900
<b>Pto Octay/Frutillar</b>	Puerto Octay	1417
<b>Puerto Montt</b>	Puerto Montt	1802

Las anteriores características hacen del clima de la provincia de Osorno, excluyendo zonas de la precordillera y la cordillera, clasificable como templado lluvioso con influencia mediterránea (Figura 5),

continuando así con el clima que nace en la costa sur de la región del Biobío y que se extiende por la región de la Araucanía alcanzando hasta la isla de Chiloé.

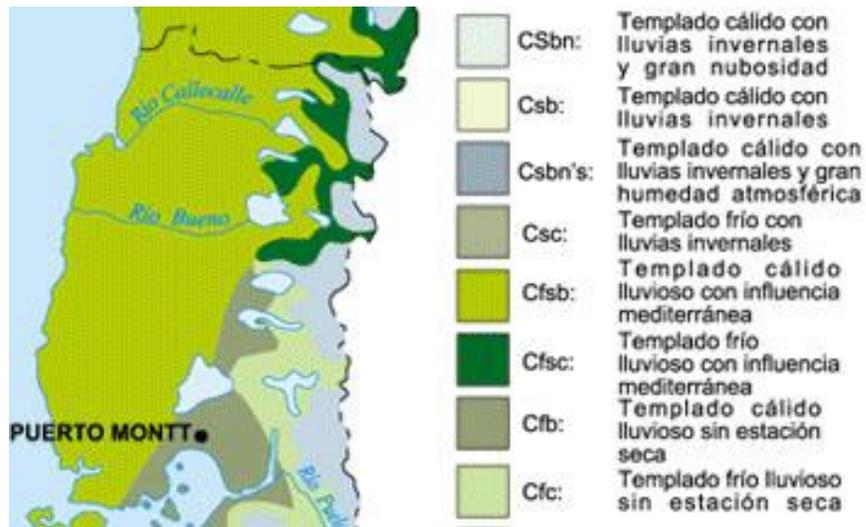


Figura 5: Mapa climatológico de las regiones IX, XIV y X de acuerdo a la clasificación de Koeppen. Fuente: EducarChile, 2011

### 1.5.2 Irradiancia recibida en Osorno.

La Figura 6 permite apreciar la irradiación global anual, medida en MJ por metro cuadrado, en las regiones del sur de Chile para una superficie horizontal. El punto rojo, que representa la ubicación del terreno para la planta de secado (un par de kilómetros al sureste de Osorno), recibe alrededor de 3750 [MJ/m<sup>2</sup>año].

Debido a las particularidades climatológicas del sur de Chile, la distribución mensual de la irradiación global puede variar hasta en un factor de 5 entre la época estival e invernal. Al no contar el estudio de la UTFSM y el CER (2008) con registros de la comuna de Osorno, la Tabla 5 muestra la irradiación mensual de las dos zonas más cercanas a Osorno. Al tener Lago Chapo una radiación muy similar a la esperada para el sureste de Osorno, se aproximan como idénticas las radiaciones mensuales entre ambos lugares.

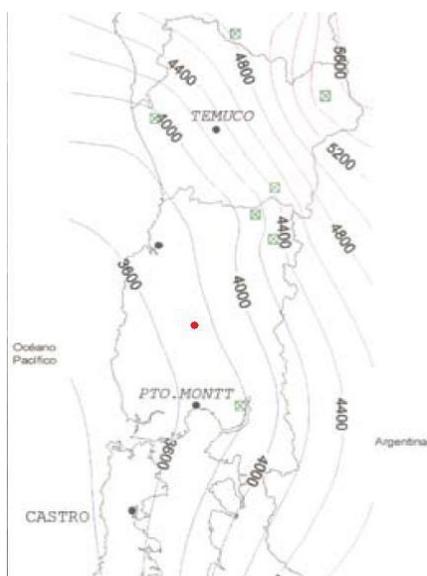


Figura 6: Irradiación global anual recibida en las regiones del sur de Chile para una superficie horizontal. En rojo se aprecia la ubicación de la planta de secado. Todas las unidades en  $\text{MJ}/\text{m}^2$ . Fuente: UTFSM y CER, 2008.

Tabla 5: Irradiación global y mensual, en plano horizontal, de las localidades de Lago Chapo y Pullinque. Se asume que la irradiación recibida en Lago Chapo es igual a la de Osorno. Todos los valores en  $[\text{MJ}/\text{m}^2]$ . Fuente: UTFSM y CER, 2008.

Localidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Lago Chapo	538,3	443,3	367,6	234,5	117,5	89,7	103,7	169,1	265,8	380,2	467,5	560,9	3738
Pullinque	593,4	446,6	379,9	235,2	113,3	95,8	110,8	186,4	304,1	430,9	515	602,3	4014

La magnitud de la radiación solar recibida en la tierra se ve drásticamente afectada por la nubosidad. La Figura 7 muestra que la radiación solar recibida con cielo despejado varía en alrededor de un 20% entre las latitudes  $-19$  (correspondiente al desierto de Atacama) y  $-40$  (correspondiente a Osorno). Sin embargo, días nubosos implican disminuciones mucho más severas: para  $40^{\circ}\text{S}$ , la radiación disminuye en un 60% los días nubosos con respecto a los días claros. Las grandes diferencias mensuales de irradiación de la Tabla 5 se encuentran íntimamente relacionadas con la nubosidad estacional del sur de Chile (De La Castilleja, 2008).

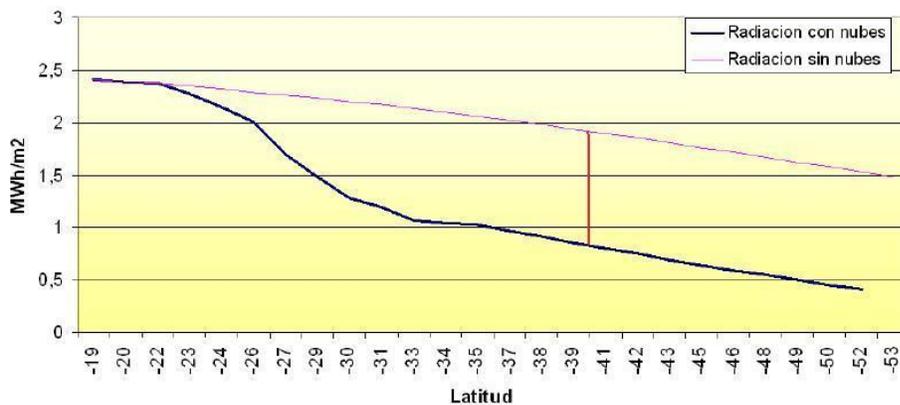


Figura 7: Energía por unidad de superficie recibida en distintas latitudes del hemisferio sur para días con y sin nubes. La línea vertical roja corresponde a la latitud de Osorno,  $40^{\circ}\text{S}$ . Fuente: De La Castilleja, 2008.

## 2. Elección de una especie arbórea para comercializar como leña.

En este capítulo se busca recopilar la muy dispersa información que puede resultar útil para determinar cual especie arbórea es la más idónea para ser comercializada como leña certificada en la ciudad de Osorno. Aun cuando la información amasada obliga a enfrentar el problema de la elección de manera cualitativa, se utilizan indicadores porcentuales destinados a cuantificar las apreciaciones arbitrarias de las distintas propiedades de interés de cada especie arbórea. Los indicadores utilizados son los siguientes:

- $Y_1$ : Abundancia con respecto a la comuna de Osorno.
- $Y_2$ : Disponibilidad de proveedores y competencia con mercados alternativos.
- $Y_3$ : Propiedades dendroenergéticas.
- $Y_4$ : Costo, certificación y calidad de la madera ofertada.
- $Y_5$ : Preferencias del consumidor.

El valor de cada indicador es fraccionario y se representa porcentualmente. Al final de este capítulo pueden encontrarse los valores de los indicadores y más información con respecto a estos.

Si bien el capítulo completo tiene como directriz el análisis y elección de una especie arbórea con el fin de ser comercializada como leña certificada, este pretende ir más allá pues también busca conocer, discutir y comprender lo que es el sector forestal chileno, desde el consumidor individual hasta la exportación de celulosa, y dentro del cual la leña certificada y/o una planta de secado de madera inevitablemente van a estar inmersas. Las lecciones que potencialmente pueden sacarse del contexto amplio del negocio forestal y de las características específicas de la ubicación de la planta pueden marcar la diferencia en el éxito de las decisiones venideras.

### 2.1. La industria forestal en Chile.

#### 2.1.1 Breve historia del sector forestal chileno.

La industria forestal chilena representa el 3,44% del PIB nacional y el 13% del total de las exportaciones del país (INFOR, 2009). La enorme producción del sector está asociada principalmente a la plantación de dos especies, el pino radiata (*Pinus radiata*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus* mayoritariamente pero *Eucalyptus nitens* también), las cuales han logrado una excelente adaptación a las condiciones del sur y centro-sur de Chile.

El pino radiata, también conocido como pino insigne, fue plantado para efectos industriales a partir de 1945, aun cuando ya a fines del siglo XIX había hecho su aparición en el país. De ese año en adelante, las plantaciones de pino radiata fueron aumentando aceleradamente. Durante los años 50, este boom forestal se vio coronado con la apertura por parte de CMPC, junto con un importante apoyo de CORFO, de la primera planta productora de celulosa y papel de Chile en la localidad de Laja.

Por otro lado, los eucaliptos aparecieron en Chile durante los años 60 junto con diversas especies arbóreas exóticas que fueron testeadas para estudiar el desarrollo que podían alcanzar en el país.

A pesar de la ya importante presencia del pino radiata durante los años 60, la verdadera explosión de las plantaciones forestales se dio a partir de la década de los 80. El motivo radica en la aprobación de una política pública de fomento a las plantaciones forestales el año 1974 a través del *Decreto Ley 701* (CORMA, 2006). El efecto de los subsidios asociados al ya mencionado decreto puede observarse en la Figura 8.

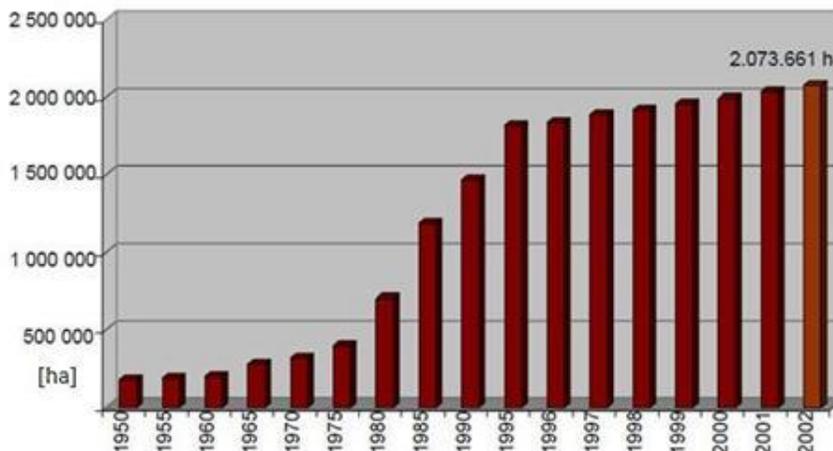


Figura 8: Evolución de la superficie de plantaciones forestales en Chile. Fuente: Luraschi, 2007 a partir de CORMA región del Biobío, Concepción, Abril de 2005.

La industria conexas a la actividad forestal se desarrolló de forma paralela a esta pero rezagada con respecto a la expansión que vivió. Recién en la década de los 90 los aserraderos chilenos comenzaron a crear productos intermedios o también denominados semi-elaborados, como por ejemplo placas contra-chapadas, paneles de fibra o molduras, que van asociadas a un mayor valor.

Dentro de esta dinámica de desarrollo, a finales de la década de los 90 comienzan también a elaborarse además productos manufacturados, en especial puertas y ventanas. No obstante, otras áreas de la manufactura de la madera no tuvieron (y no han tenido) el mismo impulso, como por ejemplo la mueblería (Luraschi, 2007).

## 2.1.2 Flujo productivo de la industria forestal en Chile.

La Figura 9 muestra un diagrama del flujo productivo de los distintos tipos de productos de la industria forestal chilena. Los productos se dividen en cuatro grupos (cuadros de color azul) de acuerdo al grado de transformación que sufren. A continuación se describen separadamente.

### 2.1.2.1 Productos primarios.

- **Raleos:** los raleos corresponden a las mantenciones periódicas que se realizan en las plantaciones forestales con el objetivo de deshacerse de los árboles curvos, débiles, pequeños o que presenten otras características indeseables para que además los mejores árboles puedan proliferar con mayor disponibilidad de recursos. Como consecuencia, la madera de los árboles talados durante los raleos es normalmente sólo utilizada como leña. Tanto los pinos como los eucaliptos proveen trozas de este tipo.

- Leña trozada: Se refiere a trozas que ya han sido dimensionadas de una cierta manera para ser vendidas como combustible. No obstante, debe considerarse que la leña trozada normalmente no proviene de plantaciones sino que de bosque nativo (en más de un 85% para las regiones desde la IX hacia el sur de acuerdo a Neira, 2011).
- Trozas debobinables/aserrables: corresponden a las secciones sometidas a poda y por tanto carentes de nudos de árboles de gran diámetro y calidad. Los productos asociados a estas son los de mayor valor. Los pinos son prácticamente las únicas especies que proveen trozas de este tipo.
- Trozas pulpables: corresponden a las secciones de posición superior y que no han sido sometidas a poda, así como a los árboles de menor diámetro. Se utilizan principalmente para producir celulosa pero también como combustible. Tanto los pinos como los eucaliptos proveen trozas de este tipo.

En función de las características del tronco (o troza), tales como su diámetro promedio, largo y ubicación en altura dentro del árbol pueden obtenerse varios productos primarios desde un mismo ejemplar.

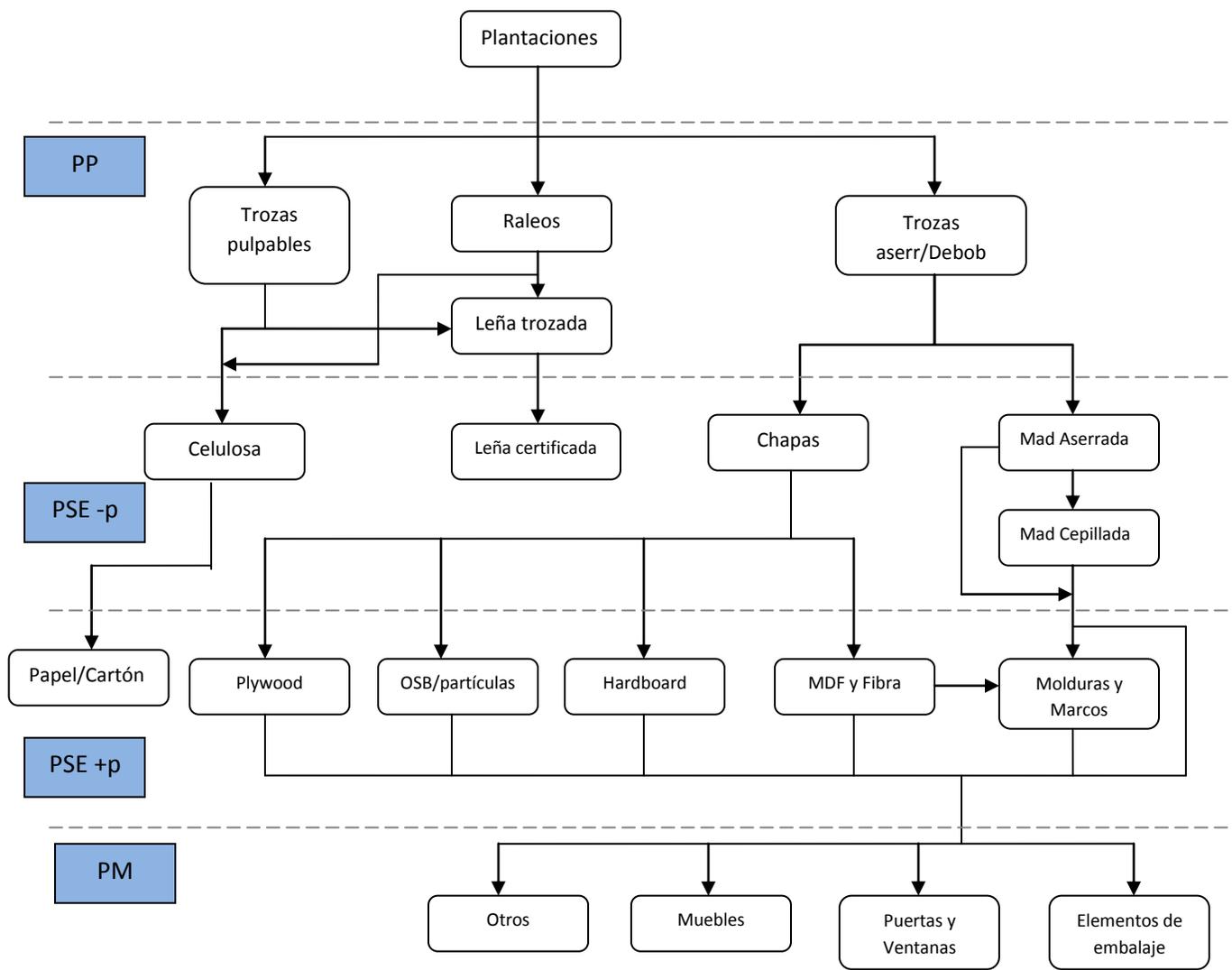


Figura 9: Flujo productivo de productos forestales en Chile. Fuente: elaboración propia a partir de Luraschi, 2007.

### *2.1.2.2 Productos semi elaborados de menor procesamiento.*

Los productos madereros clasificados como semi elaborados de menor procesamiento son aquellos que han sufrido una transformación primaria tras la extracción desde la plantación.

- Madera aserrada: madera que es dimensionada con instrumentos de corte en todas direcciones para obtener vigas y tablas de geometría definida.
- Madera cepillada: corresponde a madera aserrada sometida a secado y alisado de sus caras.
- Madera debobinada o chapas: láminas delgadas de madera enrollada y cortada en dirección perpendicular al eje longitudinal del tronco.
- Leña certificada: leña trozada que ha pasado por un proceso de secado que reduce su humedad a menos de un 25% en base seca. Sin embargo, no toda la leña trozada tiene el potencial de ser leña certificada ya que, para el caso de bosque nativo, es necesario que los predios de donde se extrajo la madera posean un plan de manejo debidamente aprobado por CONAF.
- Celulosa: fibra vegetal utilizada como materia prima en la elaboración de papeles y cartones. Para más información dirigirse a la sección 2.1.3.

### *2.1.2.3 Productos semi elaborados de mayor procesamiento.*

- Plywood o madera terciaria: tableros elaborados con finas chapas de madera pegadas con las fibras transversalmente una sobre la otra con resinas sintéticas mediante presión y calor.
- Tablero de partículas y OSB: paneles estructurales de partículas de madera compuestas por dos capas externas de orientación longitudinal y una capa central de orientación transversal.
- Tablero de fibras: paneles conformados por pequeñas partículas para uso en interiores.
- MDF: su nombre quiere decir tableros de fibra de mediana densidad por las siglas en inglés. Paneles de fibra prensada unida mediante altas presiones que le otorgan una gran estabilidad y densidad uniforme.
- Hardboard: tablero de fibras prensadas exclusivamente a través de un proceso de humidificación (es decir carente de adhesivos).
- Aislantes: tableros de fibra prensada y de baja densidad con características termo-acústicas que le otorgan una amplia gama de usos.
- Molduras y marcos: distintas configuraciones de madera aserrada y tableros cuyos diseños tienen como fin aspectos decorativos.

Además de los productos madereros, también hay productos semi elaborados de mayor procesamiento que derivan de la celulosa. Si bien existe un sinnúmero de productos específicos dentro de la industria papelera, a continuación se mencionan los más importantes con el objetivo de conocer los principales compradores de celulosa:

- Papeles: estructuras flexibles y a la vez resistentes obtenidas gracias al entrecruzamiento de cadenas de celulosa.
- Cartones: muy similar al papel pero de mayor grosor y coloración marrón.
- Cartulina: papeles compuestos de una o varias capas provenientes de diversos materiales a partir de las celulosas blanqueada o cruda, pulpa mecánica y papel reciclado, entre otros.

- Papel tissue: papel suave, absorbente y elástico de baja densidad y recubierto por micro-arrugas para uso sanitario e higiénico.

Cabe destacar que al contrario de todos los demás productos semi elaborados, los productos de la industria del papel se comercializan y consumen en los mercados sudamericanos y en particular en el mercado interno.

#### **2.1.2.4 Productos manufacturados.**

Los productos manufacturados son aquellos que reciben su uso directo por parte de los clientes finales. Muebles, puertas y ventanas y elementos de embalaje son los productos manufacturados que más relevancia han alcanzado en Chile, aun cuando existen muchos otros (embarcaciones, armamentos, ataúdes, etc.).

#### **2.1.3 Obtención y tipos de pulpa de celulosa.**

La pulpa de celulosa (que suele denominarse simplemente celulosa y por lo tanto no debe ser confundida con el polisacárido) es un material fibroso ligno-celulósico de tremenda importancia a nivel mundial para la producción de papel, cartones, celofán y otros productos relacionados.

Una vez que las trozas pulpables son extraídas de las plantaciones forestales, estas pueden seguir dos procesos diferentes para transformarse en pulpa de celulosa, el mecánico y el químico.

En el proceso mecánico la madera es triturada y sometida a altas temperaturas y presiones. Debido a las condiciones extremas que debe soportar la madera, sólo es posible utilizar trozas de fibra larga como los pinos.

En el proceso químico, conocido como proceso Kraft, la lignina es disuelta mediante la acción de sustancias químicas que además pueden blanquear las fibras resultantes. El proceso Kraft puede utilizar tanto maderas de fibra larga como los pinos como madera de fibra corta como los eucaliptos.

Los mercados mundiales tienen estandarizadas las siguientes denominaciones para cada tipo de celulosa que se comportan como *commodities* (Luraschi, 2007):

- BSKP: del inglés *Bleached Softwood Kraft Pulp*. Corresponde a la celulosa química blanqueada de fibra larga.
- BEKP: del inglés *Bleached Eucalyptus Kraft Pulp*. Corresponde a la celulosa química blanqueada de fibra corta.
- UKP: del inglés *Unbleached Kraft Pulp*. Corresponde a la celulosa química no blanqueada de fibra larga.
- TMP: del inglés *Thermo Mechanical Pulp*. Celulosa mecánica no blanqueada de fibra larga.
- BTMP: del inglés *Bleached Thermo Mechanical Pulp*. Celulosa mecánica blanqueada de fibra larga.

Cabe destacar que las trozas pulpables no son las únicas que pueden servir para los productos de la industria de la pulpa de celulosa: desde las trozas provenientes de los raleos hasta incluso ramas de grosor apreciable de las podas pueden servir, en especial para astilla (también conocidas como chip). No

obstante, por la poca exigencia de calidad que presenta la industria de la leña y la juventud de la madera raleada, los raleos en su mayoría suelen destinarse a combustible.

#### 2.1.4 Principales productos forestales exportados.

En Chile la valorización de las exportaciones forestales casi triplica a las del mercado interno (INFOR, 2009). La Tabla 6 muestra los montos exportados de cada ítem asociado a la industria de la pulpa y la importancia de las industrias asociadas a la pulpa y el aserrío.

**Tabla 6: Monto en millones de dólares FOB de los diversos productos exportados y que tuvieron una participación mayor al 0,1% del total para el periodo enero-julio 2011. Además se muestran los montos asociados a las dos grandes divisiones de la industria forestal: la pulpa y el aserrío. Fuente: Elaboración propia a partir de INFOR, 2011.**

Producto	[MUS\$ FOB]	[%]
Pulpa blanqueada pino	789	25,2
Pulpa blanqueada eucalipto	725	23,2
Cart multicapa estucada	190	6,1
Astillas globulus	185	5,9
Pulpa cruda pino	166	5,3
Papel periódico	81	2,6
Astillas nitens	54	1,7
Papeles p/acanalar	22	0,7
Papel test Liner	14	0,4
Sacos y bolsas de papel	14	0,4
<b>Total industria aserrío</b>	<b>887</b>	<b>28,4</b>
<b>Total industria pulpa</b>	<b>2050</b>	<b>71,6</b>
<b>Total ambas industrias</b>	<b>3127</b>	<b>100</b>

Los valores presentados en la Tabla 6 son los más recientes disponibles y concuerdan globalmente con los datos para el año 2008 analizados por INFOR (2009).

Destaca que la exportación de astillas (también conocidas como chips) de globulus sea mucho más importante que la de nitens tanto en monto como en volumen y precio (INFOR, 2009).

A pesar de los mayores precios de los productos de la industria del aserrío, la mayoría de los cuales son manufacturados o semi elaborados de mayor procesamiento, la participación que tienen es drásticamente inferior a la de la industria del aserrío: Chile se inclina netamente por exportar productos de la industria de la pulpa de celulosa.

En cuanto a los volúmenes asociados a los distintos tipos de pulpa de celulosa, la Figura 10 permite observar que:

- Las celulosas de origen mecánico tienen una participación despreciable en la pulpa exportada ya que, por un lado, se utilizan sólo para derivados estucados y papel para periódicos, y por otro, porque la industria forestal chilena no ha tenido interés en producirlas masivamente.

- Al ser la UKP y la BSKP obtenidas a partir de fibras largas, es decir casi en su totalidad pino radiata, la producción de celulosa se hace preferentemente con esta: el eucalipto ocupa el 45,6% del volumen total elaborado en 2008 mientras que el pino el 54,4%.

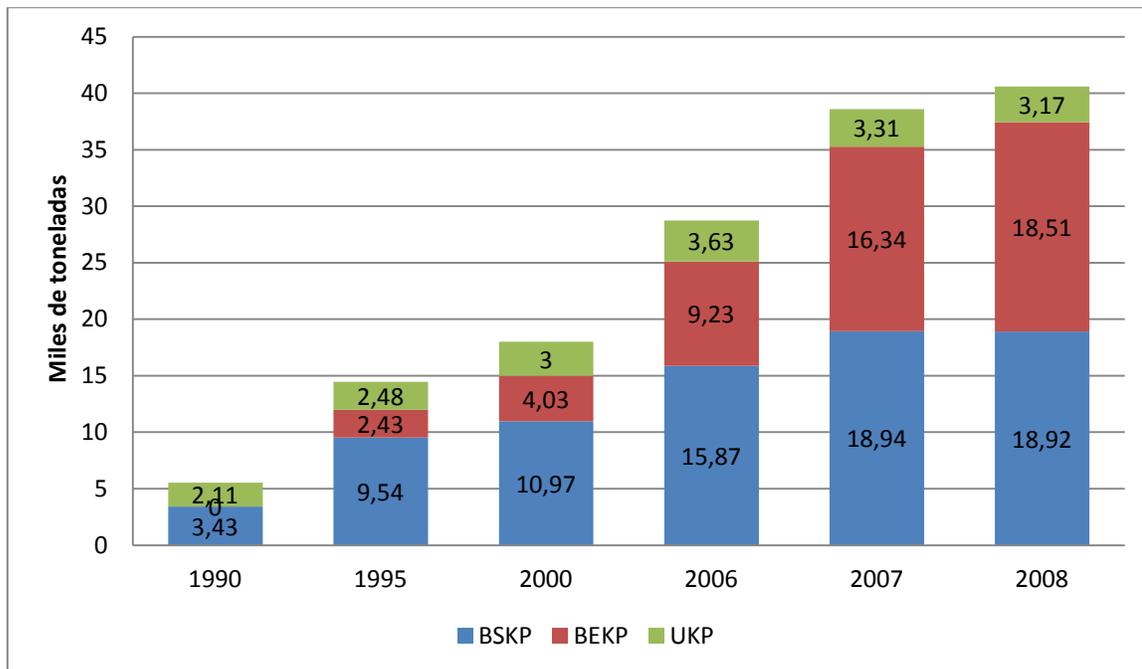


Figura 10: Evolución de los volúmenes producidos de los distintos tipos de celulosa en Chile. Fuente: CORMA, 2009.

### 2.1.5 Mercados de las exportaciones chilenas.

La Figura 11 muestra los principales mercados a los cuales han sido exportados los productos forestales chilenos durante el periodo enero-julio 2011. La participación de los mercados asiáticos es de casi un 40% y China ha acrecentado aceleradamente su influencia en los últimos 3 años (INFOR, 2011 y CORMA, 2009).

El peso de los mercados asiáticos se hace especialmente importante en los precios de los distintos productos, y en particular para los productos derivados de madera de eucalipto: durante gran parte de 2008 y 2009 la disponibilidad de globulus ocasionó que China y Japón compraran productos casi exclusivamente derivados de globulus y no importaron productos derivados de nitens (Luengo, 2011).

De acuerdo a Forestal Arauco, 2007 las astillas exportadas durante todo el año 2006 fueron 891 097 [m<sup>3</sup>] de nitens mientras que el globulus casi lo triplicó con 2 617 519 [m<sup>3</sup>].

Para los productos derivados de eucalipto, el globulus es drásticamente preferido al nitens, al punto de que este último puede carecer de mercado en la industria de la celulosa y/o del aserrío (Luengo, 2011, y Villarroel, 2004).

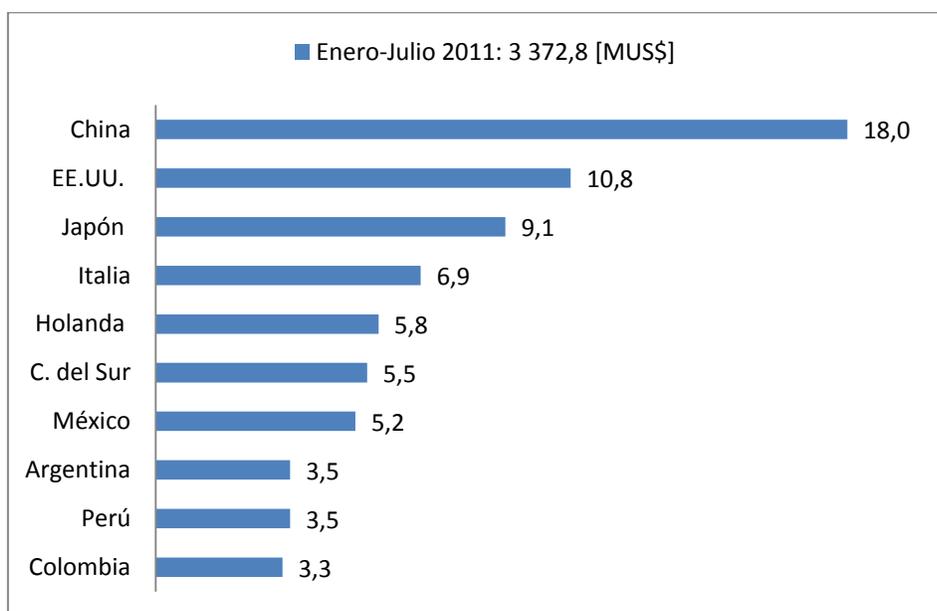


Figura 11: Porcentaje en monto de los mercados con un 3% o más de participación para los productos forestales chilenos para el periodo enero-julio de 2011. Fuente: Elaboración propia a partir de INFOR, 2011.

### 2.1.6 Actores de la cadena productiva.

Los principales actores de la cadena productiva de la industria forestal chilena son tres grupos forestales, el grupo Arauco, CMPC y Terranova-Masisa. En conjunto concentran el 52,9% de la superficie de plantaciones forestales de todo el territorio nacional (Bertran y Morales, 2008) y además cuentan con más del 98% de la capacidad de procesamiento de celulosa (INFOR, 2009).

Por otra parte, las grandes empresas suelen también crear sus propios productos semi elaborados de mayor procesamiento. Sin embargo la concentración de esta área es drásticamente menor a la de la celulosa, aun cuando los 3 grupos principales mantienen una posición dominante.

En resumen, la industria forestal presenta un alto grado de integración vertical importante hacia adelante pero particularmente apreciable hacia atrás. Más aun, las grandes empresas forestales no sólo tienen integrada la cadena forestal completa sino que también el mercado previo de los viveros forestales, en el cual han incursionado incluso en la experimentación genética (Luraschi, 2007).

Junto a los tres grandes grupos forestales, existen alrededor de 350 propietarios con más de 1000 [ha] que representan el 76% del total de la superficie plantada de Chile (Bertran y Morales, 2008).

## 2.2 Especies asociadas a las plantaciones forestales.

### 2.2.1 A nivel país.

Las plantaciones forestales en Chile tienden a concentrarse en el área conocida como *secano* del centro-sur, nombre que hace referencia a las características pluviométricas y topográficas de la zona. En grueso, el secano centro-sur corresponde a sectores carentes de regadío de la depresión central y la

vertiente oriental de la cordillera de la costa, comenzando en la provincia de Curicó y terminando en la provincia del Biobío.

La presencia de las plantaciones forestales va de manera casi inevitable en desmedro de la presencia de bosque nativo ya que desde un punto de vista económico este último posee mucho menor atractivo y además compiten por superficie cultivable de similares características (por no decir idénticas). La Tabla 7 muestra cifras que permiten comparar las superficies abarcadas tanto por las plantaciones forestales como por el bosque nativo. Se destaca que las regiones pertenecientes al secano centro-sur, es decir las regiones VII y VIII, poseen una superficie de bosque plantado que incluso supera a la de bosque nativo, con una participación muy mayoritaria del pino radiata. Las regiones VII y VIII concentran el 56,5% de toda la superficie de bosque plantado de Chile (información no mostrada).

**Tabla 7: Superficie de los bosques plantado y nativo para cada región geográfica de Chile. La columna de la extrema derecha muestra la principal especie correspondiente a los bosques plantados y el porcentaje que representa del total. (Fuente: INFOR, 2009)**

Región	Bosque plantado [kha]	Bosque nativo [kha]	Principal especie plantada (%)
I y XV	24,9	7,3	Tamarugo (83)
II	1,3	<1	Varias especies (100)
III	3,4	<1	Eucalipto (41)
IV	83,1	31,3	Atriplex (71)
V	51,6	106,4	Eucalipto (78)
RM	13,9	105,5	Eucalipto (82)
VI	101,6	185,3	Pino Radiata (64)
VII	439,1	364	Pino Radiata (90)
VIII	861,2	777,3	Pino Radiata (71)
IX	434,2	937,3	Pino Radiata (59)
XIV	182,1	849,8	Pino Radiata (58)
X	60,5	2736,3	Eucalipto (69)
XI	42,8	4815,3	Varias especies (100)
XII	0,3	2671,6	Varias especies (100)

La Figura 12 permite comparar las superficies plantadas entre las regiones VI y X (que abarcan el 90,4% de todas las plantaciones forestales del país) de las especies arbóreas más abundantes. Para encontrar un gráfico análogo a la Figura 12 pero para la totalidad del territorio nacional, dirigirse al Anexo A.

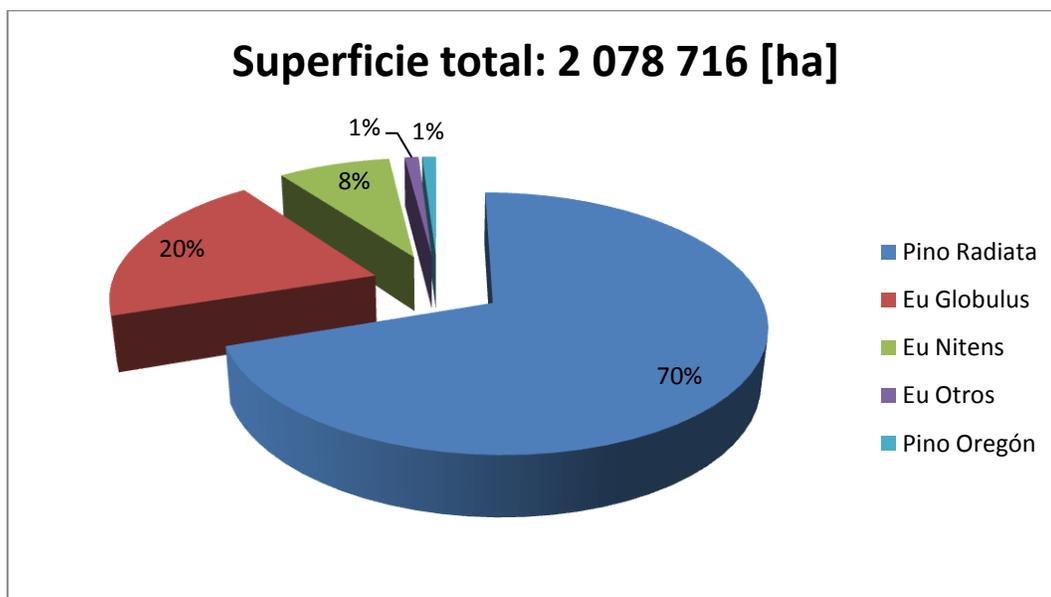


Figura 12: Abundancia relativa de las principales especies arbóreas plantadas entre las regiones VI y X y que comprende una superficie total de 2 078 716 [ha]. Fuente: INFOR, 2010.

### 2.2.3 A nivel de la X región de Los Lagos.

Para explicar las particularidades distintivas de las plantaciones forestales pertenecientes a la décima región, es necesario conocer en términos generales la silvicultura asociada a las principales especies arbóreas que se encuentran en Chile. El lector interesado puede dirigirse al Anexo B para profundizar más en el tema.

La Tabla 7 muestra que la décima región de Los Lagos es la única del sur de Chile que posee al eucalipto como principal especie plantada, con un 69% de participación. El Anexo C presenta este hecho de manera más visualizable: la superficie de pino radiata supera ampliamente a la de eucalipto tanto en las regiones del secano centro-sur como en las regiones del sur de Chile salvo en la décima.

Además de caracterizarse por la peculiaridad de que cuenta con una superficie plantada de eucalipto mayor a aquella de pino radiata, la décima región posee otra diferencia relevante con casi todas las demás regiones madereras. La Tabla 8 muestra que las regiones décima y decimocuarta son las únicas en donde el eucaliptus nitens es más abundante que el eucaliptus globulus en términos de superficie plantada. A nivel país la situación es completamente diferente, ya que la presencia de globulus es casi tres veces mayor que la de nitens.

El clima frío de la décima región, particularmente en junio, julio y agosto, implica que los árboles se ven sometidos a numerosas heladas durante su crecimiento. Por lo tanto, la resistencia térmica del nitens se vuelve una propiedad muy valorada en la mayor parte de las comunas y localidades de la décima región. No obstante, a partir de lo mencionado en la sección 1.5, los microclimas existentes en toda la provincia de Osorno (y también en la décima región) autorizan numerosas zonas a que logren muy buenos rendimientos de globulus e incluso de pino radiata y oregón.

Tabla 8: Superficie plantada de eucalipto de la sexta región hasta la décima y para el total del país.

Región	Globulus [kha]	Nitens [kha]	Otras especies [kha]
VI	34,9	<1	<1
VII	37,4	<1	<1
VIII	191,7	51,2	6,8
IX	115,0	48,3	3,9
XIV	19,9	43,0	7,1
X	17,2	24,6	3,2
<b>Total país</b>	<b>471,7</b>	<b>167,9</b>	<b>21,8</b>

De acuerdo a datos de Forestal Arauco (2007) obtenidos a su vez a partir de INFOR, los rendimientos de acuerdo a zonas de crecimiento (o equivalentemente zonas climatológicas) de la zona sur y centro-sur de Chile se muestran en la Tabla 9. Un mapa con las zonas climatológicas correspondientes puede verse en el Anexo D.

Tabla 9: Rendimiento en m<sup>3</sup>/ha/año de globulus y nitens. Las diferencias se calculan c/r al distanciamiento que presenta cada zona climatológica con respecto al promedio de las 9. Fuente: Forestal Arauco, 2007.

Zona	1	2	4	5	6	7	9	Prom
<b>Globulus [m<sup>3</sup>/ha/año]</b>	13,9	17,3	20,9	15,3	23	18,9	18,8	18,3
<b>Nitens [m<sup>3</sup>/ha/año]</b>	18	27,5	38,2	16,4	31,2	28,7	38,2	28,3
<b>Dif Glo [% prom]</b>	76,0	94,5	114,2	83,6	125,7	103,3	102,7	
<b>Dif Nit [% prom]</b>	63,6	97,1	134,9	57,9	110,2	101,4	134,9	

Si bien el globulus siempre presenta menor rendimiento que el nitens, lo cual se condice con la pronunciada diferencia en sus periodos de rotación, es la zona climatológica 9 (junto a la 4) la que presenta el mejor rendimiento de nitens, mientras que el rendimiento de globulus de esta es cercana al promedio. Sin embargo, es destacable que la zona climatológica 9 abarca la porción costera de la IX región, la XIV región y una porción de la X región, por lo que es de esperarse que el rendimiento de globulus de 18,8 [m<sup>3</sup>/ha/año] señalado en Tabla 9 sea menor si se considera sólo la décima región. En otras palabras, el rendimiento de nitens es muy superior al de globulus para la décima región completa en comparación al resto de las zonas climatológicas consideradas, aun cuando el rendimiento de globulus es de por sí superior al promedio nacional.

#### 2.2.4 A nivel de la provincia de Osorno.

La Tabla 10 muestra las hectáreas forestadas o reforestadas de cada una de las 4 especies arbóreas más importantes en cada una de las comunas de la provincia de Osorno durante los años 2006 a 2010 a partir de los registros de CONAF (2011). En el Anexo E pueden encontrarse las tablas correspondientes a cada uno de los años individualmente.

La Tabla 10 permite detectar tendencias en cuanto a la disponibilidad futura de las distintas especies capaces de suministrar grandes volúmenes de madera en el mediano y largo plazo. Además, el costo del transporte es sin duda una variable decisiva en la estructura de costos de Comercial Primavera

por lo que es deseable abastecerse de madera en sectores cercanos a la ciudad de Osorno y con buenos accesos para la circulación de transporte pesado. El valor de  $Y_1$  se desprende completamente a partir de la Tabla 10.

**Tabla 10: Superficies forestadas y reforestadas desde 2006 hasta 2010 para las cuatro principales especies arbóreas y para cada comuna de la provincia de Osorno. Fuente: Elaboración propia a partir de CONAF, 2011.**

	Euc Nit [ha]	Euc Glo [ha]	Pino Rad [ha]	Pino Ore [ha]	Otros [ha]	Sup por comuna [ha]	Sup por comuna [%]
<b>Osorno</b>	58,3	6,8	30,6	0,8	2,4	580,0	5,9
<b>Purranque</b>	39,4	51,2	6,7	0,0	2,8	4382,0	44,8
<b>Puerto Octay</b>	94,6	5,4	0,0	0,0	0,0	136,4	1,4
<b>Puyehue</b>	90,9	9,1	0,0	0,0	0,0	49,5	0,5
<b>Río Negro</b>	56,9	0,5	38,6	0,8	3,1	1616,0	16,5
<b>S. J. de la Costa</b>	59,4	1,1	33,6	0,7	5,1	2412,0	24,6
<b>San Pablo</b>	38,9	5,7	37,9	1,0	16,4	616,0	6,3
<b>Sup por especie [ha]</b>	4830,0	2362,1	2138,6	40,6	410,1	9791,9	
<b>Sup por especie [%]</b>	49,3	24,1	21,8	0,4	4,2		

La Tabla 10 es rica en información y pueden desprenderse numerosos conceptos útiles para los fines de esta memoria. A continuación se enumeran.

- I. Puerto Octay y Puyehue poseen casi de manera exclusiva plantaciones de nitens. Debido a la cercanía de la cordillera de Los Andes, las heladas (e incluso nevadas en muchos lugares) son muy frecuentes y el globulus y el pino radiata no otorgan buenos rendimientos.
- II. Puerto Octay y Puyehue presentan escasa superficie forestada y/o reforestada. Además de ser una zona particularmente fría, la presencia del parque nacional Puyehue y sus 107 000 [ha] (Portal Parque Nacional Puyehue), de numerosos lagos, una amplia oferta turística (Termas de Puyehue, Aguas Calientes) y praderas de pastoreo muy fértiles entre las formaciones lacustres hacen que el negocio forestal sea casi inexistente en estas comunas.
- III. Purranque es la única comuna que posee plantaciones apreciables de globulus. Al encontrarse en buena medida en la zona de sombra pluviométrica y además ser colindante con el mar, sus temperaturas se ven muy reguladas durante todo el año por lo que el globulus presenta altas tasas de crecimiento. No obstante, es destacable que Río Negro, comuna de similares características a Purranque, no posea una superficie de globulus mayor.
- IV. Las tres comunas costeras de la provincia de Osorno son aquellas en donde las plantaciones forestales se concentran. En efecto, Río Negro, Purranque y San Juan de la Costa presentan el 85,9% de las plantaciones forestadas o reforestadas de la provincia en el periodo de tiempo estudiado. El motivo radica en la irregularidad de los terrenos

(aparición de la cordillera Pelada) que junto con una relativa pobreza de suelo (en comparación a la depresión intermedia) dificulta la actividad agropecuaria por lo que la forestación se hace más interesante como negocio.

- V. La comuna de Osorno cuenta con una considerable superficie plantada. A pesar de aglomerar a más de 160 000 habitantes (Portal Gobierno regional Los Lagos) y encontrarse en plena depresión intermedia con suelos muy fértiles pertenecientes a numerosas cuencas de ríos, es posible encontrar extensiones madereras: más de 500 [ha] plantadas en 6 años. La comuna de San Pablo, que si bien es menos habitada, comparte las demás características de la comuna de Osorno.
- VI. El pino oregón es una especie débilmente plantada en la provincia e inviable como para garantizar un suministro continuo de leña.
- VII. Las proporciones de superficies plantadas de nitens, globulus y pino radiata son independientes de si el propietario de los terrenos es pequeño, medio o grande (información no mostrada en la tabla).

## 2.3 Dendroenergía arbórea en el sur de Chile.

### 2.3.1 Trabajo analizado.

La dendrología es la rama de la botánica que estudia a las plantas leñosas, principalmente árboles y arbustos. Dentro de la dendrología, se denomina dendroenergía a la subcategoría que estudia las propiedades energéticas de las plantas leñosas.

Un análisis dendroenergético comparativo entre las distintas especies arbóreas existentes en el sur de Chile es absolutamente necesario para cumplir exitosamente el objetivo de elección de una madera óptima para la producción de leña ya que idealmente el producto vendido a través de la leña no debiese ser ni volumen ni masa sino que calor bruto (calorías).

La presente sección se basa en los resultados obtenidos por Burgos (2011) y corroborados por la Universidad de Rottenburg de Alemania (datos aún confidenciales) a través de convenios mutuos (portal SNCL). El trabajo de Burgos (2011) en su primera etapa busca caracterizar energéticamente a las 18 especies arbóreas más comunes del sur de Chile tanto nativas como exóticas listadas en la Tabla 11.

**Tabla 11: Nombres comunes, nombres científicos y origen de las 18 especies arbóreas analizadas por Burgos, 2011. Exot = exótica, Nat = nativa. Fuente: Elaboración propia a partir de Portal ChileBosques.**

Nombre común	Nombre científico	Nativa/Exótica
Aromo	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exot
Olivillo	<i>Aextoxicon punctatum</i>	Nat
Luma	<i>Amomyrtus luma</i>	Nat
Meli	<i>Amomyrtus meli</i>	Nat
Trevo	<i>Dasyphyllum diacanthoides</i>	Nat
Canelo	<i>Drimys winteri</i>	Nat
Ulmo	<i>Eucryphia cordifolia</i>	Nat

<b>Euc Glo</b>	<i>Eucalyptus globulus</i>	Exot
<b>Euc Nit</b>	<i>Eucalyptus nitens</i>	Exot
<b>Avellano</b>	<i>Gevuina avellana</i>	Nat
<b>Laurel</b>	<i>Laurelia sempervirens</i>	Nat
<b>Tepa</b>	<i>Laureliopsis philippiana</i>	Nat
<b>Radal</b>	<i>Lomatia hirsuta</i>	Nat
<b>Arrayán</b>	<i>Luma apiculata</i>	Nat
<b>Coigüe</b>	<i>Nothofagus dombeyi</i>	Nat
<b>Roble</b>	<i>Nothofagus obliqua</i>	Nat
<b>Pino Rad</b>	<i>Pinus radiata</i>	Exot
<b>Mañío</b>	<i>Podocarpus nubigena</i>	Nat

Los árboles cuya madera serviría para las mediciones fueron tomados de bosques y plantaciones de las comunas de Valdivia, Mariquina y Corral en la XIV región y fueron escogidos ejemplares que tuviesen edades intermedias, es decir en torno a los 40 años para las especies nativas y en torno a 12 años para las especies exóticas. La metodología seguida por Burgos (2011) se basa en la experimentación estándar establecida por ASTM (2007) mediante un calorimétrico. La Tabla 12 muestra los valores de las dos variables principales de la dendroenergía, PCS y  $\rho$ , para las especies estudiadas por Burgos (2011).

**Tabla 12: Poder calorífico superior y densidad de las especies arbóreas más comunes del sur de Chile en unidades SI y como porcentajes del promedio. Fuente: Elaboración propia a partir de Burgos, 2011.**

Especie	PCS [MJ/kg]	PCS [% prom]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [% prom]
<b>Aromo</b>	18,92	97,5	465	92,5
<b>Olivillo</b>	19,60	101,0	460	91,5
<b>Luma</b>	19,03	98,1	765	152,2
<b>Melí</b>	19,52	100,6	720	143,3
<b>Trevo</b>	19,39	100,0	530	105,5
<b>Canelo</b>	19,85	102,3	440	87,6
<b>Ulmo</b>	19,56	100,8	545	108,5
<b>Euc Glo</b>	19,00	98,0	555	110,4
<b>Euc Nit</b>	18,79	96,9	485	96,5
<b>Avellano</b>	18,80	96,9	440	87,6
<b>Laurel</b>	19,40	100,0	465	92,5
<b>Tepa</b>	19,46	100,3	460	91,5
<b>Radal</b>	19,38	99,9	420	83,6
<b>Arrayán</b>	19,48	100,4	500	99,5
<b>Coigüe</b>	19,24	99,2	480	95,5
<b>Roble</b>	19,41	100,1	440	87,6
<b>Pino Rad</b>	20,13	103,8	490	97,5
<b>Mañío</b>	20,19	104,1	385	76,6
<b>Promedio</b>	<b>19,40</b>		<b>502,50</b>	
<b>Desv Estándar</b>	<b>0,4</b>		<b>97,4</b>	

Para eliminar la influencia de la humedad contenida en la leña, debe calcularse el poder calorífico superior, PCS, y no el poder calorífico inferior, PCI, pues de lo contrario el agua, al absorber altas cantidades de calor durante la combustión de la leña, podría conllevar erróneamente a pensar que potencia el calor entregado por la leña. En otras palabras, el PCI asume que el agua contenida en la madera se encuentra en estado gaseoso una vez finalizada la combustión, mientras que el PCS asume que toda la humedad está en estado líquido y a la misma temperatura tanto al final como al inicio de la combustión, eliminando así su influencia.

Burgos (2011) extiende su estudio más allá del poder calorífico y la densidad. Dos propiedades intensivas adicionales, el contenido de cenizas y el punto de fusión de las cenizas, también fueron caracterizadas para las 18 especies de la Tabla 11. Ambas propiedades son particularmente interesantes para industrias que operan con equipos de combustión tipo calderas. Sin embargo, para los objetivos y el contexto de este informe no son relevantes y por tanto no se muestran. A continuación se discuten los datos presentados en la Tabla 12.

### **2.3.2 Poder calorífico superior de la madera.**

Además de leerse en la Tabla 12, los poderes caloríficos superiores de las 18 especies analizadas por Burgos se pueden observar en un solo gráfico en el Anexo F.

Es notable que todas las maderas analizadas posean PCS tan similares entre sí: el valor más bajo es de 18,79 [MJ/kg] para el nitens y el más alto es de 20,19 [MJ/kg] para el mañío, ninguno de ellos presentando fluctuaciones superiores a  $\pm 4,1\%$  con respecto al promedio. La similitud de los PCS se explicita también en la desviación estándar de los datos: tan sólo 0,4 [MJ/kg] para un promedio de 19,4 [MJ/kg].

Adicionalmente, Rocha (2011) muestra que la altura dentro de un árbol y la edad de este no implican variaciones apreciables en el PCS de la madera.

En otras palabras, la biomasa de origen arbóreo (al menos del sur de Chile) no presenta diferencias significativas en su poder calorífico superior.

### **2.3.3 Densidad de la madera.**

Al contrario del poder calorífico, la densidad sí varía considerablemente entre especies arbóreas. El Anexo F permite visualizar con facilidad este hecho: el mañío se encuentra por debajo de los 400 [kg/m<sup>3</sup>] mientras que la luma y el melí (también conocida como luma blanca) sobrepasan los 700 [kg/m<sup>3</sup>], es decir, casi duplican la densidad del mañío.

Para un promedio de densidad de 502,5 [kg/m<sup>3</sup>] se obtiene una desviación estándar de 97,4 [kg/m<sup>3</sup>] que representa alrededor del 20% del promedio, lo que corrobora las importantes variaciones de densidad existentes entre distintas especies arbóreas. Las fluctuaciones porcentuales con respecto al promedio pueden llegar a ser incluso mayores a un  $\pm 50\%$ .

Las grandes diferencias de densidad entre especies se hacen especialmente importantes si uno toma en cuenta que la venta de la leña se realiza por volumen.

## 2.4 El negocio de la leña.

### 2.4.1 Consumo de leña en Chile.

La leña, o más ampliamente la biomasa, representó el año 2008 el 17% de toda la energía generada en Chile (matriz primaria), lo cual implica que es la tercera fuente más importante de energía tras los combustibles fósiles y la hidroelectricidad (Venegas, 2008). No obstante, la biomasa representa tan solo un 1,4% de la capacidad de generación eléctrica instalada a nivel nacional a través del SIC y/o el SINC (Neira, 2011).

Si bien los usos que posee la leña son variados, alrededor de la mitad del volumen consumido, que alcanzó los 20 [Mm<sup>3</sup>] el año 2008, está asociado al sector residencial, comercial y público (Figura 13), principalmente para calefacción y en menor medida también para cocinar.

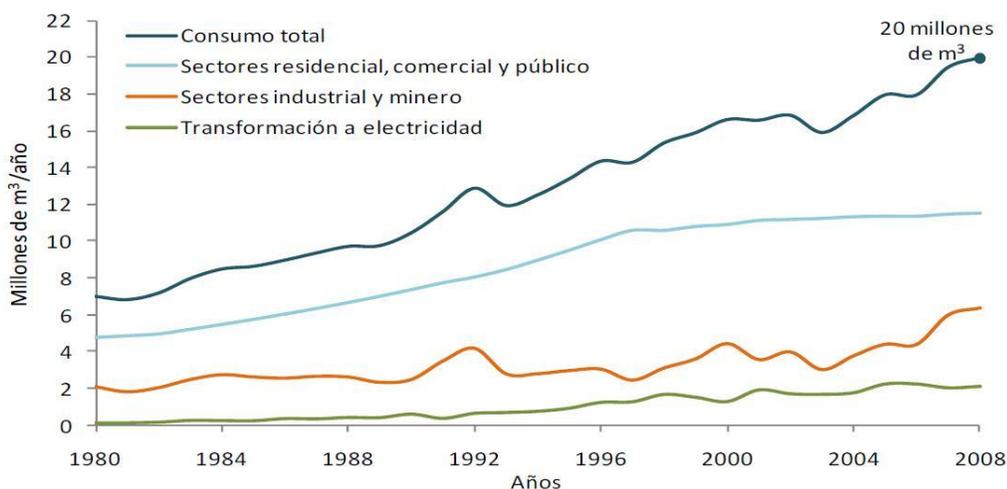


Figura 13: Consumo de leña por sectores de la sociedad. Nótese que el año 2008 se alcanzaron los 20 millones de metros cúbicos de leña consumidos. Fuente: Neira, 2011.

Gómez Lobo *et al.* (2006) realizan el desglose del consumo de leña de ese año tanto por sector como por región, tal y como se muestra en la Tabla 13.

De la Tabla 13 se puede observar que el consumo está tremendamente concentrado en las regiones con superficies importantes de plantaciones y/o bosque nativo que facilitan la disponibilidad del recurso: las regiones VII, VIII, IX, XIV y X engloban el 83,6% del consumo nacional. Si además se analizan los datos de consumo con respecto al número de habitantes o a la cantidad de hogares, se observa que las regiones más sureñas son aquellas con mayores “consumos específicos” por un gran margen de diferencia: en la zona central el consumo específico medio es de 1 [m<sup>3</sup>/año/hogar] mientras que en las regiones X y XI es de alrededor de 17 [m<sup>3</sup>/año/hogar] (información no mostrada).

El consumo comercial y público no reviste mayor importancia en volumen ni a nivel nacional ni a nivel regional salvo para las regiones XIV, X y XI. Para la décima región en particular, el consumo comercial y público representa el 17,6% del volumen total consumido, situación concordante con información dada por Avila (2011) que indica que la municipalidad de Osorno demandó 1 400 [m<sup>3</sup>] de leña seca durante los meses de invierno solo para abastecimiento de las escuelas rurales, urbanas y

jardines infantiles de la comuna (en total 41 recintos) que le son dependientes. Por lo tanto, es posible que las municipalidades de ciudades de más de 100 000 habitantes demanden por sí solas hasta 10 000 [m<sup>3</sup>/año].

**Tabla 13: Consumo en metros cúbicos sólidos de leña en Chile durante el año 2006. Abreviaciones: Com para comercio, Publ para público y sól para sólidos. Fuente: Neira (2011) a partir de Gómez Lobo et al., 2006.**

Regiones	Residencial		Grandes Consumidores		Total	
	Urbano	Rural	Industrial	Com/Publ	[m3] sól	% región
IV	24.735	134.025	271.884		430.644	2,8
V	13.356	55.775	289.139	51.245	409.515	2,7
VI	100.690	368.193	192.838	3.403	665.124	4,4
VII	433.309	1.303.929	1.078.895	12.305	2.828.438	18,5
VIII	798.465	1.542.549	1.479.555	72.149	3.892.718	25,5
IX	461.674	1.023.390	654.519	67.276	2.206.859	14,5
XIV-X	1.272.355	2.030.572	135.528	388.982	3.827.437	25,1
XI	356.234	102.045	3.107	83.630	545.016	3,6
XII	257.738	23.740			281.478	1,8
RM	82.470	7.663	25.306	68.510	183.949	1,2
<b>Nacional</b>	<b>3.801.026</b>	<b>6.591.881</b>	<b>4.130.771</b>	<b>747.500</b>	<b>15.271.178</b>	
<b>% sector</b>	<b>24,9</b>	<b>43,2</b>	<b>27,0</b>	<b>4,9</b>		

Destaca que las regiones VII y VIII tengan consumos industriales de leña tan elevados. La razón más verosímil radica en el aprovechamiento de los desechos forestales por parte de las grandes empresas forestales de celulosa y aserrío y que se localizan en su gran mayoría en esa zona.

También es interesante notar el peso que tiene el sector rural en el consumo de leña pues representa el 43,2% del consumo total. Factores que pueden explicar el alto consumo en especial rural pero también residencial son:

- Bajas temperaturas en invierno.
- Abundancia y disponibilidad local del combustible. En las zonas rurales la leña es recolectada de los mismos predios y suele no sufrir procesos de secado y/o aislamiento por lo que también hay un aprovechamiento muy deficiente del recurso.
- Tradiciones históricas del sur de Chile, en donde la leña y los equipos para calefaccionar las viviendas se asocian al confort y al hogar bien mantenido.
- Bajo precio en comparación a los demás sustitutos como la electricidad, el gas, la parafina o el petróleo.

Con respecto a este último punto, de decisiva relevancia, se continúa con la siguiente sección.

#### 2.4.2 Precio de la leña y sus sustitutos.

La Figura 14 muestra la tendencia creciente del precio de los demás sustitutos de la madera, la que por el contrario ha mantenido su valor pues es un recurso aún sub-explotado y con una oferta

dinámica y creciente. No obstante, dentro de un mismo año sí pueden observarse variaciones sustanciales de hasta un 20% (ver Tabla 14) en los precios de la leña ya que a mediados de invierno comienza a escasear y su precio se dispara: durante septiembre de este año la leña de nitens se vendió a 29 000 [\$/m<sup>3</sup>] en Valdivia.

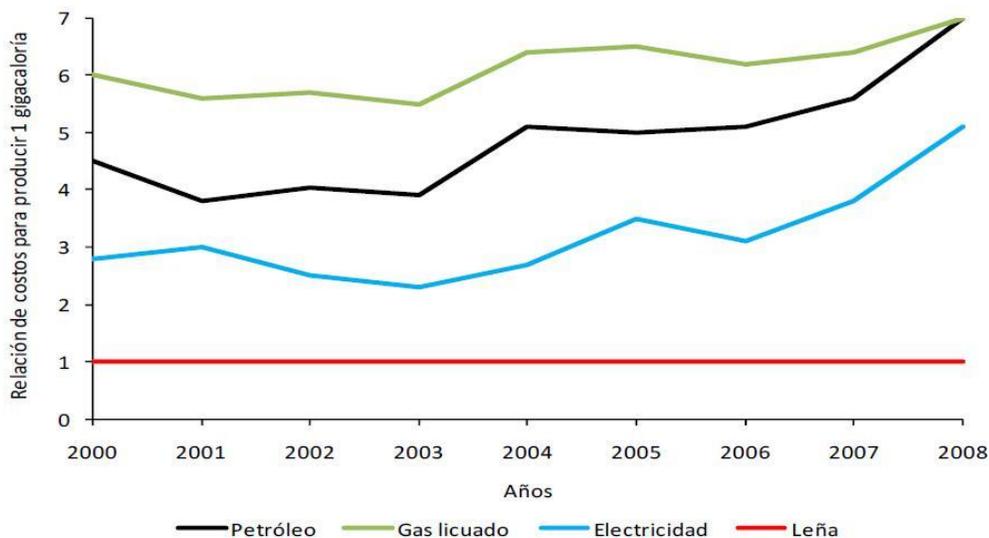


Figura 14: Costo en el que se incurre para generar 1 [Gcal] de calor para las cuatro fuentes de energía más comunes. Fuente: Venegas (2008) a partir de Corporación nacional de certificación de leña, 2008.

De actualizarse hasta el año 2012 la Figura 14, es muy posible que la diferencia de precios entre la leña y sus sustitutos haya continuado su distanciamiento y posiblemente la tendencia no se invertirá en el futuro, al menos para el petróleo y el gas licuado.

Además de que el precio de la energía asociada a la leña y sus demás sustitutos afecta la preferencia de los consumidores residenciales, las industrias de mayor envergadura también han comenzado a interesarse por las energías renovables y en particular las industrias de la región de Los Lagos por la biomasa. Algunos casos interesantes son los de MAFRISUR o MADEXPO, industrias osorninas de los rubros alimenticio y forestal respectivamente que ya operan con un grado importante de leña seca, pero más abrupto aún es el caso de Nestlé, que tiene planeado operar los procesos de su nueva planta de leche en polvo ubicada en el sector de Pichil, comuna de Osorno (al borde de la ruta CH-215) exclusivamente a partir de biomasa. La planta de Pichil tiene una capacidad máxima de procesamiento de leche fresca de 980 [kL/día] y necesitará alrededor de 43 920 [m<sup>3</sup>/año] de leña para soportar el funcionamiento de sus operaciones (Avila, 2011).

La Tabla 14 muestra valores de venta de leña certificada para varias empresas de Valdivia y Osorno. Si bien se tiene un listado mayor, la Tabla 14 permite hacerse una idea general de los precios que se manejan en el mercado de la leña.

No obstante, tanto la informalidad del mercado como la heterogeneidad de los productos ofertados crean irregularidades en los precios. Algunos ejemplos:

- Formatos de venta: metros cúbicos trozados, metros cúbicos lineales, saco de 15 [kg], saco de 25 [kg], canastos, varas, astillas, triciclos.

- Calidad de la madera: maderas duras, blandas, nativas, exóticas, maderas muertas.
- Formalidad del comerciante: establecido, informal, ilegal.
- Servicios asociados: puesto afuera del domicilio, dentro del domicilio, venta en leñería, venta en predio.

**Tabla 14: Tabla de precios durante el año 2011 de varias empresas que comercializan leña certificada por el SNCL (sello verde) en las ciudades de Valdivia y Osorno. Nota: Leña blanca comprende una mezcla de roble, olivillo, coigüe y canelo, entre otras.**

Fuente: Elaboración propia.

Empresa	Ecoleña	Ecoleña	En del bosque	En del bosque	Tenosor	Kutralwe
<b>Ciudad</b>	Valdivia	Valdivia	Valdivia	Valdivia	Osorno	Osorno
<b>Precio de 1 m<sup>3</sup></b>	29500	25500	26500	26500	30000+iva	24000
<b>Especie</b>	Nitens	Nativa blanca	Nitens	Nativa Blanca	Aromo	Nitens
<b>Formato entrega</b>	Domicilio	Domicilio	Domicilio	Domicilio	Domicilio	Domicilio
<b>Mes del año</b>	Agosto	Noviembre	Noviembre	Noviembre	Noviembre	Noviembre

### 2.4.3 Informalidad del mercado de la leña.

Con respecto al mercado de la leña, este se caracteriza por una estrepitosa informalidad. Neira (2011) estima que el 90% de los montos tranzados de leña es informal, es decir, los actores del mercado de la leña operan al margen de la normativa vigente tributaria, forestal, laboral, de permisos y patentes municipales, de salud y de transporte.

Iturriaga y Neira (2008) determinaron a partir de una encuesta a 848 hogares de la ciudad de Puerto Montt (2% del total) que el 53% de los vendedores de leña no están formalizados y que eso por sí solo implica que no se recaudan 1,3 [MUS\$/año] por IVA. En el mismo estudio el 82% de los consumidores señalaron no recibir boleta y Neira (2011) estima que en toda la región de Los Lagos esa cifra sube a 94%, al igual que en la región de Los Ríos. Otra encuesta realizada por el SNCL el año 2009 a 160 productores y comerciantes de leña a lo largo de Chile evidenció que el 28% no contaba con permiso municipal para leñería y que el 45% no obtenía la madera desde bosques con planes de manejo establecidos por CONAF.

El sistema nacional de certificación de la leña, SNCL, fue establecido el año 2004 y desde entonces ha aportado a la formalización del mercado de la leña y si bien ha habido avances, particularmente en la ciudad de Temuco, aún no se ha conseguido un impacto sensible a nivel nacional: La Tabla 15 muestra que sólo el 5% del volumen de leña consumido anualmente en las grandes ciudades del centro-sur y sur de Chile corresponde a leña certificada. Sin embargo, es destacable que los consumidores, el público en general y las autoridades sí han sido concientizados durante los últimos años por lo que el proceso de certificación debería acelerarse en el tiempo a través de políticas públicas que han comenzado a implementarse o que están confeccionándose. Un ejemplo de gran impacto es que los servicios públicos que se abastezcan de leña deberán exigir que el producto que compran esté debidamente certificado (Portal SNCL).

Tabla 15: Participación de la leña certificada en el mercado de la leña. Fuente: Neira (2011) a partir de Gómez Lobo et al. (2006) y SNCL (2010).

Ciudad	N° de comerciantes certificados	Consumo Leña certificada [m <sup>3</sup> ]	Consumo total leña [m <sup>3</sup> ]	Parte del mercado leña certificada [%]
Talca	3	4.500	150.000	3
Gran Concepción	3	5.200	499.425	1
Temuco	19	40.000	500.000	8
Valdivia	28	25.000	450.935	6
Osorno	12	25.000	471.243	5
Puerto Montt	10	30.000	600.000	5
Castro/Ancud	5	15.000	314.739	5
Coyhaique	13	20.000	500.000	4
<b>Total Nacional</b>	<b>93</b>	<b>164.700</b>	<b>3.486.342</b>	<b>5</b>

#### 2.4.4 Comportamientos del consumidor residencial.

Es importante hacer hincapié en que los consumidores residenciales suelen comportarse de manera diferente a los consumidores industriales independientemente del mercado que se estudie. A partir de los datos y discusiones de capítulos y secciones anteriores esa diferencia se hace evidente, y para alcanzar al consumidor industrial se debe hacer un planeamiento previo de la producción que puede especificarse sólo una vez la planta de secado esté diseñada, es decir, en etapas posteriores a la actual, por lo que esta sección solo estudia al consumidor residencial.

La mejor información de libre circulación disponible para estudiar las preferencias y el comportamiento del consumidor residencial de leña proviene de Iturriaga y Neira (2008). Como ya se mencionó, utilizaron una encuesta de 45 preguntas contestada por 848 hogares de la ciudad de Puerto Montt (2% del total de los hogares de la ciudad) sobre diversos temas relacionados con la leña. Si bien hay algunos tópicos irrelevantes para los fines de esta tesis, como los equipos de combustión utilizados o los horarios de consumo de leña, hay otros que sí es importante considerar. A continuación se mencionan los temas relevantes del estudio de Iturriaga y Neira (2008).

##### A. Leña como fuente de energía.

- El 95% de los encuestados cree que el precio de la leña es alto o muy alto. Sin embargo, el mismo porcentaje señala que el gas y la electricidad son más caros que la leña y la parafina igual que la leña.
- 74% de los hogares utiliza leña como combustible principal, 14% utiliza leña como único combustible y 9% prefiere gas o parafina.

##### B. Gasto y volumen utilizado.

- El consumo promedio de leña es de 16,6 [m<sup>3</sup>], valor casi idéntico al consumo promedio medido por Reyes, 1998, por lo que no se detecta un aumento en el consumo específico.

- El mercado local de leña representa 9,5 [GCL\$/año] o equivalentemente 19,5 [MUS\$/año] que a su vez se traduce en 586 301 [m<sup>3</sup>/año]. Este volumen representa un aumento de un 38% con respecto a lo obtenido por Reyes (1998) y se explica por el aumento de la población de la ciudad ya que el consumo específico casi no ha variado.
- El estrato social medio es el de mayor consumo. El estrato social medio consume mayor volumen de leña que el estrato alto pues es usual que utilice leña para cocinar además de calefaccionarse. El estrato social bajo se comporta de igual manera que el medio pero por su menor disponibilidad de recursos consume un menor volumen.

#### D. Abastecimiento de leña.

- El 28% de los hogares adquiere toda la leña del año en verano (época de menor precio) versus un 11% que compra toda la leña en invierno (época de mayor precio), es decir, no hay una temporada específica en la cual se concentre la adquisición de la leña: durante todo el año hay compradores.

#### E. Especies utilizadas.

- Encuestados identifican como buena leña a 10 especies nativas y 2 exóticas (pino y eucalipto), sin embargo el 99% de la leña es de origen nativo. Es interesante notar que no se hace distinción entre nitens y globulus ya que el eucalipto se considera como una sola especie.
- Las tres especies más valoradas en orden decreciente son luma, ulmo y tepú y las razones que dan los encuestados son dos: un alto valor calorífico y un alto “rendimiento” (tiempo de combustión). La mezcla de maderas de estas tres especies recibe el nombre de madera roja. Los calificativos por los que optan los encuestados indican conocimientos adquiridos empíricamente sobre dendroenergía ya que corresponden con las diferencias de densidad explicitadas en la sección 2.3. En cuanto al aprecio por parte de los consumidores del tiempo que demora la combustión, es importante considerar este hecho ya que dimensiones pequeñas de leña que puedan facilitar el secado podrían perder preferencia por parte de los potenciales clientes. Además, el factor rendimiento debe ser una de las principales razones por las cuales la leña de pino es tan poco común: los pinos tienden a arder muy rápido y usualmente se utilizan sólo para astillas que inicien fuego (Luengo, 2011).
- El tepú representa el 20% del volumen total consumido pero sólo el 1,4% de los bosques siempreverdes, por lo que existe una gran presión sobre el tepú a ser talado. Adicionalmente, se observa una apreciable disminución en la participación del ulmo y de la luma con respecto a 1998, lo que podría indicar el inicio de una problemática de abastecimiento de estas especies de muy lento crecimiento: el árbol maduro adulto se obtiene aproximadamente a los 80 años (Luengo, 2011).

#### F. Humedad de leña y certificación.

- Sólo el 7% señala que leña húmeda no genera problemas ambientales, es decir, hay conciencia de que la problemática asociada a combustionar un producto húmedo.

- El 30% de los encuestados afirma comprar leña seca y un 17,5% deja la leña apilada a la intemperie creyendo que es un secado efectivo, por lo que no existe claridad en cómo mantener seca a madera que originalmente fue vendida así.
- El 56% de los consumidores mide la leña ya comprada para verificar el volumen adquirido. Esto muestra que los consumidores no sienten confianza en los comerciantes a través de los cuales adquieren la leña.
- El 70% de los hogares afirma estar interesado en comprar leña certificada principalmente por dos razones: el cumplimiento de planes de manejo forestales y garantía en la calidad del producto. Sin embargo, el resultado de la encuesta no es concluyente en si los consumidores estarían dispuestos a pagar más por un producto certificado.

## 2.5 Principales antecedentes recopilados.

A continuación se presenta una síntesis de los principales antecedentes que ya fueron presentados y/o discutidos a lo largo de este capítulo.

- La leña se produce tanto a partir de raleos como a partir de trozas pulpables y en su gran mayoría proviene de bosque nativo y no de plantaciones.
- La industria del aserrío utiliza prácticamente solo pino radiata para producir productos semi elaborados de mayor procesamiento y productos manufacturados.
- En la industria de la pulpa de celulosa, las fibras de pino radiata son preferidas a las fibras de eucalipto. A su vez, las fibras de globulus son preferidas a las fibras de nitens.
- Japón y China, los mayores compradores de la industria de la celulosa, han mostrado en el pasado reciente poca disposición a adquirir astillas o pulpa de nitens.
- La disponibilidad tanto actual como futura de nitens, y en menor medida de globulus, es alta en las comunas de Purranque, Río Negro, San Pablo y Osorno.
- Por su cercanía y buenos accesos, las comunas de Osorno y San Pablo representan a priori las zonas para las cuales el costo de transporte de leña hacia la planta puede minimizarse.
- Las especies arbóreas no presentan diferencias significativas en sus poderes caloríficos superiores.
- Las especies arbóreas sí presentan diferencias significativas en sus densidades. Además, las maderas más densas son popularmente más valoradas, deduciéndose conocimientos dendroenergéticos adquiridos empíricamente por parte de los consumidores.
- En la región de Los Lagos, los grandes consumidores públicos e industriales consumen un volumen anual de leña que los hace potencialmente tan interesantes como los consumidores residenciales.
- La leña es drásticamente preferida a todos los demás sustitutos como el petróleo, la electricidad o el gas natural, principalmente por el concepto de precio.
- La leña certificada representa un porcentaje pequeñísimo del mercado total de la leña. Sin embargo, la concientización de la población, políticas públicas ya implementadas y otras por venir permiten augurar un cambio acelerado de esta situación.
- Las especies calificadas como mejores leñas por parte de los consumidores son nativas y tanto por su participación descendente como por la rotación de alrededor de 80 años que poseen muestran signos de no ser sustentables.

- El rendimiento, o tiempo de combustión que tiene un trozo de leña, es valorado por los usuarios y debe considerarse al momento de diseñar el proceso de secado para no comprometer la preferencia de los potenciales clientes.
- Existe desconfianza por parte de los consumidores hacia los comerciantes de leña. Al mismo tiempo, son conscientes de la problemática ambiental que implica la humedad de la leña y muestran interés por adquirir un producto certificado pero probablemente no a un mayor precio.
- El nitens no siempre se diferencia del globulus y ambas leñas suelen venderse simplemente como leña de eucalipto.

## 2.6 Indicadores para escoger una especie arbórea.

A continuación se presentan con mayor detalle los indicadores mediante los cuales se realiza la elección de una madera para ser vendida como leña certificada.

$Y_1$ : Abundancia con respecto a la comuna de Osorno. Su valor está explicitado por la superficie actual y futura plantada tanto en la provincia de Osorno (ponderación 80%) como en la comuna de Osorno (20%) mediante la siguiente fórmula para una cierta madera "i":

$$Y_1 = 100 \left( \frac{0,8 \cdot \{superficie\ de\ i\ en\ la\ provincia\}}{\{área\ total\ plantada\ en\ la\ provincia\}} + \frac{0,2 \cdot \{superficie\ de\ i\ en\ la\ comuna\}}{\{área\ total\ plantada\ en\ la\ comuna\}} \right) \quad (2.1)$$

$Y_2$ : Disponibilidad de proveedores y demanda de mercados alternativos. Su valor se determina arbitrariamente en función de: (i) la concentración de la especie, es decir, si las superficies plantadas son manejadas por pocas empresas integradas verticalmente hacia adelante o no y (ii) la competencia por adquirir la especie por parte de otros mercados (celulosa, aserrío, exportaciones). Un alto valor de  $Y_2$  quiere decir que la especie en cuestión es plantada por numerosos propietarios con baja integración vertical hacia adelante y que la demanda por parte de otros mercados es baja.

$Y_3$ : Propiedades dendroenergéticas. Este indicador puede visualizarse como el PCS volumétrico (unidades de  $[MJ/m^3]$ ) de la especie en cuestión versus el PCS volumétrico más alto de todas las especies analizadas por Burgos (2011). Su valor está explicitado por la siguiente fórmula:

$$Y_3 = 100 \frac{PCS \cdot \rho}{\max(PCS \cdot \rho)} \quad (2.2)$$

En donde:

$$\max(PCS \cdot \rho) = PCS_{luma} \cdot \rho_{luma} \quad (2.3)$$

$Y_4$ : Costo, calidad y certificación de la madera ofertada. Su valor está determinado arbitrariamente por: (i) el costo del metro-ruma, (ii) la calidad del metro-ruma y (iii) la proveniencia de las trozas, es decir, si son originarias de plantaciones forestales o de bosques con plan de manejo para que así sean susceptibles de certificarse por CONAF. Un alto valor de  $Y_4$  quiere decir que las trozas de la especie en cuestión se venden a precio moderado, son de buena calidad y que tienen el potencial de ser certificadas.

$Y_5$ : Preferencias del consumidor. Como ya se mencionó en la sección previa, la preferencia del consumidor va principalmente asociada a: (i) el tiempo que demora en combustionar la madera y (ii) la reputación que posee. Un alto valor de  $Y_5$  quiere decir que la especie en cuestión arde lentamente y es bien valorada por los consumidores de leña.

Las maderas que se toman en cuenta para el cálculo de los cinco indicadores son el eucaliptus nitens, el eucaliptus globulus, el pino radiata, la madera nativa roja y la madera nativa blanca. La razón por la cual no se evalúan de manera individual ciertas maderas nativas, como por ejemplo el ulmo o el coigüe, se debe a que es prácticamente imposible ser abastecido de este modo: la leña nativa se agrupa en blanca y roja tanto para ser vendida como trozas así como leña. Bosques de madera nativa en forma de mono-cultivos (es decir, con una sola especie cultivada) son rarísimos de encontrar. Por otro lado, otras maderas exóticas como el pino oregón o el aramo australiano no se han plantado de manera suficiente como para ser compradas continuamente.

Las ponderaciones escogidas para cada una de los cinco indicadores en el indicador total,  $Y_{TOT}$ , son netamente apreciaciones arbitrarias determinadas a partir de la experiencia de Comercial Primavera.

La Tabla 16 muestra los valores de los indicadores calculados para las cinco especies (o grupos de especies) consideradas. Para una mejor comprensión de los valores de los indicadores arbitrarios, se recomienda revisar cuidadosamente la sección precedente.

**Tabla 16: Valor porcentual de cada indicador para cada madera considerada.**

Indicador	Nitens	Globulus	Pino rad	Nativa roja	Nativa blanca	Ponderación [%]
$Y_1$	51	21	24	12	44	25
$Y_2$	70	52	56	41	64	15
$Y_3$	63	72	68	90	60	25
$Y_4$	71	62	76	18	22	25
$Y_5$	50	55	42	85	55	10
$Y_{TOT}$	<b>61,75</b>	<b>52,05</b>	<b>54,6</b>	<b>44,65</b>	<b>46,6</b>	<b>100</b>

### 3. El proceso de secado de la madera.

Este capítulo comienza con una descripción de la fenomenología física involucrada en el secado convectivo de una tabla individual de madera. Esta descripción permite interiorizar de manera más directa las diferencias existentes entre los distintos tipos de secadores. Luego se presenta y discute información relativa a las variables que afectan la duración del secado, tras lo cual se explica y plantea la importancia del secado de la madera. Finalmente se enuncia la ecuación gobernante del transporte radiativo en una superficie.

En conjunto, la información de este capítulo está destinada a preparar al lector para entender de manera más fácil el resto de este trabajo.

#### 3.1 El proceso de secado dentro de una tabla.

##### 3.1.1 Secado convectivo a $T < 80$ [°C].

El secado convectivo a baja temperatura es el proceso de secado industrial más común en el mundo (Perré y Keey, 2006). En este caso, el rol de la presión gaseosa interna es despreciable y la transferencia ocurre principalmente en la dirección del espesor de las tablas de madera.

Dos etapas pueden ser distinguidas: el primer periodo de tasa de secado constante y el segundo periodo de tasa de secado decreciente.

###### *I. Periodo de tasa de secado constante.*

En esta etapa (ver Figura 15), la superficie expuesta de la tabla está aún por sobre el FSP. En consecuencia la presión de vapor en la superficie es igual a la presión de vapor saturado y actúa como una función dependiente únicamente de la temperatura (Perré y Keey, 2006).

La superficie expuesta es abastecida con agua líquida proveniente del interior de la tabla por acción capilar dirigida por gradientes de humedad. El flujo de energía suministrado a través de la corriente de aire es utilizado sólo en transformar el agua líquida que se encuentra en la superficie de la tabla en vapor. Mientras esta condición perdure, la tasa de secado es constante y depende sólo de condiciones externas ( $T_{BS}$ , RH,  $v_a$ ). La temperatura de la superficie de la tabla es igual a la temperatura de bulbo húmedo. Más aún, como la transferencia de energía no ocurre dentro del medio poroso, la temperatura completa de la tabla es la temperatura de bulbo húmedo.

El periodo de tasa de secado constante termina cuando la superficie de la tabla deja de recibir agua líquida desde el interior del medio.

###### *II. Periodo de tasa de secado decreciente.*

Una vez que la tabla está bajo el FSP, la superficie es la primera zona que ingresa al rango higroscópico y la presión de vapor se hace más pequeña que la presión de vapor saturado (Figura 16). Por lo tanto, el flujo de vapor que abandona la tabla se reduce y el flujo de calor suministrado al medio

es temporalmente mayor que aquel necesario para evaporar líquido. El exceso de energía se utiliza en calentar la tabla, comenzando con las zonas más externas y gradualmente incorporando zonas internas. Un nuevo y más sutil equilibrio dinámico se origina: la presión de vapor de la superficie, y en consecuencia el flujo de vapor que abandona la tabla, depende tanto de la temperatura como del contenido de humedad (Perré y Keey, 2006). Mediante una relación dependiente del balance de energía del sistema, la temperatura de la superficie aumenta mientras el contenido de humedad de la superficie disminuye. El resultado neto es una tasa de secado decreciente.

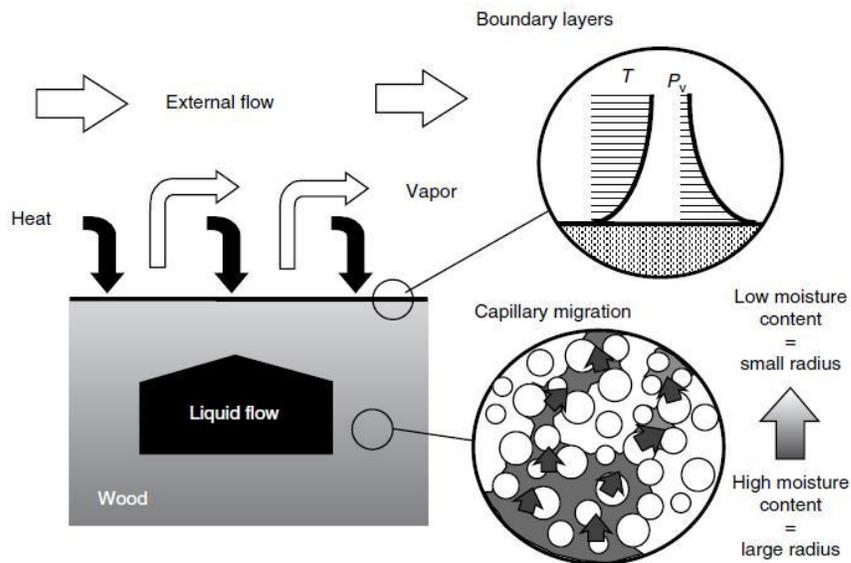


Figura 15: Periodo de tasa de secado constante. La humedad migra dentro del medio ocurre principalmente por fuerzas capilares. La evaporación ocurre en los bordes (o superficie) de la tabla. Fuente: Perré, 1996.

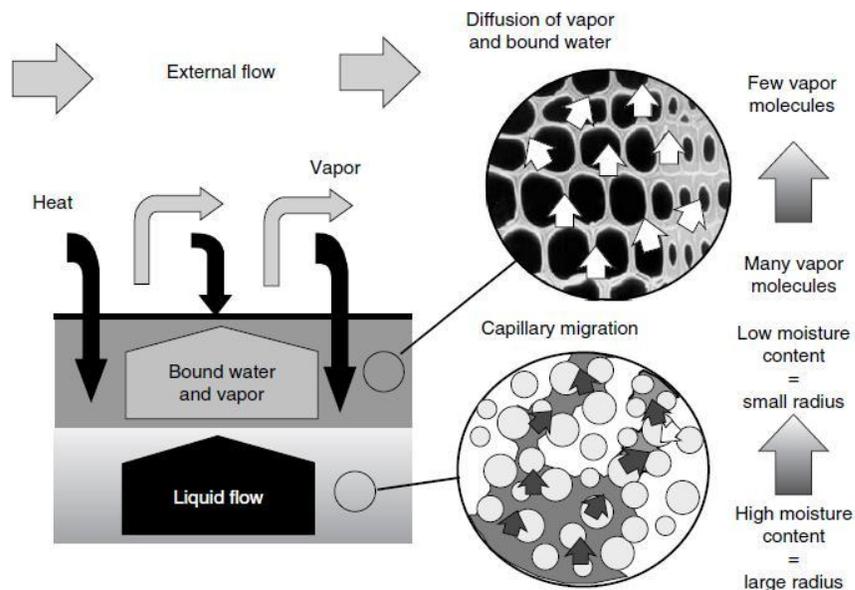


Figura 16: Periodo de tasa de secado decreciente. En la región higroscópica que se desarrolla en torno a las zonas superficiales, tanto la difusión de vapor como la difusión de agua enlazada actúan. Una importante fracción de la evaporación total ocurre dentro del medio, por lo que el flujo de energía debe ser llevado a las zonas internas de la tabla por conducción. Fuente: Perré, 1996.

La dinámica del proceso de secado genera la aparición de dos zonas dentro de la tabla: (1) una zona interna en donde la migración de agua líquida aún prevalece y (2) una zona de la superficie en donde las difusiones de agua enlazada y vapor ocurren. Durante este periodo, un flujo conductivo de calor debe existir dentro de la tabla tanto para evaporar líquido movilizado por difusión gaseosa como para aumentar la temperatura. La región de migración líquida se reduce paulatinamente a medida que el secado progresa. El proceso finaliza una vez que la temperatura y el contenido de humedad alcanzan la temperatura de bulbo seco y el EMC, respectivamente.

### **3.1.2 Secado a alta temperatura: el efecto de la presión interna.**

Para reducir la duración del secado sin disminuir la calidad del producto, las condiciones deben ser tales que la temperatura del producto se encuentre por sobre el punto de ebullición del agua (Kamke y Casey, 1988). Estas condiciones aseguran la existencia de una sobrepresión dentro del material, lo que implica que un gradiente de presión dirige la humedad gaseosa y líquida hacia la superficie de intercambio.

A presión atmosférica, el punto de ebullición del agua es de 100 [°C]. Para obtener una sobrepresión interna, la temperatura del medio poroso debe encontrarse por sobre este nivel en al menos una parte del proceso. Ese es el objetivo del secado convectivo a alta temperatura, independientemente de si utiliza vapor sobrecalentado o aire húmedo, y un posible objetivo del secado con campos electromagnéticos, en particular por micro-ondas.

Sin embargo, también es posible reducir el punto de ebullición del agua disminuyendo la presión externa y así obtener un efecto de secado de alta temperatura con condiciones de secado relativamente moderadas (ver Anexo G). Este es el principio fundamental del secado al vacío, que es particularmente útil en maderas que se ven dañadas por altas temperaturas.

Como muestra la Figura 17, el efecto del gradiente de presión ocurre en la dirección longitudinal, aun cuando el flujo de calor es suministrado en la dirección del grosor de la tabla. Esto ocurre por las características anatómicas de la madera (Perré y Keey, 2006), y si el transporte interno es muy intensivo entonces los extremos de la tabla pueden quedar totalmente saturados. Más aún, la humedad puede incluso abandonar la tabla en estado líquido. El secado por micro-ondas se destaca por exhibir esta característica.

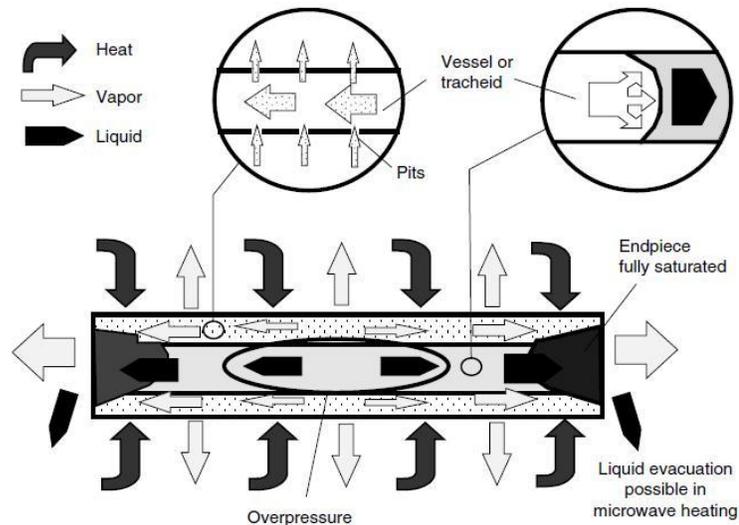


Figura 17: Secado a alta temperatura: un secado de alta temperatura provoca la aparición de una sobrepresión que induce drásticamente la circulación de líquido y/o gas dentro del medio. Además, la anisotropía de la madera causa que la mayor parte del flujo ocurra en la dirección longitudinal (ver las vistas magnificadas). Fuente: Perré, 1996.

## 3.2 Variables que afectan la duración del secado.

### 3.2.1 A nivel de tablas individuales.

El tiempo que demora el proceso de secado de una tabla de madera depende de variables ligadas tanto a sí misma como al secador y a las condiciones climáticas. Entre las propiedades inherentes de una tabla que afectan el secado se encuentran:

- **La especie.** Algunas maderas se secan rápidamente, otras lentamente. Como regla general, las maderas blandas y las maderas duras de baja densidad, entre las cuales se encuentra el nitens, toman menos tiempo en secarse que las demás bajo condiciones favorables (Rietz y Rufus, 1999). Las maderas duras de mediana y/o alta densidad requieren de más tiempo para alcanzar el CHP deseado.
- **El grosor.** El grosor de las tablas de madera afecta de manera decisiva la duración del secado: el tiempo de secado se incrementa aproximadamente en el grosor elevado a 1,5. Esto quiere decir que una tabla de 50 [mm] de grosor requiere tres veces más tiempo en perder una igual cantidad de humedad que una tabla de 25 [mm] de grosor.
- **Patrones de corte.** Los rayos anatómicos de la madera son el camino más propicio para que las fibras pierdan humedad. El corte “quartersawn” deja pocos rayos expuestos mientras que el corte “flatsawn” preserva una mayor cantidad de rayos, razón por la cual tablas con este tipo de corte demoran menos en secar (ver Anexo H).
- **Albura y duramen.** La humedad contenida en la albura es usualmente mucho mayor que la humedad contenida en el duramen; sin embargo, las características anatómicas de la albura hacen que sea más fácil secarla que el duramen. En maderas duras, esta diferencia no es tan apreciable como en las maderas blandas.

### 3.2.2 A nivel de empaque y cancha.

El secado de madera se ve afectado por la manera en que las tablas son ordenadas para formar empaques y también por la manera en que los empaques son ordenados para formar una cancha. Rietz y Rufus (1999) señalan que:

- El distanciamiento entre los empaques acelera el secado.
- La existencia de espacios entre las tablas facilita el secado al aire libre pero no necesariamente los secados en hornos.
- Los empaques ubicados en la periferia de la cancha demoran menos en secar que aquellos ubicados en el centro.
- Conductos tipo chimenea promueven un flujo de aire eficiente a través del empaque (ver Figura 18).
- Las fundaciones bajo el empaque deben ser razonablemente altas (460-610 [mm]) para permitir un movimiento de aire activo bajo este.
- Las fundaciones del empaque no deben obstruir el flujo de aire. Maleza, astillas u otros desechos que pueden encontrarse en el suelo bajo los empaques bloquean la circulación de aire.
- De no encontrarse cubierto de lluvias y/o nieve el suelo, es de vital importancia que este posea una buena pavimentación y drenaje.
- Utilizar materiales negros en el suelo de la cancha y otros lugares puede ser ventajoso para si hay exposición a la luz solar.

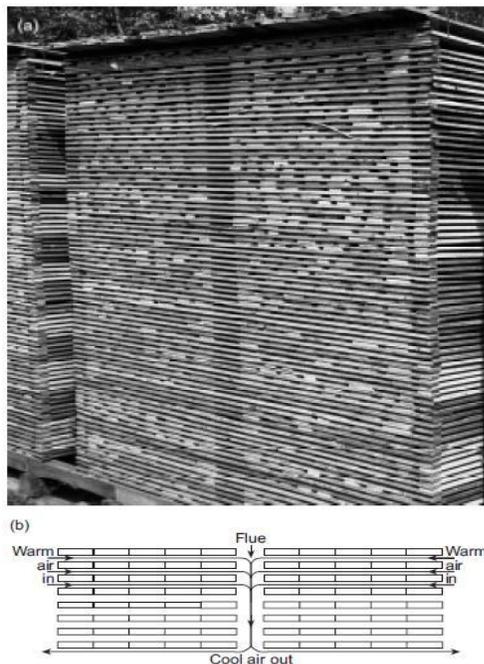


Figura 18: (a) Tablas de ancho variable de este empaque construido a mano están espaciadas en cada capa. Nótese que la franja vertical de tono oscuro en el centro del empaque corresponde a la chimenea. (b) Flujo de aire a través del empaque y la chimenea.

Cabe destacar que algunas de las variables recién mencionadas y todas aquellas relativas al diseño del empaque están sujetas al tipo de secador que se utilice para llevar a cabo el proceso de remoción de

humedad. Por lo tanto, es recomendable primero escoger y diseñar un secador particular y luego delinear la estructura de los empaques.

### 3.2.3 Ambientales.

Entre las propiedades independientes de una tabla y del empaque, es decir ambientales, que afectan la duración del secado se encuentran:

- **Humedad relativa del aire o depresión de bulbo húmedo.** Una gran diferencia entre las  $T_{BS}$  y  $T_{BH}$  (es decir, una baja RH) facilita el secado: Al encontrarse el aire menos saturado de agua, el gradiente de humedad obliga a la madera a entregarle vapor en vez de captarlo. El anterior fenómeno se refleja de igual modo en el EMC de la madera: a menor RH, menor EMC.
- **Temperatura.** El efecto de la temperatura ya se explicó en la sección 1.1. A mayor temperatura, mayor velocidad de secado. Cabe recordar que consecuentemente EMC también se ve afectado por la temperatura: a mayor temperatura, menor EMC.
- **Velocidad del aire.** Un buen flujo de aire permite mejorar la transferencia convectiva de energía entre la madera y el aire y además provee uniformidad al secado de un empaque. No obstante, su efecto decrece en importancia a medida que el secado progresa y la transferencia interna controla el proceso de migración de humedad (Perré y Keey, 2006).
- **Radiación solar.** La energía electromagnética provista por el sol puede eventualmente ser utilizada como energía útil en el proceso de secado. De ser ese el caso, la intensidad de la radiación solar es una variable ambiental importante dependiente tanto de la localización geográfica como del momento del día.

La Figura 19 muestra la importancia relativa de distintas variables y grupos de variables para acortar la duración del secado de una tabla de madera para secadores convencionales. Cabe destacar que el grosor de la tabla es la propiedad de mayor importancia, mientras que la difusividad termal, propiedad principalmente inherente de la madera que se esté utilizando, es la menos importante. Para valores altos, la temperatura tiene mayor importancia en comparación a la velocidad de aire. Sin embargo, este hecho puede deberse a que Perré (2001), referencia de donde fue obtenida la Figura 19, estudia extensamente el efecto de la presión interna por sobre una temperatura superior al punto de ebullición del agua, momento en el cual la temperatura en efecto aumenta drásticamente la migración de humedad en las tablas. Es posible entonces presumir que si las tablas de madera se mantienen a una temperatura que esté por debajo del punto de ebullición del agua la relevancia de la temperatura sea similar a la de la depresión de bulbo húmedo y/o velocidad del aire.

En general, el tiempo de secado es reducido cuando la velocidad y temperatura del aire son altas y la humedad relativa es baja (Perré y Keey, 2006). Sin embargo, hay que tener presente que en el caso de buscarse un secado que permita obtener un producto de buena calidad, es decir con un mínimo de deformaciones, fisuras y descoloraciones, entonces además de la transferencia de masa y energía se debe considerar también la aparición de estrés interno en las tablas. Una vez que las tablas están por bajo del FSP, las variables que optimizan uno de los dos fenómenos pueden y suelen perjudicar al otro.

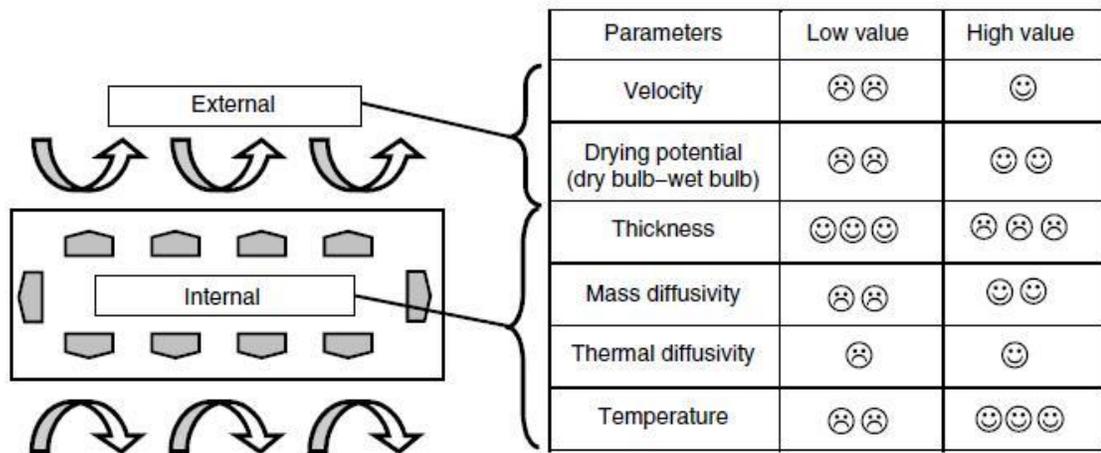


Figura 19: Importancia de distintos parámetros en obtener un secado de corta duración, siendo tres caras felices equivalente a excelente y tres caras tristes equivalente a pésimo. Fuente: Perré, 2001.

### 3.3 Ventajas de la madera seca.

El secado de la madera es una operación de vital importancia para la comercialización actual de la madera. La madera seca tiene muchas ventajas en comparación a la madera verde (es decir fresca, sin procesar) tanto para productores como consumidores:

- La remoción del exceso de agua reduce el peso y por tanto los costos asociados al transporte.
- Se reduce el encogimiento y la hinchazón durante la vida útil de la madera.
- La madera correctamente secada es más fácil de ensamblar y de cortar en dimensiones precisas.
- Fisuras, marcas, colapsos, deformaciones y otros efectos dañinos pueden ser virtualmente eliminados.
- La madera debe encontrarse relativamente seca antes de que pueda ser pegada o tratada con preservativos u otros químicos como retardantes de combustión.
- El secado incrementa la aislación térmica de la madera.
- La madera que ha sido secada desde un 50% a un 25% aumenta su poder calorífico en al menos un 50% (Burgos, 2011).
- La madera reduce drásticamente las emisiones de material particulado dañino para la salud humana que genera su combustión si se le retira el agua que contiene (Schiappacasse, 2011).

El secado, que provoca inevitablemente encogimientos anisotrópicos en la madera, interactúa con distintas propiedades de la madera y de variadas maneras. En consecuencia, el objetivo del secado es reconocer estas interacciones mediante la elección de las condiciones a las que ocurre el proceso para así proporcionar madera seca de acuerdo a las características que demanda su uso final.

### 3.4 Transporte radiativo en una superficie.

Cualquier superficie que apunte al sol será provista de energía en forma de radiación electromagnética. En particular, la energía necesaria para el secado de productos agrícolas y forestales puede obtenerse al menos en parte desde la abundante, no contaminante y renovable radiación solar. Adicionalmente, la imposibilidad de monopolización de esta energía y su omnipresencia en la superficie de la tierra permiten diseñar sistemas de secado para lugares remotamente ubicados y/o de bajos recursos. Al mismo tiempo, el utilizar radiación solar para el secado de productos de valor agregado implica la superación de numerosas dificultades. El problema fundamental de la noche ha dado cabida a la idea de almacenar parte de la energía obtenida durante periodos de alta radiación. Incluso los periodos de radiación pueden generar problemas. En primer lugar, la intensidad de la radiación incidente es una función del tiempo. En segundo lugar, la radiación solar se caracteriza por tener una baja densidad de energía (Imre, 2006), por lo que se requieren artefactos de gran área que sean capaces de coleccionar la energía incidente (colectores).

En resumen, la naturaleza de la radiación solar exige medios para enfrentar sus desventajas innatas: almacenadores de energía, fuentes auxiliares de energía, sistemas de control, colectores de gran área, entre otros. La inclusión de estos medios acarrea costos de operación y de capital que deben tenerse en cuenta si se decide invertir en un secador solar.

La Figura 20 muestra un rayo de luz solar  $q_{in}$  incidiendo sobre una superficie con un cierto ángulo de entrada. La intensidad de energía que transporta  $q_{in}$  (medida en  $[W/m^2]$ ), al momento de impactar la superficie, es en parte reflejada ( $q_{rf}$ ), en parte transmitida ( $q_{tr}$ ) y en parte absorbida ( $q_{ab}$ ). La fracción absorbida eleva la temperatura de la superficie, calentándola. A su vez, parte de este calor es utilizado en evaporar la humedad contenida en la superficie ( $q_{ev}$ ), otra parte calienta por convección al aire circundante ( $q_{cv}$ ) y el resto es emitido por la superficie como radiación de baja frecuencia a la atmósfera ( $q_{bf}$ ).

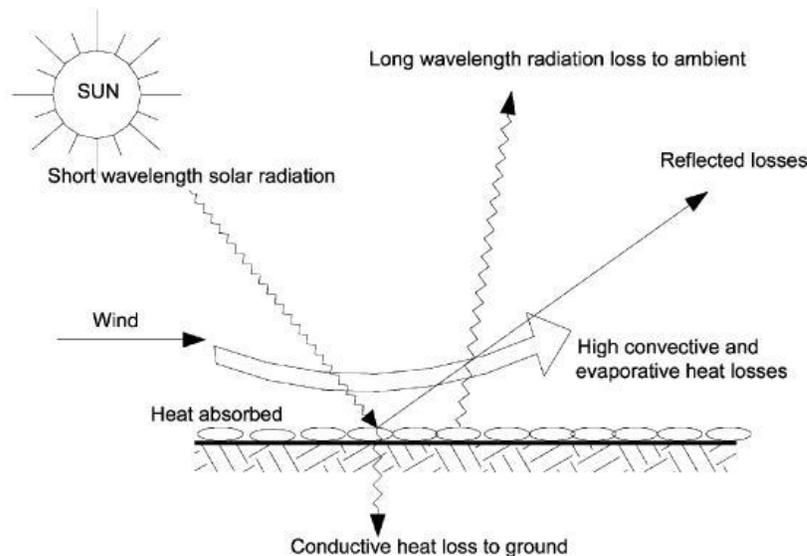


Figura 20: Descomposición de un rayo de luz incidente en una superficie con un cierto ángulo de entrada. Fuente: Jain y Tiwari, 2003.

La ecuación que resume el párrafo anterior es:

$$q_{in} = q_{tr} + q_{rf} + q_{ab} + q_{bf} + q_{ev} + q_{cv} \quad (3.1)$$

En función del material a partir del cual se fabrique la superficie, los términos del lado derecho de la ecuación 1 pueden maximizarse (es decir, acercarse al valor de  $q_{in}$ ) o minimizarse (cerca de cero). Coeficientes de absorción (o atenuación), emisión y reflexión permiten cuantificar estas propiedades y clasificar a las superficies como opacas, transparentes, absorbentes, traslúcidas, etc. Además del material, el color puede ser igual o incluso más importante en cumplir la misión para la cual se diseña la superficie, especialmente si se trata de alguna componente de un colector en el contexto del secado de madera. Más información sobre este tema puede encontrarse en la sección 5.7.

## 4. Tipos de secadores.

En este capítulo se presenta el estado del arte de los secadores utilizados para el secado de tablas de madera junto con estimaciones preliminares del costo de inversión y de operación que cada uno demanda. Los secadores solares son analizados con mayor detalle pues, como se apreciará más adelante, aparecen como los mejores candidatos para utilizarse en el proyecto. Al término del capítulo se plantean los criterios de elección de un tipo de secador junto con los indicadores cuantitativos que los acompañan.

### 4.1 Secado al aire libre o natural.

Para secar madera al aire libre, una vez que esta es cortada, las tablas son ordenadas en capas y amontonadas en unidades de empaque las cuales a su vez se pueden disponer en pilas (ver Figura 21). La disposición de las pilas de madera es tal que el aire atmosférico pueda circular eficientemente a través de estas y así llevarse la humedad que contienen. De incluirse uno o varios techos para proteger las tablas de la intemperie, se deben tener al menos un par de lados opuestos abiertos para que así no se opongan a la libre circulación del flujo de aire.

La circulación de viento (energía eólica) y la radiación solar permiten secar madera sin necesidad de incurrir en equipos y/o maquinaria, aun cuando la duración del secado y el escaso control pueden dificultar el proceso. No obstante, mediante un diseño apropiado del patio y los empaques, el secado natural puede responder adecuadamente a los requerimientos de secado de numerosas especies.



**Figura 21:** Patio de secado natural de tablas empacadas en pilas. Pueden distinguirse claramente los pasillos dispuestos para la circulación del aire.

Las limitaciones del secado por aire han llevado al uso creciente de tecnología para reducir el tiempo de secado y además introducir un cierto control en el proceso. El secado artificial responde a esta demanda e incluye cualquier tipo de secador que posea equipos y/o maquinarias, es decir, que posea

directa intervención humana durante la duración del proceso de secado. A continuación se detallan las distintas categorías de secados artificiales.

## **4.2 Secado acelerado por aire.**

El secado acelerado por aire involucra el uso de ventiladores para generar una convección forzada de aire a través de las pilas de tablas. Estas últimas pueden encontrarse bajo cobertizos o dentro de recintos cerrados, razón por la cual este método de secado no es necesariamente al aire libre, sino tan solo por aire.

## **4.3 Secado convectivo en horno.**

En el secado convectivo en horno, el proceso se realiza en una cámara cerrada provista de diversos equipos, materiales y condiciones específicas destinadas a incrementar significativamente la tasa de secado. Para controlar el gradiente de humedad y estrés sufrido por la madera, se programa detalladamente el funcionamiento del horno para así controlar principalmente tres variables: humedad relativa del aire (o depresión de bulbo húmedo), temperatura y velocidad del aire (Boone et al, 1998). La recién mencionada programación tiene impacto tanto en variables de diseño como de operación, como la circulación del aire y las fuentes de calor.

Si bien la configuración de un horno de secado de madera varía entre fabricantes, posee características prácticamente universales. Esencialmente un horno de secado de madera consiste en una cámara con ventiladores posicionados en su sección superior para la circulación de aire y bobinas calentadoras para mantener el aire, y por ende la madera, a una temperatura deseada. La humedad del aire es controlada mediante la apertura de respiraderos en el techo del horno que al dejar entrar aire húmedo modifica la humedad relativa de todo el sistema cerrado al mezclarse con el aire encerrado dentro del horno.

A pesar de que muchos hornos son operados por lotes para facilitar el control de las condiciones de secado, y que usualmente cambian a medida que avanza el proceso, un horno también puede trabajar continuamente si la madera es cargada en carros que se mueven lentamente a través de la cámara. Para este último caso, la programación del secado se hace en función del largo de la cámara. La Figura 22 muestra un diagrama clásico de un horno de secado por lotes.

Usualmente los costos tanto fijos como operacionales de los hornos son altos. En consecuencia, sólo maderas de alto valor agregado que requieran una minimización de los defectos causados por el encogimiento son secadas por hornos.

El secado en hornos puede a su vez dividirse en dos categorías diferentes que ya fueron descritas en la sección 3.1:

- I. Secado convencional, también conocido como secado convectivo a baja temperatura. Las temperaturas de operación son menores a 80-90 [°C].
- II. Secado ACT, de las siglas en inglés para secado convectivo acelerado de alta temperatura. Las temperaturas de operación son cercanas o superiores al punto de ebullición del agua.

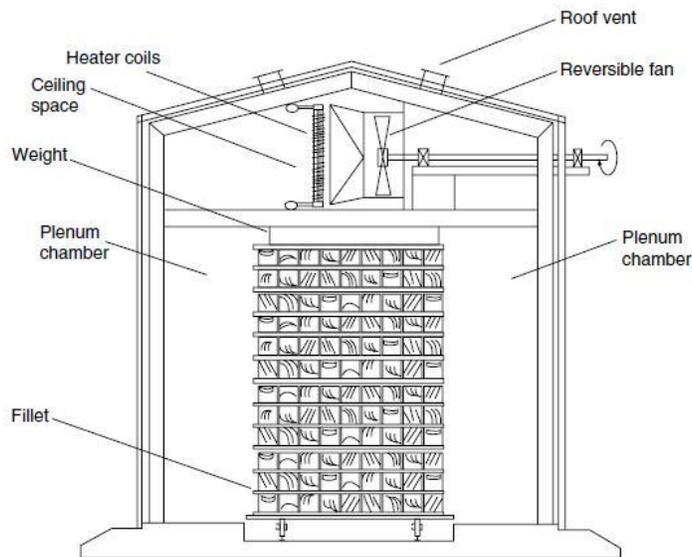


Figura 22: Diagrama de la sección transversal de un horno cuadrado de una sola pista. Nótese la separación existente entre la cámara de carga (*plenum chamber*) y la cobertura superior (*ceiling space*) en donde se encuentran los artefactos de control de las condiciones de secado. Fuente: Keey et al., 2000.

#### 4.4 Secado al vacío.

A raíz de la drástica mejora de la migración interna de humedad bajo condiciones cercanas al vacío, particularmente bajo las 0,3 [atm] (ver Anexo G), la tasa de secado puede ser tan grande como la de una temperatura mucho más alta a presión atmosférica. Esto es especialmente útil para secar maderas duras de alta calidad que son fácilmente dañadas por temperaturas moderadamente altas (Hilderbrand, 1989).

Sin embargo, el alto volumen específico del aire y el vapor asociado a la presión reducida es una seria limitación para el transporte de calor convectivo (Perré y Keey, 2006). Las soluciones para este problema van desde separar los hornos en periodos alternados de presión atmosférica y presión reducida hasta utilizar velocidades de aire superiores a los 10 [m/s] para compensar la pérdida de capacidad termal del aire.

Hilderbrand (1989) reporta que el tiempo de secado comercial en hornos al vacío varía entre la mitad y un tercio del tiempo propio del secado en hornos convencionales que funcionan a presión atmosférica.

## 4.5 Deshumidificadores.

Un horno deshumidificador enfría el aire húmedo hasta su punto de rocío una vez que este ha atravesado las tablas de madera. A medida que la humedad es retirada como líquido condensado en vez de vapor en aire tibio como en los hornos convectivos, la diferencia de calor entre los dos casos, correspondiente al calor latente de condensación, es reciclada.

En su gran mayoría, los hornos deshumidificadores cuentan con una bomba de calor de ciclo de Rankine (Perré y Keey, 2006) compuesta por un evaporador en serie con un condensador, tal y como se muestra en la Figura 23. Normalmente el condensador se encuentra asociado a un compresor externo y el evaporador es precedido por una válvula de expansión. Además de estos elementos básicos, Davis (2001), entre otros trabajos, contempla la incorporación de un acumulador que evite la entrada de refrigerante dentro del compresor y un intercambiador de calor adicional que actúe como sub-enfriador para que mejore la efectividad total de la bomba de calor.

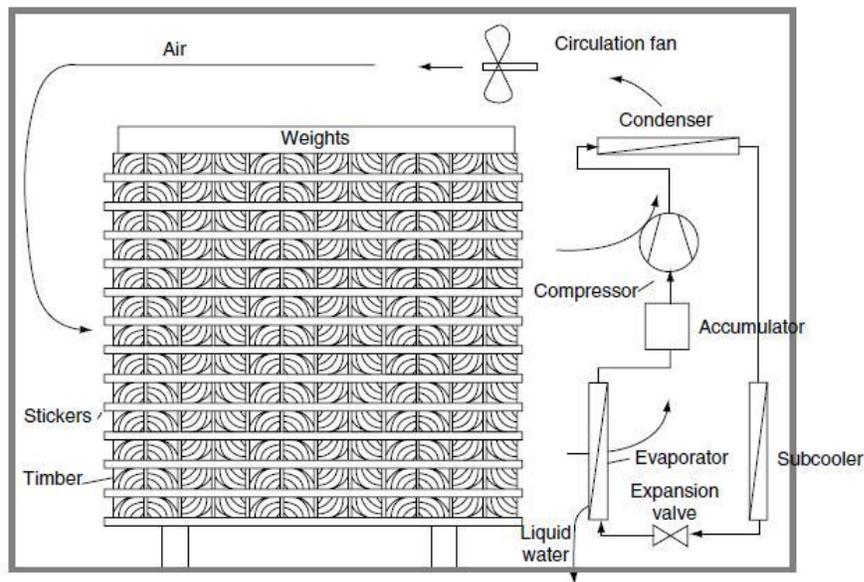


Figura 23: Configuración típica de un deshumidificador por bomba de calor. Fuente: Davis, 2001.

Para medir el desempeño de los deshumidificadores se suele utilizar un indicador conocido como tasa específica de extracción de humedad, abreviado SMER por sus siglas en inglés. El SMER es un cociente que relaciona la masa de humedad removida desde la madera por unidad de energía que consume el deshumidificador. De acuerdo a Davis (2001), los hornos convectivos, sean convencionales o ACT, no obtienen un SMER superior a los 0,9 [kg/kWh], mientras que los deshumidificadores comerciales obtienen un SMER en el rango de los 1,5 a 2,5 [kg/kWh], con la salvedad de que el mismo autor indica que los valores más bajos reflejan un aislamiento deficiente de los deshumidificadores.

Un deshumidificador resulta particularmente atractivo para maderas de alta calidad y dureza, pues debido a las relativamente bajas temperaturas de operación el color de la madera permanece prácticamente inalterado mientras que las fisuras son menores en comparación a otros hornos (Perré y Keey, 2006).

## 4.6 Secado eléctrico de alta frecuencia.

La utilización de altas frecuencias para secar aprovecha el hecho de que el calor existente en las tablas de madera se genera internamente si las ondas incidentes en el material transportan la suficiente energía como para excitar las moléculas de agua. Es decir, en este tipo de secado el calor se genera por la rotación dipolar de las partículas de humedad que buscan orientarse en el campo eléctrico aplicado en vez de que se le entregue directamente calor al material por el impacto convectivo de aire. Las fibras de madera se muestran relativamente insensibles a las ondas de altas frecuencias pues la constante dieléctrica del agua es mayor en más de un orden de magnitud que aquella de los materiales compuestos por madera.

El gran atractivo del secado eléctrico de alta frecuencia es la uniformidad de la humedad que se obtiene en el producto final, tanto entre distintas tablas como en distintas zonas dentro de una misma tabla. Sin embargo, las grandes presiones que aparecen en el interior de las tablas pueden fácilmente crear daños importantes en el producto final, por lo que el secado eléctrico de alta frecuencia suele utilizarse en conjunto con el secado al vacío. Adicionalmente, el secado eléctrico de alta frecuencia ofrece una solución al problema del deficiente calentamiento por convección propio del secado al vacío. Así, el secado al vacío y el secado eléctrico de alta frecuencia combinados actúan de manera eficiente y se han establecido como una técnica atractiva para maderas de haya y roble en el mercado europeo por la preservación de su color natural (Perré y Keey, 2006).

En términos económicos, Schiffmann (2006) indica que los secadores eléctricos de alta frecuencia son atractivos si la tasa de secado es al menos cuatro veces superior a la de los secadores convencionales. En el caso de algunos accesorios de la industria de muebles, el autor indica que el secado se reduce desde semanas o días para secadores convencionales a tan sólo horas sin presentar encogimientos problemáticos.

## 4.7 Secado solar.

Los secadores solares se presentan en una enorme diversidad de configuraciones que dificultan su comparación. Sin embargo, todo secador solar cuenta con al menos tres partes principales:

- I. Una unidad de secado en la cual el material a ser secado es insertado y en donde ocurre el proceso de secado.
- II. Un colector para transformar la radiación solar en calor. El colector cuenta con al menos dos partes: una cubierta que busca transmitir la radiación solar, no reflejarla y además evitar que el calor escape de su interior y un absorbedor cuya función es capturar la energía ultravioleta y transmitir, emitir y reflejar la menor cantidad posible de esta.
- III. Equipamiento para la transferencia de energía desde el colector hacia el material.

Un secador solar puede además contar con otras partes: una fuente de energía auxiliar, una unidad de almacenamiento de calor, unidades de control, sistemas de tubería, entre otros.

En base a las tres componentes principales recién mencionadas es posible proponer distintas clasificaciones de los secadores solares. Agrupar los secadores solares facilita su estudio por lo que a continuación se presentan distintas clasificaciones. A partir de ahora la utilización de la palabra “material” se utiliza indistintamente para describir al material de interés o el material a secar por el equipo.

#### 4.7.1 Clasificación en base a las fuentes de energía.

Imre (2006) clasifica los secadores en tres grupos en función de las fuentes de energía que utilizan para llevar a cabo el proceso de secado:

- i. **Secadores solares naturales:** Utilizan sólo la energía del ambiente, es decir, la radiación solar.
- ii. **Secadores solares semi-artificiales:** Se añaden ventiladores dependientes de motores eléctricos para mantener un flujo de aire continuo.
- iii. **Secadores artificiales solarmente-asistidos:** Presentan la opción de operar tanto con la radiación solar como con otras fuentes convencionales de energía de ser necesario.

##### 4.7.1.1 Secadores solares naturales.

Aun cuando la inmensa mayoría de los secadores solares naturales funcionan por convección natural, es igualmente posible que posean ventiladores alimentados de energía por celdas fotovoltaicas o una turbina de viento.

Los secadores solares naturales más simples son aquellos tipo gabinete, como el que se muestra en la Figura 24.A. Su característica principal es que el calor llega al material por radiación directa, la cual atraviesa una pared transparente 1. Las demás paredes del secador son aislantes opacos. El material por secar 2 está esparcido sobre una delgada capa 3 con su porción inferior agujereada para permitir el paso del aire. El diseño es simple y los costos bajos. Es recomendable para pequeñas cantidades (no más de 25 [kg]) de material granulado, especialmente productos agrícolas.

Variaciones del secador tipo gabinete son el secador tipo tienda (Figura 24.B) y el secador tipo terraza (Figura 24.C). Ambos permiten cargas mayores que el secador tipo gabinete y son ampliamente utilizadas en la industria del café: En Colombia el 70% de los granos de café son secados en hornos tipo tienda o terraza (Sunworld, 1980). Existen distintas configuraciones de paredes opacas y transparentes posibles, además el secador tipo terraza permite remover el techo para que el material sea impactado directamente por la radiación solar en días despejados.

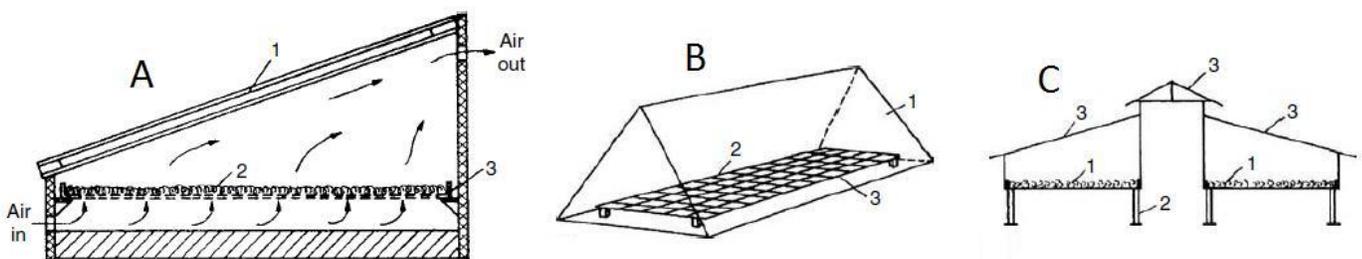
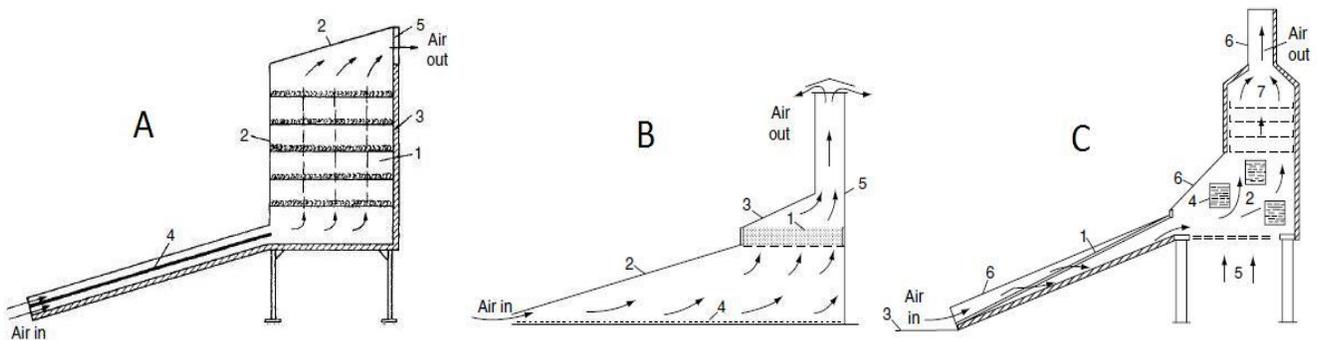


Figura 24: Secador tipo gabinete (A) y sus variaciones: secador tipo tienda (B) y secador tipo terraza (C). Fuente: Sunworld, 1980.

La capacidad por unidad de área de los secadores tipo gabinete (y sus variaciones) se encuentra limitada por dos problemas principales. Por un lado necesitan que el material sea directamente irradiado y por otro autorizan flujos de aire insuficientes como para ampliar la carga.

Para secar mayores cantidades de material hay que aumentar el área útil de los secadores solares naturales. La opción más simple y efectiva es introducir múltiples capas independientes en serie. También es posible utilizar un lecho de material de mayor grosor. No obstante, el aire tendrá mayores dificultades para circular a través de la o las capas. Para mantener una diferencia de presiones adecuada sin necesidad de ventiladores suele explotarse el efecto chimenea, lo que obliga a incrementar el flujo vertical de aire caliente con una estructura empinada.

La Figura 25.A muestra un esquema del secador tipo estantería que incorpora las mejoras anteriormente mencionadas. El material a secar es depositado sobre estanterías perforadas 1 una arriba de la otra. El aire ambiente es calentado en un colector de placa plana 4 que se encuentra conectado a la parte inferior de la unidad de secado, desde la cual el aire caliente fluye hasta la salida 5. El efecto chimenea en el secador tipo estantería se incrementa gracias a la altura de la unidad de secado (alrededor de 1 [m]). Medidas tomadas a partir de experimentos realizados en Tailandia durante un periodo de 5 años indican que los mejores resultados se obtuvieron con una placa absorbadora rodeada de vidrio como colector. El costo de la energía producida radiativamente y utilizada en el secado fue de 0,03 [US\$/kWh] (Wibulswas y Niyomkarn, 1980). El secador solar tipo estantería se desempeña mejor si el material a secar son frutas y/o vegetales (Selcuk et al., 1974).



**Figura 25:** (A): Secador solar tipo estantería con colector separado de la unidad de secado. (B): Secador solar de lecho estático con chimenea (C): Secador solar con almacenamiento de energía de bandejas con chimenea. Fuente: Wibulswas y Niyomkarn (1980), Sunworld (1980) y Puiggali y Lara (1982) para cada una de las tres figuras respectivas.

Para secar grandes cantidades de material, el flujo de aire que atraviesa el secador debe aumentarse. Para el caso de los secadores solares de lecho estático como el mostrado en la Figura 25.B, una chimenea apropiadamente alta debe construirse. El secador de la Figura 25.B reportado en Sunworld (1980) fue diseñado y construido para tener una capacidad de 1 [ton] de arroz por lote. El arroz forma una capa de 10 [cm] de grosor en forma de lecho estático 1. El colector consiste en un cobertor plástico 2 y una costra de arroz quemado 4 que cumple el rol de absorbador. La chimenea 5, de 5 [m] de altura, tiene paredes internas hechas de plástico negro. La base del secador está compuesta de madera y alambre por lo que su manufactura es simple y poco costosa. El aire necesario para secar un metro cúbico de arroz es de 5,7 [m<sup>3</sup>/min]. El secado no es uniforme por lo que el arroz en el lecho estático debe ser girado regularmente. El colector estudiado en Sunworld (1980) tenía 23 [m<sup>2</sup>] de

superficie y para una irradiación diaria promedio de 15 [MJ/m<sup>2</sup>], el secado demoró entre 3 y 4 días. Imre (2006) indica que como regla general la superficie del colector solar debe ser tres veces la superficie del lecho.

Los secadores solares naturales también pueden incluir unidades de almacenamiento de energía. La Figura 25.C muestra un secador denominado por Puiggali y Lara (1982) como secador solar de bandejas con chimenea con almacenamiento de energía. El aire ingresa al colector cubierto por plástico 1 y atraviesa el espacio de almacenamiento de energía 2. Estanques llenos de agua 4 acumulan calor. Durante la noche, el aire ambiente entra por aperturas 5 que se encuentran en el piso del espacio de almacenamiento de energía. En el espacio de secado 7, el material es esparcido en bandejas perforadas. Mediciones experimentales indicaron una eficiencia de un 10% en relación a la entrada de energía solar.

#### 4.7.1.2 Secadores solares semi-artificiales.

El efecto chimenea utilizado en algunos secadores solares naturales posee limitaciones. Las estructuras tipo chimeneas son poco costosas siempre y cuando no se incurra en gastos por fundaciones o refuerzos, de lo contrario las ventajas económicas comienzan a menguar. En consecuencia el problema de las cargas tanto internas como externas de aire y/o viento se vuelve restrictivo. Otra desventaja importante de los secadores por convección natural es que el aire que entra al colector fluye a través de la unidad de secado y finalmente está obligado a salir a la atmósfera. A medida que la temperatura del material a secar se acerca a la temperatura de bulbo seco, la energía que el aire capta desde el colector es utilizada en tasas decrecientes para evaporar agua y cantidades crecientes comienzan a perderse.

Muchas variaciones de secadores solares naturales han sido desarrolladas. Un ejemplo de alto desempeño es el secador tipo tienda que incorpora un pequeño ventilador destinado a mantener un flujo de aire permanente junto con flaps contruidos en lugares estratégicos para posibilitar la recirculación de aire y así aumentar la eficiencia termal del equipo. Un prototipo de Özisik et al. (1980) fue utilizado para secar exitosamente 3-4 [ton] de maní (*Arachis hypogaea*), con una unidad de secado en forma de tambor con sus paredes perforadas (que además cumplía el papel de colector).

Una convección forzada es imperativa para contrarrestar la alta resistencia al paso del aire que presentan productos secados en los lechos estáticos. Tales productos son, por ejemplo, granos y forraje. La Figura 26.a muestra un secador tipo horno diseñado específicamente para granos, los cuales son esparcidos en un lecho 1 sobre suelo perforado. Los colectores 2 en este caso son la pared sur (para el hemisferio norte) y el techo del edificio. El aire calentado por los colectores circula a través del ducto 3 a raíz de la acción del ventilador 4 y soplado hacia el lecho por el espacio de distribución 5. El aire húmedo abandona el secador a través de aberturas en los costados. El área del colector es de 4 [m<sup>2</sup>] y la capacidad de carga del secador es de 1 [m<sup>3</sup>]. Imre (2006) reporta que este horno solar para granos consiguió una potencia promedio de largo plazo del colector de 200 [W/m<sup>2</sup>].

La Figura 26.b muestra otro secador solar tipo horno destinado al forraje. El material forma un lecho estático 1. El colector 2 está, al igual que en el horno para granos, ubicado en la pared sur (en el hemisferio norte) y el techo, pero con el aire fluyendo en la dirección opuesta. El ducto colector se ubica en la porción inferior del horno que es alimentada de aire caliente por el ventilador 3. Este puede captar aire exterior directamente por las aberturas 4.

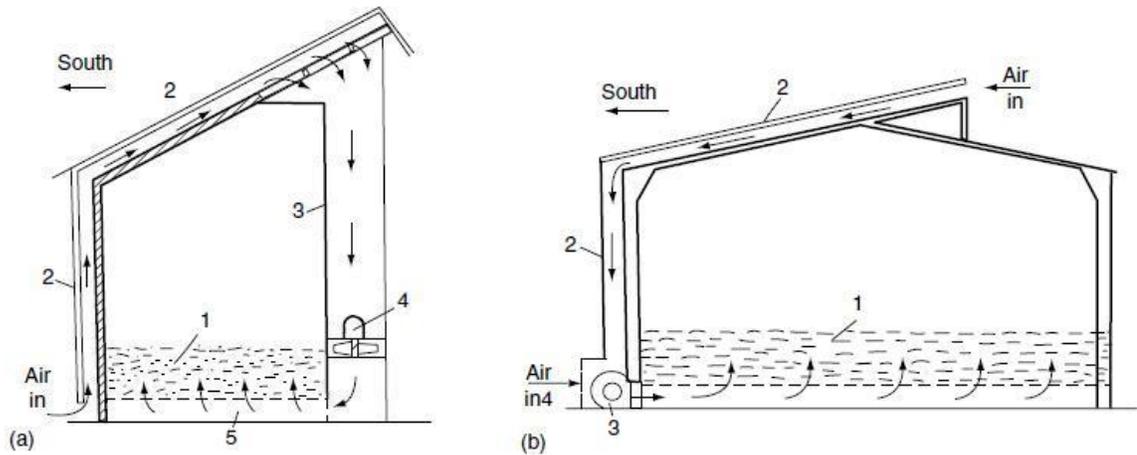


Figura 26: Horno solar para granos (a) y horno solar para forraje (b). Fuente: Wieneke (1980) (a) y Dervedde y Peters (1978) (b).

Para el caso de la madera (u otros productos compactos) ya se han probado secadores solares semi-artificiales tipo horno, como el mostrado en la Figura 27. La madera es dispuesta como empaque 1. La pared norte (para el hemisferio norte) está construida de aislante térmico. El techo 3 y las demás paredes 4 están hechos de placas sintéticas transparentes de doble capa. El secador está construido en una base de concreto 5. La radiación solar que atraviesa las paredes transparentes calienta el absorbedor de aluminio pintado negro 6. El aire es circulado por un ventilador axial 7 y fluye por los dos lados del absorbedor 6, con una fracción que ingresa al empaque por abajo y la otra por el costado. La inclinación del absorbedor 6 es modificable por lo que puede controlarse la cantidad de aire que impacta directamente la madera sin entrar por abajo. La proporción de aire fresco versus recirculado puede variarse con flaps 8.

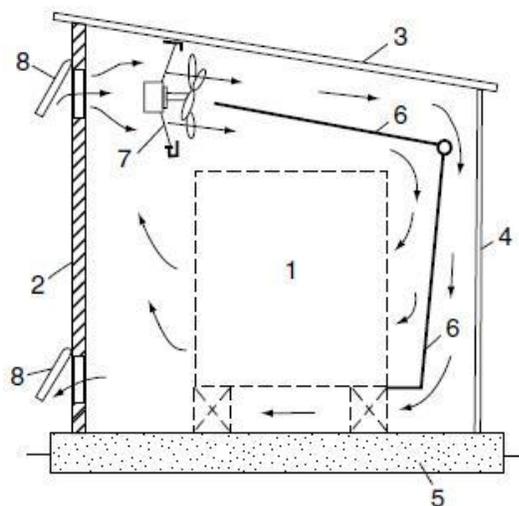


Figura 27: Horno solar para madera. Fuente: CTB, 1978.

Existen secadores solares semi-artificiales con unidades de almacenamiento de energía que otorgan la posibilidad de extender los periodos de secado (particularmente a las noches) y conservar para momentos futuros los excesos de energía propios de los picos de radiación que no pueden

aprovecharse inmediatamente. No obstante, almacenar calor sensible requiere de un medio de alta capacidad calórica. La primera opción, tanto por sus propiedades termodinámicas como por su costo, es el agua. No obstante, los colectores se hacen más costosos, y la necesidad de un intercambiador de calor entre aire y agua también eleva los requerimientos de capital del sistema completo. El análisis técnico-económico de la incorporación de un sistema de almacenamiento de energía en un secador solar debe además tener en cuenta los mayores costos de operación en que se incurre.

La Figura 28.A muestra un secador solar con almacenamiento de agua. El secador es un sistema indirecto. La bomba 2 circula el medio de trabajo de los colectores 1 a lo largo de la tubería 3 y calienta el fluido del tanque de almacenamiento 4. El secado utiliza aire succionado por el ventilador 7. El medio primario del intercambiador de energía 5 es el fluido del tanque 4 movilizado por la bomba 6. Calentamiento adicional del aire puede realizarse con la acción del calentador 8. El material es dispuesto en un lecho estático 9. Mediciones en este equipo han mostrado que 50-60% de la energía necesaria para el proceso de secado puede ser captada del sol (Auer, 1980).

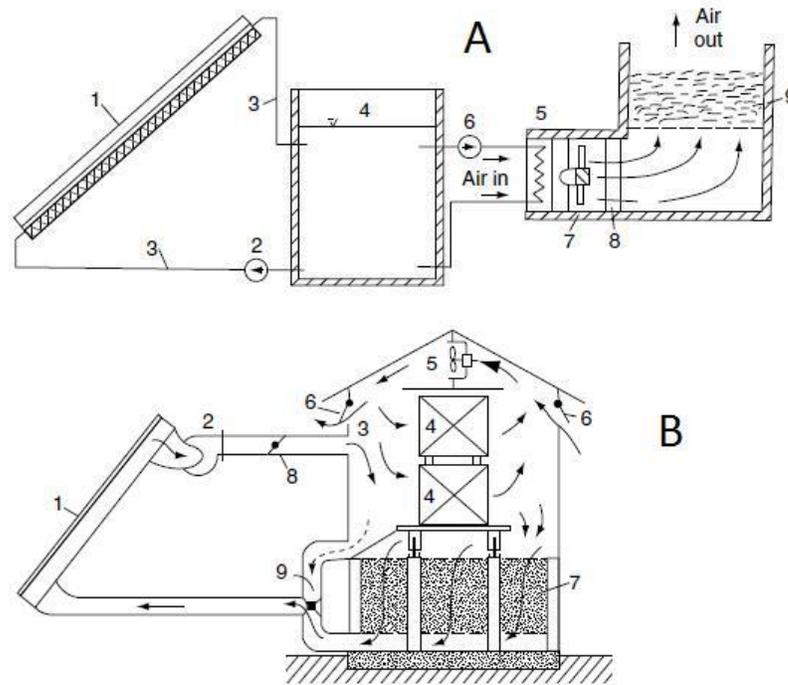


Figura 28: Dos secadores solares semi-artificiales con almacenamiento de energía: (A) mediante agua y secado indirecto, (B) mediante un lecho de rocas y secado directo. Fuente: (A) Auer, 1980. (B) Read et al., 1974.

Utilizar intercambiadores de calor entre fluidos no es la única alternativa para almacenar energía. La Figura 28.B muestra un secador para madera propuesto por Read et al. (1974) con otro material natural, rocas, destinado a la preservación de calor sensible. Los colectores 1 se encuentran en el suelo del secador y tienen un área de 193 [m<sup>2</sup>]. El aire calentado en los colectores es llevado al espacio de secado 3 por un ventilador 2. El secador tiene espacio para un máximo de 6,5 [m<sup>3</sup>] de madera 4. Cercanos al techo se encuentran dos ventiladores que aseguran una circulación continua de aire. Para controlar la proporción de aire externo que ingresa hay aberturas 6 construidas en las paredes. El lecho de rocas 7 es de alrededor de 22 toneladas. La operación de este secador de lecho de rocas distingue tres etapas:

- Un periodo de calentamiento, en el cual el ventilador 2 aumenta su potencia gradualmente junto con la apertura paulatina de una placa de registro. La placa de registro 9 está en la posición marcada con línea punteada en la Figura 28.B. El aire fluye desde el espacio de secado hacia el colector.
- Un periodo de secado y acumulación de calor, en el cual la placa de registro 9 está en la posición mostrada en la Figura 28.B con una línea sólida. El aire fluye desde el espacio de secado hacia el lecho de rocas y de vuelta al colector.
- Un periodo de operación carente de radiación solar, en el que la placa de registro 9 está en una posición media y la placa de registro 6 está controlada por la temperatura de bulbo húmedo en el secador. El aire fluye desde la unidad de secado hacia el lecho de rocas y una vez calentado vuelve nuevamente hacia la unidad de secado.

#### 4.7.1.3 Secadores artificiales solarmente asistidos.

Los secadores artificiales solarmente asistidos utilizan primordialmente fuentes de energía convencionales pero son capaces de captar hasta un cierto grado la radiación solar como energía secadora. Estos secadores solares suelen requerir de inversiones de capital elevadas y además son poco comunes cuando el material a secar es madera (Imre, 2006). En consecuencia, el estudio de los secadores artificiales solarmente asistidos escapa los alcances del presente trabajo. El Anexo I muestra el diagrama de dos secadores artificiales solarmente asistidos. El lector interesado puede dirigirse a los trabajos de Imre (2006), Auer (1980) o Imre et al. (1982) para más información.

#### 4.7.2 Clasificación por unidad de secado con respecto al colector.

Luna et al. (2009) proponen dividir los secadores solares en tres categorías que se diferencian entre sí por la disposición del colector con respecto a la unidad de secado. Los arreglos posibles que identifican son tres (ver Figura 29):

- **Arreglo 1: Secador solar con colector integrado.** La unidad de secado y el colector forman parte de una sola construcción, con el colector siempre dispuesto por sobre la pila de material. Este arreglo es el más antiguo y además el más utilizado pues es compacto y fácil de construir. Los avances tecnológicos han permitido, además de optimizar el colector, mejoras en el flujo de aire al interior del secador a través del posicionamiento tanto de los ventiladores como de la dirección de aspiración, pudiendo distinguirse dos sub-grupos:
  - Uno en donde el aire es succionado desde el colector y descargado hacia la pila, consiguiéndose una mejor distribución de aire en el colector.
  - Uno en donde el aire es succionado desde la pila y descargado hacia el colector, consiguiéndose una mejor distribución de aire en la pila (este se muestra en la Figura 29).
- **Arreglo 2: Secador solar con colector lateral semi-integrado.** La unidad de secado se encuentra separada del colector. El posicionamiento del ventilador y los componentes de interacción varían enormemente entre los diferentes modelos, que a su vez pueden perseguir diferentes objetivos, como mejorar el flujo de aire disminuyendo la pérdida de carga a través del sistema o incluir un bypass al colector para utilizar durante la noche. Algunos trabajos han mostrado que disponer

los ventiladores después de la pila de material en vez de antes reduce el consumo de electricidad (Luna *et al.*, 2009). Construir unidades de calentamiento y de secado separadas representa una potencial ventaja para la optimización de cada una pues los cambios que pueda experimentar una no afecta el desarrollo de la otra.

- **Arreglo 3: Secador solar con unidad de almacenamiento.** Este arreglo comparte las mismas características que el arreglo 3 pero incorpora una unidad de almacenamiento de energía que normalmente consiste en un estanque de agua con un intercambiador de calor para traspasar energía al aire que ingresa a la unidad de secado. Al guardar energía es posible mantener una temperatura virtualmente uniforme en el interior y en consecuencia el proceso de secado puede controlarse con gran precisión. Sin embargo, la inversión inicial para incorporar un colector con ductos internos para el fluido de trabajo, un tanque de almacenamiento y un intercambiador de calor apropiado es considerable.

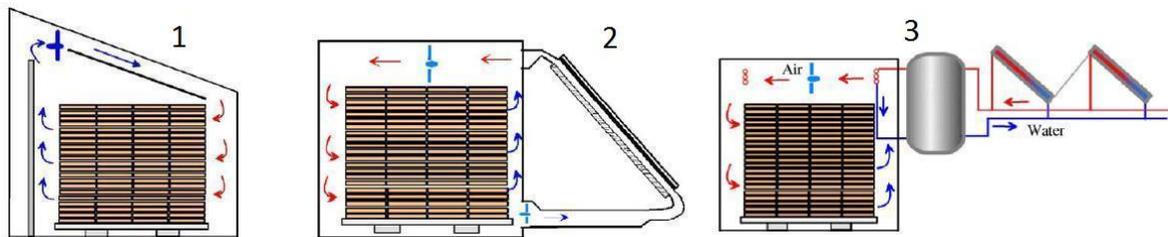


Figura 29: Los tres arreglos de secadores propuestos por Luna et al (2009).

#### 4.7.3 Clasificación por exposición del material a la radiación solar.

Jairaj et al. (2009) dividen a los secadores solares en base a la exposición del material a secar a la radiación solar. De acuerdo a esta clasificación, existen tres tipos de secadores solares:

- **Secadores directos.** El material a secar está expuesto a la radiación solar (junto con radiación reflejada) sin ningún tipo de material adicional destinado a impedir el paso de la energía electromagnética. En consecuencia, secadores solares que presenten una o más cubiertas que separen al material del ambiente caen en esta división, ya que su función no es detener el recorrido de los rayos solares.
- **Secadores indirectos.** El material a secar no recibe el impacto de la radiación solar, sino que es calentado por convección por un fluido que captura energía emitida por un colector. Los secadores indirectos que calientan el material mediante aire pueden sub-dividirse en dos grupos:
  - **De circulación natural.** El aire fluye a través del secador naturalmente por flotabilidad (efecto chimenea) o presión del viento.
  - **De circulación forzada.** El aire fluye a través del secador usando ventiladores y/o bombas motorizadas.
- **Secadores mixtos.** Corresponde a secadores que integran características de secado tanto directo como indirecto del material.

La mayor parte de los secadores reportados por Jairaj et al. (2009) asemejan tanto en su diseño como en sus principios físicos a los secadores presentados en la sección 4.7.1. La excepción la representan algunos secadores indirectos de circulación forzada que se presentan a continuación y que pueden operar con la madera como material.

El secador solar tipo invernadero sin colector individual (SSTI-sci) es una interesante alternativa de horno solar para una gran gama de productos, desde frutas pequeñas hasta grandes tablas de madera. En los SSTI-sci es el aire encerrado en su interior el medio que actúa como colector. La Figura 30.A muestra la sección transversal de un SSTI-sci de 50 [m] de longitud con empaques de material (en la figura, por ejemplo, este consiste en bandejas dispuestas en un cajón de madera) en el centro y de base cuadrada de 2x2 [m]. El aire impulsado por el ventilador y la cubierta plástica forman un sistema colector capaz de incrementar la temperatura dentro del invernadero en hasta 20 [°C] con respecto al exterior (Jairaj et al., 2009). Un film negro dispuesto en el suelo del invernadero optimiza adicionalmente la entrada de radiación solar. El ventilador usualmente se ubica en la parte trasera de los empaques de material. Los precios de las componentes de los secadores tipo invernadero (SSTI) son bajos con respecto a los volúmenes de carga posibles, característica de decisiva importancia para la leña.

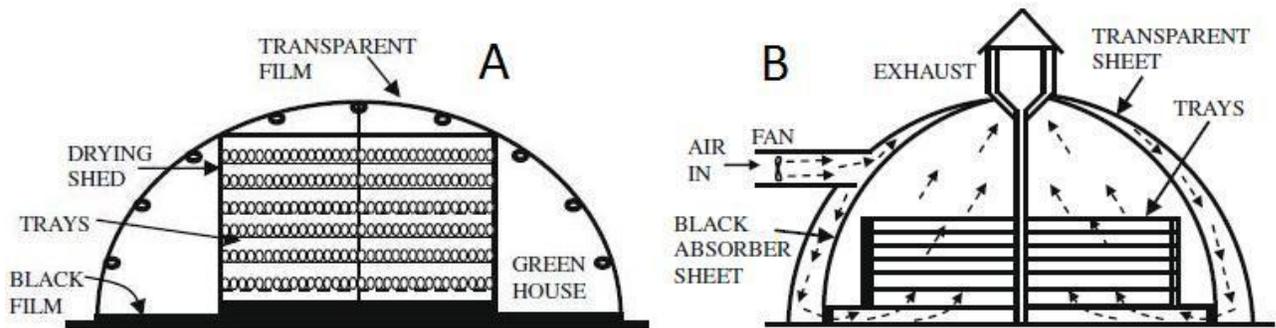


Figura 30: (A) SSTI-sci. (B) Domo geodésico. Fuente: Jairaj et al., 2009.

Un domo geodésico, como aquel mostrado en la Figura 30.B, se construye cubierto por una primera cubierta plástica y luego una segunda cubierta absorbidora. En el interior de esta última, en el centro del domo, se ubican los empaques de material. El aire es circulado por un ventilador y se calienta a medida que circula por entre las cubiertas. El aire caliente ingresa al centro del domo por el suelo, atraviesa el material y abandona el domo por la parte alta ayudado por un leve pero útil efecto chimenea. La ubicación del ventilador es de vital importancia y debe ser tal que cree un patrón de flujo de aire espiral de arriba hacia abajo. Para el caso de la madera como material, el domo geodésico presenta la gran desventaja de no admitir grandes volúmenes de carga en comparación al área total de cubiertas que demanda.

Otra versión de un secador solar tipo invernadero se presenta en la Figura 31. El secador solar tipo invernadero con forma de túnel (SSTI-t) es utilizado para operaciones de gran escala. El calor es generado tanto por la acción de un colector lateral semi-integrado como por absorción directa por parte del material. El colector y la unidad de secado se encuentran en paralelo. Para alcanzar una distribución de aire uniforme a través del secador, se instalan baffles en la sección reversa tal y como se muestra en la Figura 31.B. El secador es de 20 [m] de largo y 2 de ancho. Tanto el colector como la unidad de secado se construyen con una cubierta transparente. Para reducir pérdidas de calor por conducción, un aislante

térmico es adosado a la cara inferior del absorbedor. Un motor de corriente alterna de 100 [W] desplegado en la salida del colector moviliza las aspas de un ventilador radial capaz de mantener el flujo de aire constante a través de todo el equipo aun cuando hay un codo de 180° en el interior del túnel. Para una utilización multipropósito, la inversión inicial del sistema se recupera en máximo 3 años (Lutz et al., 1987).

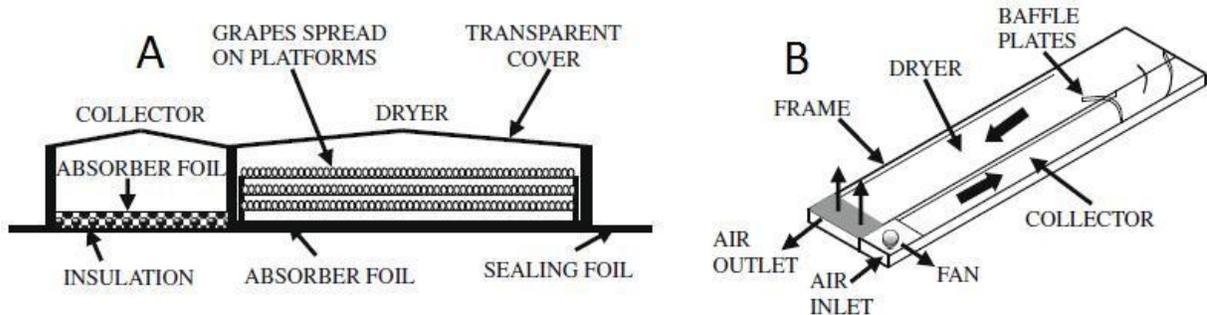


Figura 31: Secador solar tipo invernadero tipo túnel. (A) Vista lateral. (B) Vista aérea. Fuente: Jairaj et al., 2009.

Jairaj et al. (2009) también presentan otro secador tipo invernadero en el cual celdas fotovoltaicas proveen energía para mantener una convección forzada y también calentar termalmente el interior del invernadero. No obstante, la inversión inicial en SSTI con celdas fotovoltaicas es muy alta en comparación a los secadores tipo invernadero que no las poseen.

Clasificaciones adicionales, como aquella de secadores pasivos y activos, pueden encontrarse en la literatura, sin embargo no presentan gran novedad con respecto a los secadores ya presentados en esta sección.

Por la importancia que revisten para el proyecto de memoria, en la siguiente sub-sección se profundiza en el diseño de secadores solares tipo invernadero.

#### 4.7.4 Más sobre los SSTI.

La Figura 32 muestra diseños de cuatro SSTI presentados por Haque y Langrish (2005), siendo todos ellos operados mediante una convección forzada. La Figura 32.a es un SSTI-sci con forma de tienda, que podría considerarse como la versión más simple de los SSTI (más aún si no tuviera una convección forzada).

Las Figura 32.b y c muestran dos diseños alternativos de SSTI de pared inclinada (SSTI-pi). Los SSTI-pi se caracterizan por tener el absorbedor inclinado de manera tal que a la hora del día en que la radiación solar es máxima, la superficie se encuentre perpendicular al impacto del grueso de los rayos solares. De este modo los SSTI-pi pueden capturar una cantidad óptima de energía desde el sol siempre y cuando los grados de inclinación de la pared sean cuidadosamente determinados para la localización geográfica de interés (en el hemisferio sur la pared inclinada enfrente al norte). Es importante que el absorbedor y la cubierta que está sobre él posean la misma inclinación. Imre (2006) y otros autores recomiendan que la pared vertical trasera sea opaca. Otra alternativa menos común es que la pared vertical trasera posea un material reflector inclinado de manera tal que entregue parte de la radiación que le impacta (Sethi y Arora, 2009).

La Figura 32.d muestra un SSTI tipo túnel (SSTI-t). En esta figura puede apreciarse claramente que la estructura de un SSTI-t consta de un techo semi-elíptico conectado a un paralelepípedo. Sólo la pared por donde se realizan las labores de carga y descarga de la madera suele construirse con un material distinto a la cubierta transparente. El volumen de aire encerrado por la cubierta puede actuar como absorbedor, aún cuando también puede haber uno independiente en el techo del SSTI-t.

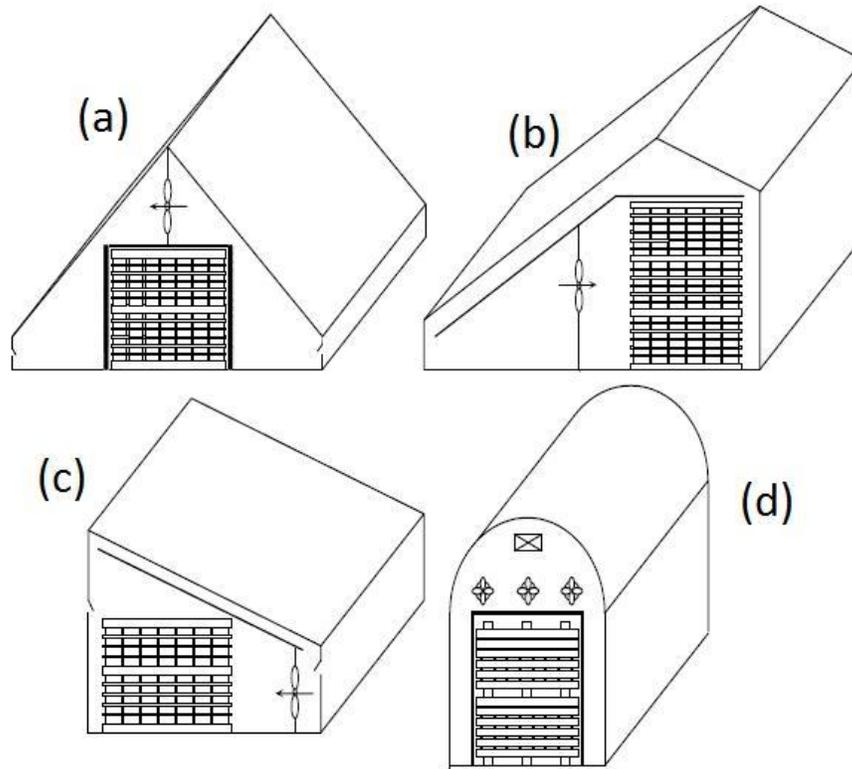


Figura 32: Diseños comunes de SSTI: (a) Tipo tienda. (b) Con pared inclinada y absorbedor de dos caras. (c) Con pared inclinada tipo caja construido por el Queensland Department of Primary Industries (DPI) de Australia. (d) Tipo tunel construido por Western Australia Conservation and Land Management (CALM) de Australia. Fuente: Haque y Langrish, 2005.

Un SSTI con forma de túnel construido en Alemania se muestra en la Figura 33.a. El esquema de la Figura 33.b y la vista transversal de la Figura 33.c permite apreciar que la cubierta de poli-etileno (b) se encuentra sostenida por arcos de acero inoxidable. La altura del túnel es de 2,1 [m], el ancho 4 [m] y la longitud 78 [m]. Su inclinación hacia el sur es de 18°. El suelo del túnel está cubierto con un plástico negro absorbente (b). Un ventilador (v) circula el aire hacia la parte alta del secador. La cámara de secado se encuentra en la parte alta (d) con 9 bandejas dispuesta verticalmente. Si bien este SSTI con forma de túnel se utiliza para frutas y vegetales, es interesante notar tanto la función que cumple el suelo plástico como las dimensiones considerables con las que se construyó (equivalente a más de 600 empaques de 1 [m<sup>3</sup>] de leña ordenados). Por otro lado, destaca también que el terreno escarpado sobre el cual se encuentra el secador permite aprovechar la flotabilidad del aire creando un ducto con circulación optimizada de aire.

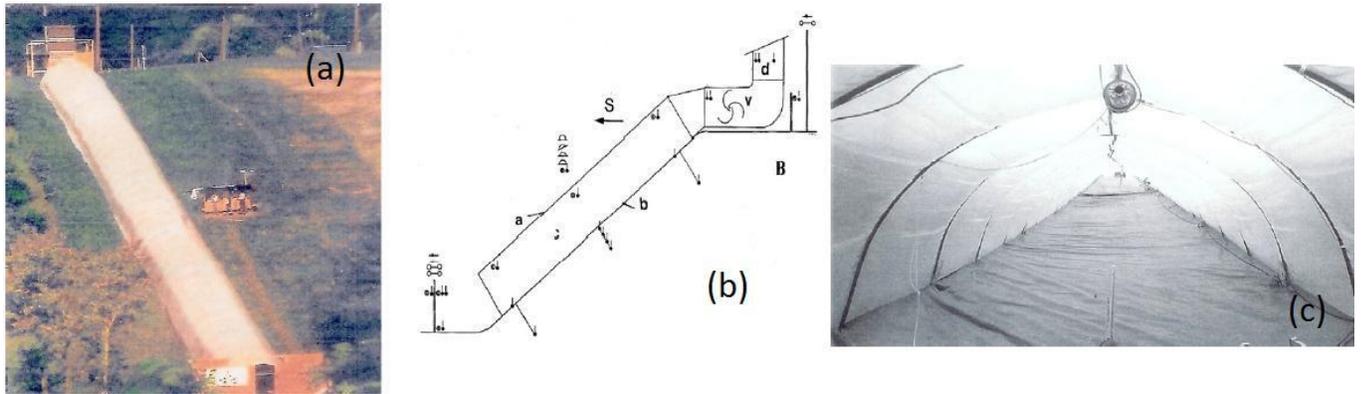


Figura 33: SSI-t con inclinación en dirección sur. (a): Fotografía. (b): Esquema. (c): Vista transversal del interior con el ventilador en el tope de la imagen. Fuente: Belessiotis y Delyannis, 2011.

Otro SSI-t se muestra en la Figura 34.A. El sistema consiste en una cubierta transparente plástica (a) que contiene el túnel de secado (t) hecho también de paredes transparentes. Los lados izquierdo y derecho del túnel (c) están disponibles para funcionar como colectores. Dentro del túnel, carros con el material (e) se mueven manualmente. El equipo cuenta con un sistema que facilita un ciclo continuo de carga-descarga, optimizando así la manipulación del producto. La Figura 34.B muestra una vista lateral esquemática del SSI-t. Aire proveniente de los colectores entra al sistema por debajo de la cubierta (b) y fluye a través de los carros (m), abandonando el sistema por la parte norte (o). Una parte del aire es recirculado (r). Los carros ingresan al túnel por la parte norte (n) y salen por el sur (s).

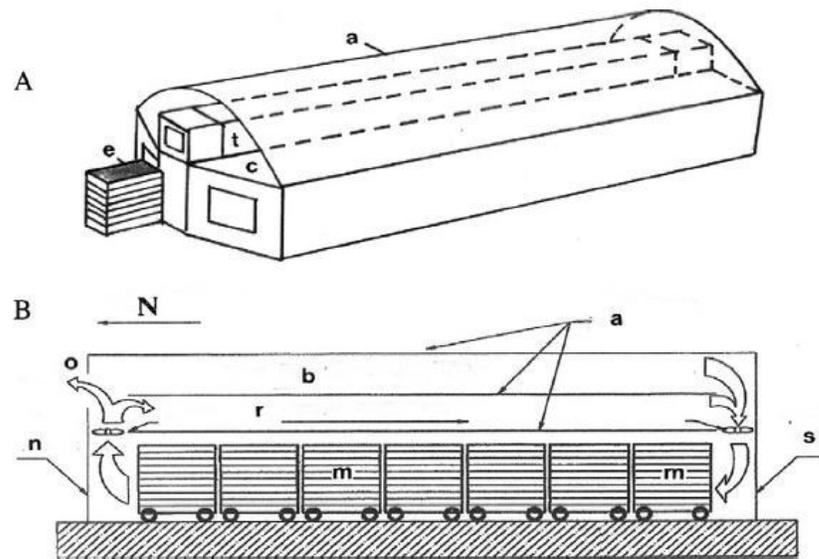


Figura 34: SSI-t industrial. (A) Vista externa. (B) Vista lateral interna. Fuente: Condori et al., 2001.

Experiencias a nivel industrial con SSI para tratar madera existen. La Figura 35 muestra varios SSI-pi de una empresa australiana comerciante de madera elaborada. Dos corridas de colectores ocupan el techo inclinado. El sistema es semi-artificial pues cuenta con fuentes auxiliares de energía en caso de radiación solar insuficiente.

En general, los SSTI-t se utilizan para secar grandes cantidades de material por lo que representan una interesante alternativa para empaques de madera. Belessiotis y Delyannis (2011) indican que los SSTI-t están a punto de estandarizarse lo suficiente como para comercializarse.



Figura 35: Secadores solares de la empresa australiana ASTRA. Fuente: Belessiotis y Delyannis, 2011.

En el Anexo J puede encontrarse una tabla con información general de 31 secadores solares analizados por Wengert y Oliveira (1987), los cuales muestran diagramas y entregan datos tanto cualitativos como cuantitativos interesantes para el diseño específico del SSTI. Si bien una descripción individual de los 31 secadores solares estudiados por Wengert y Oliveira (1987) escapa los alcances de este informe, puede observarse en la tabla del Anexo J que:

- La capacidad de los secadores solares es baja en comparación al volumen de procesamiento esperado por Comercial Primavera.
- La razón entre el área de colector y la capacidad volumétrica ( $\lambda$ ) es un factor importante para evaporar las cantidades deseadas de agua.
- Latitudes mucho más extremas que aquellas de Osorno ( $40^{\circ}\text{S}$ ), como por ejemplo Ontario, Canadá ( $48^{\circ}\text{N}$ ) o Alaska, Estados Unidos ( $60^{\circ}\text{N}$ ), han utilizado con éxito la energía solar para secar madera durante la época estival.
- Los secadores solares pueden alcanzar CH finales considerablemente menores al 20 [%] en tiempos menores a 100 días.

El lector interesado en conocer la variedad de esquemas presentados por Wengert y Oliveira (1987) es invitado a dirigirse directamente a la referencia on-line. Muy buenas ideas de diseño pueden obtenerse.

La relativamente baja cantidad de días despejados en Osorno obliga a diseñar un SSTI capaz de captar la mayor cantidad posible de radiación UV. Si bien los SSTI de pared inclinada permiten maximizar la captación de energía solar, su volumen útil en comparación a un SSTI-t no es del todo satisfactorio. Para solucionar el problema, es viable optar por un SSTI-pi cuya pared inclinada abarque solo la sección superior, similar al mostrado en la Figura 35, con la sección inferior y media en forma de caja.

## 4.8 Aspectos económicos.

Los trabajos de Jara (2006), Lasserre (2002) y Jasen (1989) entregan evaluaciones económicas para proyectos destinados a la elaboración de productos a partir de madera aserrable. Como ya se explicó en el informe de avance 1, la madera aserrable es la que permite crear productos de mayor valor agregado gracias a sus propiedades estéticas y estructurales, especialmente si se trata de madera aserrable de pino radiata. Los secadores contemplados en el diseño de plantas para la industria del aserrío suelen caracterizarse por tres requerimientos clásicos:

- Gran capacidad de procesamiento.
- Tiempos de procesamiento cortos de manera tal que no se transformen en los cuellos de botella de las líneas de producción.
- La tecnología que utilicen debe minimizar la aparición de defectos como fisuras o deformaciones, es decir, debe lidiar con el estrés interno que se genera en las tablas durante la migración de humedad.

Los requerimientos anteriores tienen como implicancia evidente grandes inversiones de capital y en la gran mayoría de los casos también altos costos de operación. La Tabla 17 muestra información general de los hornos convencionales y ACT. Los secadores estudiados por Jara (2006) tienen una capacidad de carga de alrededor de 80 [m<sup>3</sup>/batch], lo que conlleva a que los costos de operación sean de alrededor 1000 [US\$/batch].

Tabla 17: Características de un horno convencional y un horno ACT. Fuente: Elaboración propia a partir de Jara, 2006.

Horno	$v_a$	Potencia térmica	t secado	Costo de operación	Inversión inicial
	[m/s]	[kW/m <sup>3</sup> ]	[hr]	[US\$/m <sup>3</sup> ]	[US\$/horno]
Convencional	2 a 3	8 a 12	80 a 100	10 a 11	285 000
ACT	4 a 6	24 a 36	35 a 50	16 a 18	425 000

La Tabla 17 entrega información de costos de operación para horno convencional, horno ACT y deshumidificador. Este último necesita de una inversión considerablemente menor que los otros hornos pero los costos asociados a su operación son mucho más altos. El deshumidificador también se descarta para el objetivo de secar leña. La inversión inicial necesaria para construir un horno convencional estimada por Jasen (1989) corrobora los valores entregados en la Tabla 17 (información no mostrada).

Lasserre (2002) indica que una planta de aserrío, secado y descortezamiento, que incluye 5 secadores de la compañía austriaca Mühlbock junto con una caldera, implica una inversión inicial de 2 439 195 [US\$]. La producción máxima estimada es de 10 163 [US\$]. Los secadores utilizados son de procesamiento continuo y permiten entregar madera aserrable de humedad de 8% en 60 [hr].

Tabla 18: Costos asociados al procesamiento, en [US\$/m<sup>3</sup>], de pino radiata (madera blanda) y de tepe (*Laureliopsis philippiana*, madera dura). Fuente: Jasen, 1989.

Costo secado [US\$/m <sup>3</sup> ]	Horno Convencional	Horno ACT	Deshumidificador
Pino radiata, $\Delta e = 25$ [mm]	8,2	8,2	21,0
Tepa, $\Delta e = 50$ [mm]	24,0	-	58,3

Por otro lado, los hornos secadores al vacío requieren de inversiones aún mayores que los hornos convectivos pues requieren de compresores adicionales muy costosos.

Smith y Smith (1994) estudiaron el uso de frecuencias de radio en un horno al vacío de 23 [m<sup>3</sup>] de capacidad para madera de alta calidad de roble. Señalan que, en comparación a un horno convencional de idéntica capacidad, los montos de la inversión fueron menores dentro de un mismo orden de magnitud pero se incurrió en mayores costos de energía, recomendándose utilizar los hornos estudiados sólo para pequeñas escalas de producción. Todos estos hornos están diseñados para secar madera aserrable destinada a productos semi-elaborados de mayor procesamiento o productos manufacturados, es decir, productos de alto valor agregado.

Hornos solares como el de la Figura 27 también están diseñados para secar madera aserrable por lo que autorizan cargas limitadas y sus costos de inversión son considerables. No obstante, Haque y Langrish (2005) reportan que secadores solares tipo invernadero capaces de alcanzar un CH final de hasta 12% requieren de una inversión de capital de no más de 25 000 [US\$] para una capacidad de 370 [m<sup>3</sup>/año].

#### 4.9 Indicadores para la elección de un tipo de secador.

Tal y como para la elección de una especie arbórea para comercializar como leña certificada, la elección de un modelo de secador para llevar a cabo el proceso de secado se realiza en base a indicadores porcentuales asociados a características relevantes para Comercial Primavera. Estos son:

**Z<sub>1</sub>**: Tasa de secado de la leña. Ser capaz de llevar las tablas de madera verdes a un CH menor a 25% en el menor periodo de tiempo posible. De esta manera la leña cae dentro de los parámetros admitidos por la certificación y además asegura el secado del producto durante la época templada en Osorno (noviembre-marzo).

**Z<sub>2</sub>**: Capacidad de producción de leña. Tener una capacidad de producción mínima de 2 000 [m<sup>3</sup>/año] de leña.

**Z<sub>3</sub>**: Calidad de la madera. Estar diseñado de manera tal que a mediano o largo plazo pueda ser secada madera destinada a ornamentación y no sólo a leña. Esto conlleva a que el diseño del secador debe estar concebido para que en el futuro se puedan combinar las variables controlables ( $T_{BH}$ ,  $T_{BS}$ ,  $v_a$ ) en el proceso de secado de una forma que no sólo se optimice la tasa de secado sino que también se acondicione el estrés interno que sufren las tablas.

**Z<sub>4</sub>:** Costos. Incurrir en costos asociados a la inversión, mantención y operación lo menor posibles para así ofrecer un producto a precio competitivo con respecto a un mercado de la leña que se caracteriza por su informalidad.

Estimaciones iniciales de la inversión requerida por los hornos convencionales, hornos ACT, deshumidificadores y hornos al vacío muestran montos superiores, como mínimo, a los 75 000 [US\$]. Además, el pequeño valor agregado que posee la leña en comparación a las trozas aserrables que secan los equipos recién mencionados descarta de manera tajante esas alternativas.

En consecuencia, los secadores a ser evaluados mediante los cuatro indicadores de tasa de secado, capacidad, calidad y costos son:

- Secador al aire libre con techo y paredes en dos caras.
- SSTI-sci tipo tienda en donde el aire interno actúa como absorbedor y funciona por convección natural.
- SSTI-pi con convección forzada de aire. Notar que, tal y como se precisó en la sección 4.7.4, el techo inclinado abarca sólo la parte superior del SSTI.

Otros secadores solares que no sean tipo invernadero, y en particular los naturales, presentan la desventaja de admitir cargas considerablemente menores que aquellas requeridas por Comercial Primavera ya que suelen utilizarse para materiales de unidades mucho menos pesadas y volumétricas como frutas, especies, forraje o granos. Al mismo tiempo, secadores solares con colectores complejos (como tubos evacuados) y/o ubicados fuera de la estructura de la unidad de secado inmediatamente incrementan los costos asociados a su construcción y funcionamiento. Gracias al relativamente bajo costo de su cubierta y el sostén de la cubierta y a su simplicidad de diseño, los SSTI pueden admitir volúmenes de madera importantes en su interior sin dificultar financieramente el proyecto. Además, una vez construidos, su operación es sencilla y no requiere de personal con calificaciones especiales.

La utilización de energía solar renovable, limpia y “gratis” aparece como una prometedora iniciativa para reducir drásticamente los costos variables de la planta de secado, especialmente si se tiene en cuenta el alza constante de los combustibles fósiles.

Si bien existen antecedentes exitosos de secadores solares utilizados en zonas sin altas irradiaciones como Nueva York, Estados Unidos (Portal allwoodwork, 2003) e Inglaterra (Belessiotis y Delyannis, 2011), probablemente el problema principal que debe enfrentar un SSTI es el escaso número de días soleados por año en Osorno, por lo que el proceso de secado puede dificultarse incluso en la época veraniega.

La discusión anterior, en conjunto con la información entregada a lo largo de todo el capítulo, permiten cuantificar arbitrariamente los cuatro indicadores de interés. La Tabla 19 entrega el valor de los indicadores de elección para cada uno de los 3 secadores evaluados. Las ponderaciones escogidas se basan en la importancia de los requerimientos que Comercial Primavera determina arbitrariamente.

Tabla 19: Valor porcentual de cada indicador para cada secador considerado.

Indicador	Aire libre	SSTI-sci	SSTI-pi	Ponderación
$Z_1$	25	55	72	25
$Z_2$	75	65	55	20
$Z_3$	5	10	60	10
$Z_4$	90	80	65	30
$Z_{TOT}$	<b>48,8</b>	<b>51,8</b>	<b>54,5</b>	100

## 5. Diseño del SSTI-pi.

En este capítulo se especifican las dimensiones, artefactos y características de los SSTI-pi en base a los cuales se construirá la planta de secado de madera.

### 5.1 Época de realización del proceso de secado.

Con el objetivo de que el secado sea lo más breve posible, lo que implica disminuir el eventual consumo eléctrico de ventiladores que controlan la circulación de aire al interior del SSTI-pi, lo primero que debe especificarse es el periodo del año durante el cual el proceso de secado de madera se lleva a cabo. En la sección 1.5, y en particular en la Tabla 5, ya fue mostrada la distribución mensual de la irradiación recibida en Osorno. Es claro que tener en funcionamiento a los SSTI-pi durante todo el año no sólo sería inadecuado sino que hasta perjudicial debido a que la transferencia de agua sería muy deficiente y el consumo de energía eléctrica podría incluso superar a la energía utilizada en evaporar agua.

La época de realización del proceso de secado se escoge comenzando la segunda quincena de octubre, continuando durante los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y finalizando al término de la primera quincena de marzo. La energía solar acumulada del total del periodo se estima en 2460 [MJ/m<sup>2</sup>] para una superficie horizontal. Eligiéndose una inclinación adecuada del techo de los SSTI-pi debiese ser posible incrementar ese valor.

### 5.2 Estimación de la superficie requerida de colector.

A continuación se presentan las ecuaciones mediante las cuales se estima la superficie requerida de colector para llevar a cabo el proceso de secado con éxito y dentro de los plazos estipulados.

La cantidad de agua que debe retirarse por cada kilogramo de madera seca,  $m_w$ , es:

$$m_w \left[ \frac{kg\ W}{kg\ M} \right] = CHP_0 - CHP_F \quad (5.1)$$

La energía necesaria para evaporar  $m_w$  es:

$$q_{w,mas} \left[ \frac{J}{kg\ M} \right] = m_w \cdot \Delta H_{vap,w} \quad (5.2)$$

Es importante destacar que el calor latente de vaporización del agua debe ser calculado para una temperatura de entre 40 y 50 [°C] (temperatura que se espera alcancen las tablas de madera) y no para el punto de ebullición del agua. La energía necesaria para evaporar un metro cúbico de eucalipto nitens es:

$$q_{w,vol} \left[ \frac{J}{m^3\ M} \right] = m_w \cdot \Delta H_{vap,w} \cdot \rho_{EN} \quad (5.3)$$

La energía necesaria para evaporar la totalidad de la capacidad volumétrica estimada de un SSTI-pi es:

$$Q_w[J] = \frac{m_w \cdot \Delta H_{vap,w} \cdot \rho_{EN} \cdot E}{N} \quad (5.4)$$

Finalmente, la superficie del colector requerida para cada SSTI-pi está dada por:

$$S_{C,req}[m^2] = \frac{Q_w}{I} \quad (5.5)$$

Debe notarse que  $S_{C,req}$  calculado con (5.5) corresponde a la superficie equivalente a tan sólo evaporar el agua contenida en la madera y no contempla, entre otros, el calentamiento que requieren las tablas de madera para transferir la cantidad de humedad deseada y el calentamiento del aire. Es de gran importancia para la eficiencia y efectividad del proceso de secado que la operación de los SSTI-pi autorice el reciclaje del aire ya calentado para aprovechar la energía generada por los colectores.  $S_{C,req}$  debe pensarse como la superficie mínima de colector requerida.

Al comienzo de este capítulo se establece el periodo de duración del proceso de secado y se entrega la irradiación que puede transformarse en calor por el absorbedor. En base a iteraciones de las ecuaciones (5.1) a (5.5), es posible predecir que los valores relativamente altos de radiación solar durante el periodo de secado seleccionado permiten procesar la carga de un SSTI-pi en tan solo 10 semanas, por lo que resulta útil dividir el periodo de secado en dos. La Tabla 20 muestra la irradiación y los meses comprendidos en cada uno de los dos sub-periodos.

Tabla 20: Irradiación, en  $[MJ/m^2]$ , de los dos sub-periodos de secado. Se estima que un sub-periodo es suficiente como para completar la tarea de secado de un SSTI-pi.

Sub-periodo de secado 1			Sub-periodo de secado 2		
$I_{OCT/2}$	$I_{NOV}$	$I_{DIC}$	$I_{ENE}$	$I_{FEB}$	$I_{MAR/2}$
228,1	467,5	560,9	538,3	443,3	220,6
$I_{SP1} = 1\ 256,5 [MJ/m^2]$			$I_{SP2} = 1\ 202,2 [MJ/m^2]$		

Al definirse dos sub-periodos de operación, la superficie requerida de colector debe ser tal que cumpla con secar las cargas del SSTI-pi durante ambos. Por lo tanto la ecuación (5) se transforma en:

$$S_{C,req}[m^2] = \max\left(\frac{Q_w}{I_{SP1}}, \frac{Q_w}{I_{SP2}}\right) \quad (5.6)$$

Cabe repetir que los valores de irradiación de la Tabla 20 se incrementarán a medida que el colector se incline mirando hacia el norte, acercándose lo más posible a  $\theta_{opt}$  (calculado más adelante en la sección 5.4). Además, el presente análisis no contempla los aportes de la irradiación indirecta producto de la dispersión atmosférica de la energía solar y que en gran parte puede ser capturada en función de las dimensiones de los SSTI-pi. Por otra parte, tampoco se considera que una fracción importante de la irradiación será reflejada por la cubierta plástica o re-emitida por el absorbedor como radiación infrarroja. Las anteriores precisiones, que en ningún caso son exhaustivas, buscan ejemplificar las limitaciones de los potenciales resultados.

### 5.3 Modelo matemático de las dimensiones de un SSTI-pi.

A continuación se presenta un simple modelo matemático que describe la organización de los empaques de leña dentro de un SSTI-pi.

Primero que todo debe definirse una variable que indique la cantidad de SSTI-pi en los que se dividirá la planta,  $N$ . La capacidad de producción anual de empaques de la planta,  $E$ , se reparte en estos mediante la siguiente expresión:

$$\{\text{Número de empaques contenidos en cada SSTI} - pi\} = \frac{E}{N} \quad (5.7)$$

Luego debe establecerse una organización arbitraria de los empaques dentro de cada SSTI-pi. Una posibilidad es definir el número de empaques que se pueden visualizar en cortes frontales y longitudinales,  $Fr$  y  $Lg$  respectivamente:

$$\frac{E}{N} = Fr \cdot Lg \quad (5.8)$$

La Figura 36 y la Figura 37 muestran respectivamente esquemas longitudinales y frontales de un SSTI-pi individual. Para efectos de facilitar la carga de los empaques de leña, Comercial Primavera ha establecido que no más de dos empaques deben ser dispuestos en altura uno sobre el otro.

De la Figura 37 se puede desprender la ecuación que entrega el ancho:

$$A = a_e \cdot \frac{Fr}{2} + a_{v,i} \cdot \left( \frac{Fr}{2} + 1 \right) \quad (5.9)$$

Además, se puede observar que la altura está dada por:

$$H = 2 \cdot h_e + h_{v,1} + h_{v,2} + h_{pi} \quad (5.10)$$

La altura de la pared inclinada se puede calcular en base al ancho y el ángulo de inclinación teta:

$$h_{pi} = A \cdot \tan(\theta) \quad (5.11)$$

A su vez, de la Figura 36 se puede desprender la ecuación que describe el largo:

$$L = l_e \cdot \frac{Lg}{2} + l_{v,in} + l_{v,L} + l_{v,i} \cdot \left( \frac{Lg}{2} - 1 \right) \quad (5.12)$$

Por otro lado, el área del absorbedor disponible se puede aproximar como:

$$S_{C,disp} = (Largo - l_{v,in} - l_{v,L}) \cdot \left( \frac{h_{pi}}{\text{sen}(\theta)} \right) \quad (5.13)$$

La superficie del suelo está dada por:

$$Sup(suelo) = A \cdot L \quad (5.14)$$



## 5.4 Determinación del ángulo de inclinación óptimo.

Una manera sencilla y de gran exactitud para calcular el ángulo de inclinación óptimo,  $\theta_{OPT}$ , para que un plano reciba la máxima cantidad de radiación solar posible durante una cierta época del año al mediodía solar, es utilizando la aproximación de Cooper (Ekechukwu y Norton, 1999):

$$\theta_{opt} = \varphi - \text{sen} \left( 360 * \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad (5.17)$$

En donde:

- $n$  es el día del año en calendario juliano.
- $\varphi$  es la latitud del lugar de interés (negativa si es en el hemisferio sur y positiva si es en el hemisferio norte).

Teniendo en cuenta que el periodo de realización del proceso de secado va desde finales de octubre hasta principios de marzo y que además el solsticio de verano representa el día en que el sol alcanza su punto más alto en el cielo (para uno de los dos hemisferios), es decir, que corresponde al día más largo del año y el con potencial mayor radiación, se escoge a  $n$  igual a 355 (21 de diciembre). Además,  $\varphi = -40^\circ$  para Osorno, por lo que la ecuación (11) entrega:

$$\theta_{opt} = -16,5 [^\circ] \quad (5.18)$$

Lo que quiere decir que una superficie plana debe estar inclinada en  $16,5 [^\circ]$  mirando hacia el norte con respecto a la horizontal para obtener, aproximadamente, la mayor cantidad de radiación solar posible durante el periodo de secado.

## 5.5 Diseño del colector y circulación de aire en el SSTI-pi.

Durante el proceso de secado que ocurre en los SSTI-pi es posible identificar tres fenómenos de transporte que, desde el punto de vista de la ingeniería química, es conveniente tratar por separado si se pretenden optimizar, aún cuando los tres se encuentran íntimamente relacionados. Estos tres procesos unitarios son: La captación de la radiación solar por parte del colector, la transferencia de energía entre el colector y el aire y el transporte acoplado entre el aire y la madera. Los dos primeros son llevados a cabo de manera casi exclusiva por el colector, por lo que es conveniente analizar el diseño de sus componentes estudiando la fenomenología involucrada. El transporte acoplado entre el aire y la madera se estudia más adelante en la sección 5.6. Además, la circulación de aire en el SSTI-pi, que afecta directamente a los tres procesos unitarios y en particular las propiedades del colector, es también analizada.

### 5.5.1 Captación de la radiación solar.

Para que la radiación solar pueda ser aprovechada para efectos de remover el agua contenida en la madera, esta debe primero transformarse a calor. La función de transformar la energía solar electromagnética en energía térmica la cumple en general el colector, y en particular el absorbedor.

Los principales factores que afectan la absorción de la radiación solar por parte del colector son (Brenndorfer et al., 1985):

**i) Irradiación recibida.** Evidentemente, mientras mayor sea el nivel de irradiación, mayor será la energía solar absorbida. Si bien la ubicación geográfica es importante, la época del año en la que se realiza el secado también es crucial. Al comienzo de este capítulo ya se determinó el periodo óptimo de secado para Osorno.

**ii) Orientación del colector.** La orientación del colector ya fue determinada anteriormente para las semanas y hora del día de máxima radiación.

**iii) Absorbancia y emitancia del material de la superficie absorbedora y su revestimiento.** La fracción de radiación solar incidente que es absorbida por la superficie, o absorbancia, debe ser lo más alta posible. Si adicionalmente el material presenta una baja emitancia para así evitar pérdidas radiativas por parte de la superficie entonces se habla de superficie selectiva y representan la alternativa ideal. El material absorbedor debe además ser duradero, de buena conductividad termal, accesible, tener un bajo peso por unidad de área y sobre todo, ser barato. La Tabla 21 presenta las absorbancias y emitancias de algunos materiales y revestimientos (o chaquetas) que se utilizan para colectores solares.

**iv) Transmitancia de la cubierta.** Materiales eficientes como cubiertas deben tener una alta transmitancia para la radiación visible y UV y una baja transmitancia para radiación infrarroja. De esta manera la cubierta dejará pasar las ondas de mayor energía y al mismo tiempo retendrá las ondas de menor energía que son re-irradiadas desde el absorbedor. La Tabla 22 muestra la transmitancia, junto a otras propiedades, de varios films potencialmente utilizables como cubierta de colector solar. Otras cualidades deseables de una cubierta es que tenga baja absorbancia, bajo peso por unidad de área, estabilidad a las temperaturas de operación y de estancamiento, durabilidad ante viento y lluvia y un bajo costo. Por último, es posible encontrar bibliografía que sugiere utilizar una doble cubierta para disminuir las pérdidas de energía (Wengert y Oliveira, 1987), sin embargo Ekechukwu (1987) muestra que para colectores que funcionan con  $\Delta T/I < 0,12$ , es decir para procesos de secado como el estudiado, no se incurre en beneficios considerables sino que marginales (ver Anexo K).

Tabla 21: Propiedades de algunos materiales y chaquetas utilizados como absorbentes. Fuente: Brenndorfer et al., 1985.

Coating	Substrate	Absorptivity	Emissivity	Maximum temp.	Durability
Black nickel	Iron, copper, zinc/aluminium	0.85–0.96	0.05–0.15	288°C	medium
Black chrome	Nickel/aluminium copper, iron	0.82–0.96	0.04–0.15	427°C	Very good
Black copper	Copper	0.85–0.95	0.10–0.15	316°C	—
Copper oxide	Copper, iron, aluminium	0.87–0.90	0.08–0.16	—	—
Anodic aluminium	Aluminium	0.90–0.96	0.10–0.23	—	—
Metal carbide	Copper, glass	0.82–0.93	0.02–0.05	—	—
PbS paint	ANY	0.90	0.30	—	—
Selective paint (coralur)	Most	0.93	0.30	—	—
Black paint	Any	0.95–0.97	0.95–0.97	—	—

Tabla 22: Propiedades de algunos materiales utilizables como cubiertas film. Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999.

Material	Thickness available (mm)	Transmittance of visible light <sup>a</sup>	Transmittance of infrared radiation	Weatherability <sup>b</sup>	Ultimate tensile strength (N mm <sup>-2</sup> )	Propagating tear strength (N mm <sup>-1</sup> )	Maximum width (mm)
<b>Commonly available plastic films</b>							
Polyethylene (PE) (u.v.- inhibited)	0.01 upwards	0.86	0.77	Poor	10–30	20–115	12.2
Polypropylene (PP)	0.01–0.25	0.92	No data	Fair	30–275	1–230	3.0
Polyvinyl chloride (PVC)	0.015–0.75	0.90	0.12	Poor	10–70	2–380	2.1
Polyethylene terephthalate (polyester) (PET) e.g. Mylar <sup>TM</sup>	0.002–0.35	0.88	0.24	Very good	140–275	19–115	3.0
Polyvinyl fluoride (PVF) e.g. Tedlar <sup>TM</sup>	0.01–0.1	0.86–0.92	0.33	Very good	50–125	45–390	3.5
Ethylene/tetra-fluoro-ethylene Copolymer (ETFE) e.g. Teflon <sup>TM</sup>	0.05–0.2	0.95	0.20	Very good	50–55	230–350	1.2
<b>Less common films</b>							
Cellulose acetate	0.02–0.75	0.93	0.03	Fair	50–110	1.5–3.9	1.5
Cellulose triacetate	0.05–0.5	0.93	0.11	Good	62–110	1.5–11	1.2
Cellulose acetate butyrate	0.28–0.75	0.93	—	Good	35–60	1.9–3.9	2.5
Ethylene/vinyl acetate copolymer (EVA)	0.02 upwards	—	—	Poor	6–24	20–115	12.2
Ethylene chlorotri-fluoro-ethylene (ECTFE)	0.01–2.2	—	—	Very good	55–70	350–500	1.4
Fluoroethylene propylene (FEP)	0.01–0.75	0.93	—	Very good	17–20	50	1.2
Perfluoro-alkoxy (PFA)	0.01–0.75	—	—	Very good	27–50	15–27	1.2
Polychlorotrifluoro-ethylene (PCTFE)	0.02–0.25	—	—	Very good	34–70	1–15	1.2
Polycarbonate (PC)	0.006–0.35	0.87–0.92	—	Good	55–80	7.5–10	1.4
Polymethyl methacrylate (acrylic) (PMMA) e.g. Plexiglass <sup>TM</sup>	0.05–0.25	0.87	0.01	Good	55–60	No data	2.7
Polystyrene (PS)	0.006–0.5	0.87–0.92	0.35	Fair	55–80	2	1.9
Vinyl chloride/acetate copolymers	0.02–0.75	—	—	Fair	17–55	4–540	2.1
<b>Other materials</b>							
Horticultural glass	3.0	0.90	0.01	Very good	—	—	—
PVC-coated polyester cloth	—	0.10	—	Very good	150	—	—

### 5.5.2 Transferencia de calor entre el colector y el aire.

Antes que todo, es conveniente definir un indicador que permita comparar cuantitativamente la transferencia de calor desde el absorbedor hacia el aire. La definición corriente de la eficiencia  $\eta$  de un colector (Koyuncu (2006), Imre (2006) y Ben Slama (2007), entre otros) es:

$$\eta = \frac{\{\text{Calor del colector utilizado en calentar el aire}\}}{\{\text{Radiación solar incidente en el colector}\}} \quad (5.19)$$

$$\eta = \frac{F_A C_{p,A} (T_{out} - T_{in})}{Sup_C \cdot I_N} \quad (5.20)$$

Para mejorar la tasa de transferencia de calor, todas las alternativas propuestas en la literatura pueden agruparse en dos clases:

- i. Aumentando el área de transferencia entre el absorbedor y el aire.
- ii. Creando turbulencia (incrementar el número de Reynolds) para mejorar el transporte convectivo.

Koyuncu (2006) realiza un estudio comparativo de 6 modelos sencillos y fáciles de construir de colectores solares calentadores de aire (CSA) para un flux de aire de 0,018 [kgs<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>] constante. De su trabajo destaca que una alta temperatura del absorbedor no implica necesariamente que la eficiencia del colector sea mayor. Esto se debe a que, por un lado, la transferencia de energía entre el absorbedor y el aire no depende exclusivamente de la temperatura del absorbedor y, por otro, a que las elevadas

temperaturas del absorbedor generan pérdidas térmicas por radiación. Además, los resultados del autor muestran que cubiertas de doble o triple capa no son más efectivas que cubiertas de una capa para el rango  $\Delta T < 40$  [°C], confirmando así las observaciones de Ekechukwu (1987).

**Tabla 23: Datos generales y resultados principales de los 6 modelos de colectores solares calentadores de aire (CSA) utilizados por Koyuncu (2006).** Las cubiertas plásticas están hechas de polietileno de 0,4 [mm] de grosor, las placas absorbedoras son aluminio pintado negro de 0,4 [mm] de grosor y el aislante es hardboard de 20 [mm]. Fuente: Elaboración propia a partir de Koyuncu, 2006.

Modelo	Número de capas de cubierta plástica	Absorbedor pintado negro	Paso del flujo de aire	$\eta$ [%]	$T_{ABS}$ [°C]
<b>M1</b>	1	Hardboard	Frontal	42,11	55
<b>M2</b>	1	Placa plana	Frontal	45,88	57,5
<b>M3</b>	1	Placa zigzag	Frontal	44,23	56
<b>M4</b>	1	Placa plana	Trasero	39,76	64
<b>M5</b>	1	Placa zigzag	Trasero	39,05	63
<b>M6</b>	2	Placa plana	Trasero	36,94	61

De la Tabla 23 se puede destacar que el modelo de colector 2 es el que entrega una mayor eficiencia y el mayor  $\Delta T$ . Sin embargo, el modelo de colector 3 posee la placa zigzag dispuesta sobre el aislante de manera deficiente, de acuerdo a las imágenes presentadas por Koyuncu (ver Anexo L): las hendiduras, en vez de permitir la circulación de aire a través de ellas, crean pequeñas regiones en donde el aire se deposita.

Otros estudios han mostrado que las corrugaciones en V aumentan considerablemente la eficiencia de los CSA. Karim y Hawlader (2004) comparan tres absorbedores, uno de placa plana, otro de placa con aletas y otro de placa corrugada en V (ángulo de 60°) y encuentran que es este último aquel de mayor eficiencia para distintos pasajes de aire, tal y como lo indica la Tabla 24. Es interesante notar que, a pesar de que las mayores eficiencias obtenidas por estos autores son para el flujo de aire de 0,05 [ $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ], la  $T_{out}$  de aire más alta la obtienen para un flujo de aire de 0,035 [ $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ], lo que muestra que alcanzar altas eficiencias va en detrimento de la obtención de una elevada  $T_{out}$ .

**Tabla 24: Eficiencia, medida en [%], de los tres absorbedores analizados por Karim y Hawlader (2004) para paso individual del aire (valores izquierdos) y para doble paso del aire (valores derechos).** Fuente: Elaboración propia a partir de Karim y Hawlader, 2004.

Flujo de aire [ $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	Placa Plana		Placa con aletas		Placa corrugada-V a 60°	
<b>0,01</b>	27	35	28	41	33	47
<b>0,03</b>	51	58	56	64	60	67
<b>0,05</b>	62	71	65	78	72	80

Karim y Hawlader (2004) plantean la existencia de un compromiso entre el valor de  $T_{out}$  y el de  $\eta$ . Karsli (2007) confirma que  $\eta$  decrece cuando  $\Delta T/I$  aumenta para una gran gama de colectores diferentes. Por lo tanto, la determinación del caudal de aire que atraviesa el colector es muy importante para promover una alta  $\eta$  o una alta  $T_{out}$ , dependiendo de los objetivos que se tengan. Para el caso del

secado de leña, incrementar el valor de  $T_{out}$  es clave para acelerar el proceso mediante el incremento del gradiente de RH entre las tablas de madera y el aire.

Además de los colectores de placas corrugadas o con aletas, se han estudiado otros CSA menos comunes. Özturk y Demirel (2004) estudiaron el desempeño de CSA con su canal empacado, encontrando que los anillos de Raschig representaban la mejor alternativa. Karsli (2007) estudia también un colector con tubos, encontrando que su eficiencia es menor a la alternativa de las aletas. Ben Slama (2007) incorpora deflectores en la estructura de los colectores para aumentar el número de Reynolds y al mismo tiempo mantener el tiempo de residencia del aire en el colector, encontrando que los deflectores transversales que no bloquean todo el pasaje del aire generan las mayores eficiencias.

Adicionalmente a la geometría de los colectores, y en particular de los absorbedores, la circulación del aire a través de estos representa una excelente alternativa para mejorar la eficiencia térmica. La Figura 38 muestra las cuatro configuraciones estudiadas, separadamente, por Wijeyesundera et al. (1982) y Parker et al. (1993).

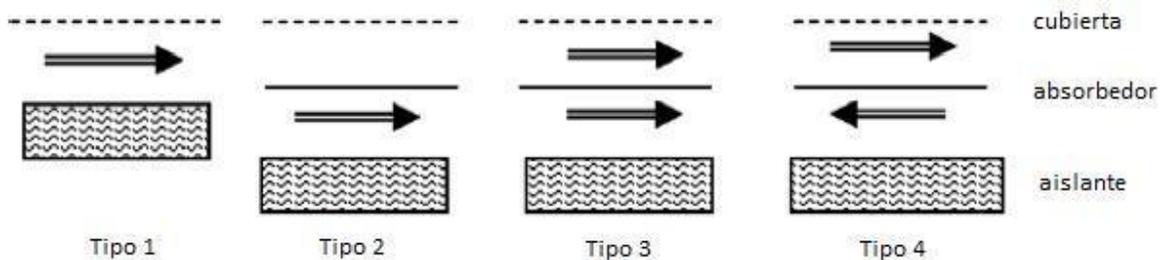


Figura 38: Cuatro configuraciones posibles para la circulación del aire a través del colector. Tipo 1: Paso frontal. El aire pasa por sobre el absorbedor (que está adherido a la superficie frontal del aislante). Tipo 2: Paso trasero. El aire circula bajo el absorbedor. Tipo 3: Paso paralelo. El aire circula simultáneamente por sobre y por bajo el absorbedor. Tipo 4: Paso doble. El aire circula por sobre el absorbedor y luego retorna por bajo el absorbedor. Fuente: Elaboración propia a partir de Parker et al. (1993) y Ben Slama (2007).

Wijeyesundera et al. (1982) comparan el colector tipo 4 con el colector tipo 2 y encuentran que la eficiencia del colector tipo 4 supera en 10-15% la eficiencia del colector tipo 2, aun cuando para  $\Delta T/I_{in}$  de entre 0,05 y 0,06 [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ ] esta diferencia se reduce. Parker et al. (1993) estudian los colectores tipo 1, 2 y 3, todos provistos con absorbedores corrugados en V. Sus resultados muestran que el colector tipo 3 es el más eficiente. La Tabla 24 muestra que las eficiencias de los tres absorbedores estudiados por Karim y Hawlader (2004) se incrementaron para todos los flujos de aire en, como mínimo, un 7%.

En resumen, toda la literatura analizada indica que los diseños 3 y 4 son los que más incrementan  $\eta$ . La teoría predice tal comportamiento ya que estos dos diseños aumentan el área de transferencia de energía mediante el aprovechamiento de las dos caras del absorbedor. El problema adicional que el colector de paso doble presenta con respecto al de paso paralelo es que la salida y la entrada del aire tienden a coincidir espacialmente, por lo que se dificulta la succión de aire en circuitos de circulación cerrados, como es el caso del SSTI-pi. Por esta razón se prefiere el paso de aire tipo 3.

Aun cuando la eficiencia representa un indicador importante para el diseño de un colector, su propia definición implica que se limita a medir el aspecto térmico del equipo. Para usos industriales, el aspecto hidráulico es de vital importancia ya que usualmente el aumento en el área de transferencia y en

especial la creación de turbulencia generan una caída de presión a través del colector que impacta directamente en el consumo energético de los ventiladores. El desempeño hidráulico de un CSA puede medirse tanto mediante la caída de presión,  $\Delta P$ , como mediante su representación adimensional, el factor de fricción  $\phi$ :

$$\phi = \Delta P \frac{D_H}{2\rho L v^2} \quad (5.21)$$

Bhushan y Singh (2010) indican que una sub-capa laminar ubicada en el ducto de un CSA, entre el absorbedor y el aire, es el principal obstáculo a la transferencia de calor. En su exhaustiva recopilación de información sobre rugosidades comúnmente estudiadas, encuentran que las distintas rugosidades en forma de V acarrean los menores aumentos en el factor de fricción en comparación al aumento de eficiencia que generan. Yeh y Ting (1988) encontraron que la razón  $\eta/\Delta P$  es particularmente alta para superficies corrugadas en V y particularmente baja para colectores tipo matriz. Ben Slama (2007) estudia en 3 etapas la influencia de obstáculos a la circulación del aire, o deflectores (o en inglés baffles), dispuestos en la estructura de los colectores: primero, la visualización del flujo de aire (ver Anexo M), segundo la medición de la caída de presión y tercero la determinación de la eficiencia energética. Si bien Ben Slama (2007) compara distintos deflectores, lo hace para un solo modelo de colector, el cual contiene además respiraderos de aire muy ineficientes.

La Figura 39 muestra la caída de presión a través del colector con distintos deflectores estudiados por Ben Slama (2007). Como se observa, las diferencias pueden ser muy importantes e introducir costos por consumo de electricidad altos, aun cuando  $\eta$  se puede incrementar en hasta un 25% con respecto a un colector de placa plana sin deflectores (información no mostrada).

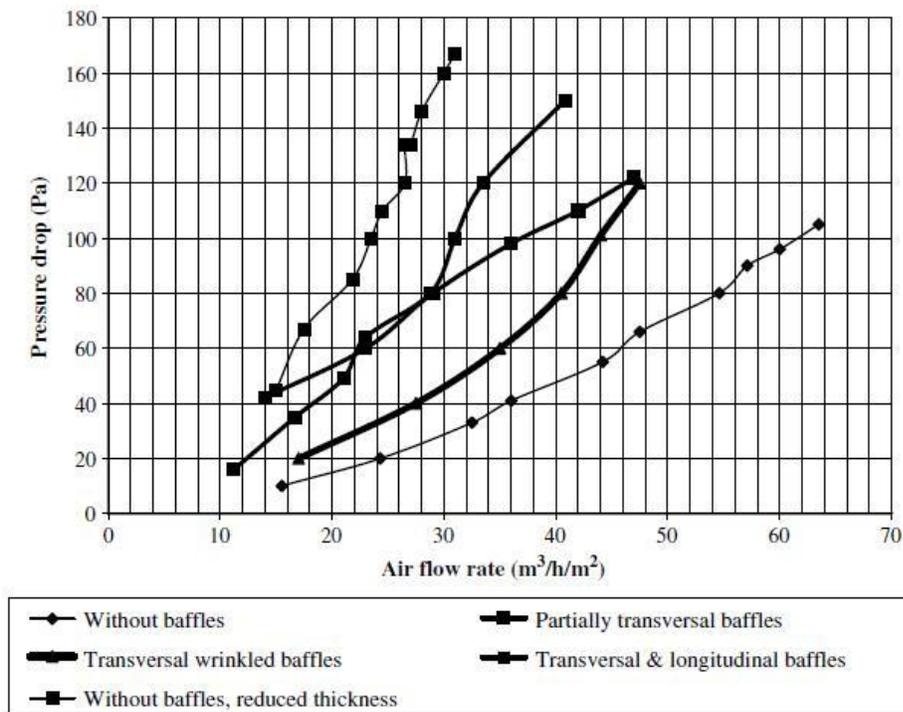


Figura 39: Caída de presión para distintos flujos de aire para los deflectores estudiados por Ben Slama (2007). Fuente: Ben Slama, 2007.

Continuando con la Figura 39, es interesante notar que el colector solar sin deflectores pero de pequeño grosor de canal de aire genera una caída de presión drásticamente mayor en comparación a los demás modelos estudiados. Para el colector sin deflectores, las dimensiones del canal de aire son  $L_c/\Delta e_c = 80$  y  $A_c/\Delta e_c = 40$ . Si bien Ben Slama no entrega el valor del grosor de canal reducido, puede suponerse que las razones anteriores son menores a 20 y 10, respectivamente. A pesar de que grosores muy pequeños del canal de aire generan rápidamente grandes caídas de presión, la eficiencia aumenta cuando el grosor del canal de aire se reduce (Choudhury y Garg, 1999).

Otro aspecto a tener en cuenta en la introducción de deflectores para aumentar la turbulencia del aire es la potencial dificultad que representa su construcción. Por ejemplo, introducir deflectores unidos a lo largo del absorbedor para que actúen como alas es un desafío no despreciable al momento de construir colectores de varios metros cuadrados. Bhushan y Singh (2010) ponen en duda la aplicación industrial de rugosidades e incluso aseveran que puede conducir a un perjuicio económico. Las superficies corrugadas (idealmente en forma de V) aparecen como una alternativa de implementación industrial mucho más viable que los deflectores o las aletas. Además, al modificar el área de transferencia y prácticamente mantener intacto el número de Reynolds, la caída de presión en el colector no se debería incrementar considerablemente. En consecuencia, absorbedores con superficie corrugada en forma de V se escogen como la alternativa más eficiente para integrar los colectores de los SSTI-pi.

Evitar la aparición de zonas muertas en el colector es crucial: aprovechar toda la superficie del colector aumenta la  $\eta$  sin incrementar  $\Delta P$ . Para conseguirlo, artefactos de distribución en la entrada y salida del colector, tales como campanas o dispersores, son recomendables. Si se opta por respiraderos pequeños en relación al ancho del colector, como los mostrados en el Anexo M, se incurre en la aparición de zonas muertas.

### 5.5.3 Grosor del canal de aire del colector.

La Tabla 25 muestra los flux de aire máxicos y las dimensiones de los colectores utilizados por diversos autores. Si bien la información recopilada en la Tabla 25 corresponde a experimentos a escala de laboratorio, pueden servir como una aproximación para determinar la relación existente entre el largo y el ancho del colector (ambos valores subordinados a las dimensiones del SSTI-pi) y el espesor del canal de aire. Se debe recordar además que el grosor del canal de aire es inversamente proporcional a la eficiencia térmica del sistema, así como también valores pequeños de  $\Delta e_c$  pueden implicar grandes caídas de presión en el sistema.

Tabla 25: Flux de aire y dimensiones de los colectores de algunas referencias.

Referencia	Flux aire [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	$L_c/\Delta e_c$	$A_c/\Delta e_c$	$L_c/A_c$
Koyuncu (2006)	0,01806	?	?	?
Ben Slama (2007)	0,015	80	40	2,0
Karsli (2007)	?	36	18	2,0
Karim y Hawlader (2004)	0,035	18	7	2,6

Por otro lado, el flujo de aire que se alimente al colector y al SSTI-pi completo debe escogerse no solo en función de las recomendaciones disponibles en la literatura sino que también contemplando la caída de presión existente a lo largo del recorrido del aire y el tiempo que se espera demore el aire en recorrer el circuito cerrado rectangular que se creará al interior del SSTI-pi.

Al estar el largo y el ancho del colector determinados por las ecuaciones de la sección 5.3, entonces es posible determinar el grosor del canal de aire mediante alguna de las razones mostradas en la Tabla 25. Para el presente trabajo, se escoge la razón con el largo del colector entregada por Karsli (2004):

$$\Delta e_C = \left\{ \frac{L_C}{\left( \frac{L_C}{\Delta e_C} \right)_{Karsli}} \right\} \quad (5.22)$$

Es importante notar que el grosor del colector corresponde a la distancia que separa el aislante y la cubierta ya que, como se mencionó anteriormente, el aire circula a través del colector en un paso paralelo. Por lo tanto, la distancia cubierta-absorbedor es de  $\Delta e_C/2$  y la distancia absorbedor-aislante también es de  $\Delta e_C/2$ .

#### 5.5.4 Velocidad del aire.

A partir de los flux mostrados en la Tabla 25 es posible también determinar la velocidad del aire mientras cruza el colector. Otras consideraciones son importantes en la elección de la velocidad del aire:

- El tiempo de residencia de una molécula de aire una vez que se alcanza el estado estacionario a través del SSTI-pi.
- La capacidad de caudal movilizado de los ventiladores.
- La demanda energética a la que se verán sometidos los ventiladores.
- La proporcionalidad inversa existente entre  $\eta$  y  $T_{out}$ .

El caudal de aire suministrado por el ventilador y la velocidad del aire en el colector se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$\dot{V}_A = v_{A,C} \cdot (\Delta e_C \cdot A_C) \quad (5.23)$$

Una vez que el SSTI-pi alcanza el estado estacionario y asumiendo un movimiento exclusivamente axial de las partículas de aire, la relación existente entre la velocidad de aire y el tiempo de residencia está dada por:

$$\tau_C = \frac{L_C}{v_{A,C}} \quad (5.24)$$

O equivalentemente:

$$\tau_C = \frac{L_C \Delta e_C A_C}{\dot{V}_A} \quad (5.25)$$

## 5.6. Transporte acoplado entre el aire y la madera.

El calor transportado por el aire debe ser traspasado a la madera, entrar en contacto con las moléculas de agua líquida y transformarlas en vapor, tanto en la superficie de las tablas (en un comienzo) como en el interior de sus fibras (más adelante). Al mismo tiempo, a medida que el agua se calienta y/o se evapora, esta debe desplazarse desde el tejido fibrilar hasta la superficie de las tablas y finalmente ser arrastrada por el aire. Para que este proceso ocurra de manera homogénea tanto dentro de cada empaque individual como a través de la cancha completa del SSTI-pi, es posible proponer numerosas alternativas.

En la sección 3.2 se detallaron las variables que afectan el secado a distintos niveles. Un criterio válido para optimizar el transporte acoplado es intervenir estas variables, teniendo siempre presente que, dentro de lo posible, no se debe incurrir en costos adicionales ni fijos ni variables. A continuación se presentan alternativas factibles que van en esa dirección.

**i) Grosor de las tablas.** Diversas fuentes (Perré (2001), Rietz y Page (1999)) califican al grosor de las tablas como la variable más influyente en la duración del secado. Avila (2011) señala que la máquina cortadora de madera que Comercial Primavera adquirió con anterioridad posee la capacidad de escoger el número de tablas que se producen a partir de cada troza o metro-ruma, por lo que es posible introducir un cierto control en el grosor de las tablas que ingresan a los SSTI-pi y disminuirlo. No obstante, es importante tener en cuenta que grosores demasiado pequeños podrían ir en detrimento del atractivo del producto para los consumidores: tablas muy pequeñas implicarían una combustión mucho más rápida y un reemplazo frecuente de leña, lo que posiblemente podría generar dudas sobre su rendimiento o calidad.

**ii) Ordenamiento de la cancha.** La forma que se le da a la cancha de los SSTI-pi es de vital importancia para obtener un secado homogéneo entre distintos empaques (Rietz y Page, 1999). Deben existir pasillos longitudinales y transversales que permitan la libre circulación del aire. Además, deben quedar espacios libres tanto por debajo como por arriba de los empaques para que el aire pueda contactarse con todas las caras de los empaques. La Figura 36 y la Figura 37 muestran la manera en que se dispuso la cancha de los SSTI-pi y la Tabla 27 entrega los valores de los espacios vacíos o libres.

**iii) Circulación multi-trayectoria del aire.** Para evitar que sean sólo grupos de empaques periféricos aquellos que aprovechan preferentemente la circulación de aire caliente, una notable opción es proveer al aire distintas trayectorias a medida que el proceso de secado avanza. La Figura 40.A muestra la trayectoria habitual del aire a lo largo del SSTI-pi, la cual puede no solamente ir en dirección oeste-este sino que en la opuesta también. La Figura 40.B muestra la trayectoria alternativa destinada a secar más profundamente los empaques, e implica la utilización de dos ventiladores y una barrera física en el centro del patio para dirigir la circulación de ambos flujos de aire. Obviamente, esta alternativa permite también revertir la dirección de los flujos.

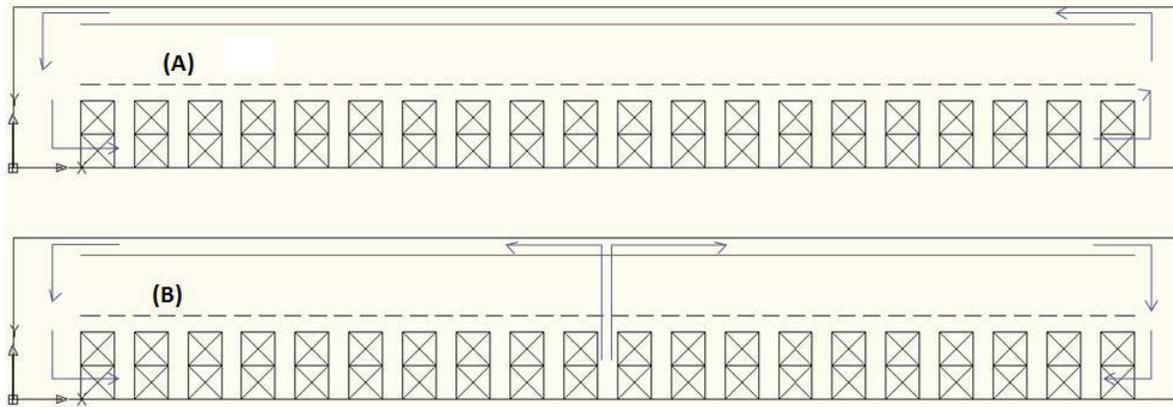


Figura 40: Vistas longitudinales que permiten apreciar las trayectorias posibles del flujo de aire. (A) A través de todo el SSTI-pi con un solo ventilador. (B) Dividiendo en dos el SSTI-pi con dos ventiladores.

**iv) Forma de los empaques.** El ordenamiento de los empaques, es decir la organización que tienen las aglomeraciones de tablas que forman una sola unidad mayor, representa una excelente oportunidad para mejorar el transporte acoplado entre aire y madera. En la sección 3.2 ya fueron mostradas imágenes en las que es posible apreciar empaques de tablas rigurosamente ordenadas de manera tal que se crean pequeños ductos que permiten aprovechar la flotabilidad del aire. Sin embargo, lograr empaques con estas características requiere de mano de obra adicional, y en consecuencia, acarrear costos mayores. En efecto, la forma de los empaques puede impactar decisivamente en el monto de los costos fijos de la planta si se considera que los empaques deben llenarse, trasladarse a un lugar particular del SSTI-pi, una vez secos ser montados arriba de un camión, ser desmontados del camión frente al domicilio de los clientes y finalmente ser dispuestos en el lugar en que los clientes decidan. Tal cantidad de movilización de los empaques obliga a que se piensen desde un punto de vista primordialmente práctico y económico. Alternativas de empaques tipo “bolsa” (ver Anexo M) están siendo analizadas actualmente por Comercial Primavera y aparecen como la primera opción para la formación de los empaques.

**v) Programación diaria del secado.** El control de  $T_{BH}$  y de  $T_{BS}$  dentro de los SSTI-pi es fundamental para optimizar la remoción de agua desde la madera. Este control se lleva a cabo principalmente controlando la cantidad de aire que se recircula por dentro del SSTI-pi versus la cantidad que se deja salir.

## 5.7 Resumen y valores de las variables de entrada y salida.

La Tabla 26 entrega los valores de todas las variables (o parámetros si se prefiere) en base a las cuales se calculan las variables de salida de la Tabla 27. La totalidad de las variables de salida de la Tabla 27 se calculan con el set de ecuaciones que va desde 5.1 hasta 5.24 salvo una:  $\theta$ . El motivo por el cual  $\theta$  no se escoge como idéntico a  $\theta_{OPT}$  se debe a que la altura del SSTI-pi se incrementa excesivamente. Comercial Primavera prefiere disminuir el valor del ángulo de la pared inclinada de manera tal que la altura del SSTI-pi no sobrepase los 5 [m], criterio que implica una elección de  $\theta$  igual a  $-11$  [°].

Es importante notar que la superficie de colector disponible,  $S_{C,disp}$ , es superior a la superficie de colector requerida,  $S_{C,req}$ . Esto autoriza a que el colector y la unidad de secado puedan formar parte de la misma estructura. En consecuencia, de acuerdo a la clasificación de secadores solares de Luna et al., (2009) el SSTI-pi diseñado es un arreglo tipo 1.

Tabla 26: Variables de entrada para el diseño del colector.

Variables de entrada		
Variable	Valor	Unidad
<b>E</b>	2000	[m <sup>3</sup> M]
<b>N</b>	5	[m <sup>3</sup> M]
<b>Fr</b>	10	[ ]
<b><math>a_e</math></b>	1	[m]
<b><math>l_e</math></b>	1	[m]
<b><math>h_e</math></b>	1,1	[m]
<b><math>a_{v,i}</math></b>	0,7	[m]
<b><math>l_{v,i}</math></b>	0,6	[m]
<b><math>\theta_{opt}</math></b>	-16,5	[°]
<b><math>l_{v,en}</math></b>	2	[m]
<b><math>h_{v,1}</math></b>	0,5	[m]
<b><math>h_{v,2}</math></b>	0,5	[m]
<b><math>l_{v,L}</math></b>	1,2	[m]
<b><math>CH_0</math></b>	0,95	[kg W/kg M]
<b><math>CH_f</math></b>	0,22	[kg W/kg M]
<b><math>\Delta H_{vap,w}</math></b>	2,39	[MJ/kg W]
<b><math>\rho_{EN}</math></b>	485	[kg M/m <sup>3</sup> M]
<b>I(SP1)</b>	1256,5	[MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>I(SP2)</b>	1202,2	[MJ/m <sup>2</sup> ]
<b><math>L_c/\Delta e_c</math></b>	36	[ ]
<b><math>\rho_A(50^\circ C)</math></b>	1,097	[kg A/m <sup>3</sup> ]
<b><math>v_{A,C}</math></b>	0,30	[m/s]

Tabla 27: Variables de salida para el diseño del colector.

Variables de salida		
Variable	Valor	Unidad
<b>Lg</b>	40	[ ]
<b>A</b>	9,2	[m]
<b><math>h_{pi}</math></b>	1,8	[m]
<b>H</b>	5,0	[m]

$L$	34,6	[m]
$L_C$	31,4	[m]
$A_C$	9,4	[m]
$\theta$	-11	[°]
$S_{C,disp}$	294,3	[m <sup>2</sup> ]
<b>Sup(suelo)</b>	318,3	[m <sup>2</sup> ]
<b>Sup(techo)</b>	324,3	[m <sup>2</sup> ]
<b>Sup(paredes)</b>	358,7	[m <sup>2</sup> ]
$Q_W$	338.330	[MJ]
$S_{C,req}$	281	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta e_C$	0,9	[m]
$\tau_C$	104,7	[s]
$F_A$	2,7	[kg/s]
$\dot{V}_A$	2,45	[m <sup>3</sup> /s]

Las principales características de los SSTI-pi diseñados, sean estas cualitativas o cuantitativas, se sintetizan a continuación.

- La época de realización del secado comienza la segunda quincena de noviembre y termina la primera quincena de marzo y se divide en dos sub-periodos de aproximadamente 10 semanas cada uno.
- La superficie de colector que se requiere para realizar el secado en cada sub-periodo es de 281 [m<sup>2</sup>].
- La planta de secado se divide en 5 SSTI-pi con 400 [m<sup>3</sup>] de capacidad cada uno.
- Las dimensiones de cada SSTI-pi son:
  - Largo = 34,6 [m]
  - Ancho = 9,2 [m]
  - Altura pared sur = 5,0 [m]
  - Altura pared norte = 3,2 [m]
  - $\theta = 11$  [°]
- Es deseable que la cubierta tenga una alta transmitancia para el rango visible y UV y una baja transmitancia para el rango IR.
- Es deseable que el absorbedor tenga una alta absorbancia y una baja emitancia, posea corrugaciones en V y sea pintado negro.
- Las dimensiones del colector son:
  - Largo = 31,4 [m]
  - Ancho = 9,4 [m]
  - Grosor = 0,9 [m]
- En el colector existe un compromiso entre la temperatura de salida del colector y la eficiencia del colector.
- Se opta por un paso paralelo del aire a través del colector.
- La velocidad del aire en el colector es de 0,3 [m/s], lo que implica un caudal de aire en cada SSTI-pi de 2,45 [m<sup>3</sup>/s] y un tiempo de residencia en el colector de 104,7 [s].

- La entrada y la salida del colector deben incluir artefactos de distribución para que se aproveche la totalidad de la superficie del absorbedor.
- La cancha del SSTI-pi posee espacios libres horizontales y verticales, principalmente en forma de pasillos.
- La circulación del aire dentro del SSTI-pi autoriza varias trayectorias que mejoran la homogeneidad del secado de los empaques.
- La forma de los empaques debe diseñarse fundamentalmente en base a consideraciones relativas a su transporte y movimiento y no a la transferencia de masa y energía.

## 5.8 Equipos e instrumentación necesarios.

Una de las grandes ventajas que posee el SSTI-pi por sobre otros secadores que requieren menores costos de capital es que permite introducir un grado de control importante en el proceso de secado para así reducir el tiempo que demanda el proceso. Sin embargo, de no implementarse la instrumentación necesaria para monitorear las variables de operación con las que funcionan los SSTI-pi, la noción de control del secado no tendría sentido.

Por otro lado, el producto que se pretende vender, en un comienzo leña certificada y más adelante madera ornamental, debe mantener estándares de CH que se les deben garantizar a los clientes.

En consecuencia, la planta de secado debe estar provista de la instrumentación adecuada para cumplir con las expectativas de calidad y rendimiento que están puestas en ella.

### 5.8.1 Medición de CHP.

Antes de que los empaques de leña abandonen los SSTI-pi, es importante certificar el CH con que los clientes lo recibirán.

Existen en el mercado medidores de humedad que funcionan en base a relaciones capacitancia-humedad o resistencia-humedad entre los diodos del artefacto y la madera. Sin embargo implican una serie de inconvenientes, entre los cuales destacan: la necesidad de calibraciones individuales para cada especie de madera (a veces incluso para distintas edades de rotación también), la profundidad de una tabla a la cual pueden realizar la medición, la precisión y el elevado precio de los instrumentos de mejor calidad. Por estos motivos, es siempre preferible obtener el CH con el método de secado en horno, que consiste en los siguientes 5 pasos (Rietz y Rufus, 1999):

1. Cortar una sección transversal de alrededor de 25 [mm] de grosor a partir de una tabla en la dirección de la veta.
2. Inmediatamente después del corte, quitar todos los restos de astillas y aserrín y pesar la sección para obtener  $M_0$
3. Disponer el trozo en un horno mantenido a 105 [°C] de comienzo a fin y secar hasta que se alcance un peso constante, usualmente 16 horas.

4. Pesar el trozo seco para obtener  $M_f$ .
5. Calcular el contenido de humedad con la siguiente fórmula:

$$CH [\%] = 100 \left( \frac{M_0 - M_f}{M_f} \right) \quad (5.26)$$

El método de secado en horno presenta la desventaja de que toma un tiempo considerable en realizarse. No obstante, su uso es estándar en las industrias madereras y su precisión es casi insuperable ( $\pm 0,5$  [%]). Para ejecutarlo correctamente, es necesaria una balanza adecuada con precisión  $\pm 0,5$  [g] y un horno pequeño capaz con una capacidad volumétrica de al menos  $30 \times 20 \times 10$  [cm<sup>3</sup>]. Una buena ventilación del horno también es deseable.

Un medidor de humedad por conductancia de mediana calidad (y precio) es recomendable para realizar mediciones rápidas, en terreno y como primera aproximación para obtener una estimación inicial que pueda utilizarse como criterio para ejecutar el método de secado por horno a un SSTI-pi en particular. En el Anexo O pueden observarse imágenes de este instrumento.

Como última notación, es importante que el muestreo destinado a determinar el CHP de cada SSTI-pi tenga validez estadística, por lo que las tablas que se utilicen como muestras deben ser tomadas desde distintas posiciones tanto dentro de un empaque como dentro de la cancha de secado. Obtener cinco muestras, descartar la peor y la mejor y calcular el CHP en base a las tres restantes es un protocolo sencillo y potencialmente satisfactorio.

### 5.8.2 Medición de RH y $T_{BS}$ .

La humedad relativa y la temperatura de bulbo seco son variables claves en la operación de los SSTI-pi. Por un lado, hay que monitorear constantemente RH y  $T_{BS}$  con la que ingresa el aire fresco a los secadores ( $RH_{in}, T_{in}$ ), y por otro, supervisar las condiciones internas de las canchas.

Existe una gran variedad de termómetros-higrómetros en el mercado que entregan la medición de ambas variables simultáneamente. Deben cumplir con los requisitos de precisión  $\pm 1$  [°C] en el rango 10 – 70 [°C] para  $T_{BS}$  y de precisión  $\pm 3$  [%] en el rango 20-95 [%] para RH.

### 5.8.3 Medición de $v_A$ .

Para verificar la velocidad (o caudal) a la cual el aire está siendo impulsado/succionado por los ventiladores en el interior de los SSTI-pi es necesario contar con un medidor de velocidad de aire. Es al comienzo de la operación de la planta en que es fundamental poseer un anemómetro pues debe encontrarse la relación rpm- $v_A$  para así manejar eficientemente los ventiladores. Una vez establecida esta relación, el anemómetro debería pasar a cumplir una labor meramente confirmativa. Un anemómetro portátil para la planta debe poseer una precisión  $\pm 0,03$  [m/s] en el rango 0,1-50 [m/s].

### 5.8.4 Cantidad y costos de los artefactos.

La Tabla 28 resume la información relevante para los diversos artefactos (instrumentos y hornos) que se estiman necesarios para el control de las variables de la planta.

Tabla 28: Rango, precisión, costo unitario y cantidad de artefactos que se estiman necesarios para la planta completa.

Artefacto	Rango	Precisión	Costo individual	Cantidad
Horno	hasta 120 [°C]	-	60 000 [CL\$]	2
Balanza	1-5000 [g]	± 0,5 [g]	11 000 [CL\$]	1
Medidor de CH por conductancia	8-40 [%]	± 2 [%]	120 000 [CL\$]	1
Termómetro-higrómetro	10 – 70 [°C]	± 1 [°C]	40 000 [CL\$]	6
	20-95 [%]	± 3 [%]		
Anemómetro	0,1-50 [m/s]	±0,03 [m/s]	90 000 [CL\$]	1

### 5.8.5 Movimiento de los empaques.

Cada empaque de 1 [m<sup>3</sup>] de eucalipto nitens puede pesar desde 500 [kg] hasta 1 [ton] dependiendo de la humedad que contenga. Para mover cargas tan pesadas es absolutamente necesario un carro transpaleta o un apilador capaz de levantar los empaques hasta una altura de al menos 1,2 [m]. Cotizaciones hechas empresas del rubro permiten estimar en 430 000 [CL\$] + IVA un apilador manual con las características deseadas.

Además del levantamiento de los empaques de madera, el movimiento de las trozas, placas metálicas y otros objetos más pesados requiere de la utilización de un mini-cargador más potente. Para este fin, Comercial Primavera posee un mini-cargador marca Bobcat que adquirió ya usado en aproximadamente 5 000 000 [CL\$].

### 5.8.6 Obtención de tablas a partir de trozas.

Al arribar las trozas en forma de metro-ruma a la planta, de volumen aproximado 1x1x2,4 [m<sup>3</sup>], es necesario cortarlas en tablas más pequeñas. El equipo encargado de realizar esta labor es llamado máquina picadora de madera y junto con ella debe adquirirse un generador a petróleo para operarla. Para una picadora de capacidad aproximada de 4 [m<sup>3</sup>/hr], el costo total del conjunto máquina-generador rodea los 20 000 000 [CL\$].

### 5.8.7 Convección forzada.

Los equipos tradicionales encargados de mantener una convección forzada son los ventiladores. Para el caso del proyecto de la planta de secado, aquellos que se compran deben cumplir las siguientes características:

- Pesarse no más de lo que una persona puede cargar (aproximadamente 25 [kg]) para que puedan ser trasladados fácilmente entre distintos SSTI-pi.
- Mover un  $\dot{V}_{max}$  de 15 000 [m<sup>3</sup>/hr] en el interior de cada SSTI-pi. En términos de presión de trabajo, esta puede calcularse si se aproxima el circuito cerrado de un SSTI-pi como una tubería de diámetro hidráulico equivalente de 1,64 [m] y largo 60 [m] constituida por cuatro codos de 90° como únicas singularidades.
- Operar con energía eléctrica.
- Poseer flujo reversible (succión y empuje).

Para cumplir con todas estas condiciones, una alternativa viable consiste en combinar en paralelo varios ventiladores de menor  $\dot{V}_{max}$  que sumen sus capacidades. Cotizaciones en empresas del rubro permiten vislumbrar que baterías de tres ventiladores axiales de 250 [W] dispuestos en paralelo cumplen los requerimientos planteados. El costo de cada uno es de alrededor de 150 000 [CL\$].

Si se tienen operando simultáneamente tres SSTI-pi, el número de ventiladores necesarios es de 9. Agregando uno de repuesto para casos extraordinarios, el número total de ventiladores que se estipula deben ser comprados es de 10.

## 5.9 Especificaciones adicionales.

### 5.9.1 Fuentes de energía convencionales.

La empresa patrocinante dispone de un quemador de aceites pesados disponible para ser utilizado en el SSTI. El aceite que el quemador utiliza es aceite residual de tractores, camiones y otra maquinaria principalmente proveniente del área agropecuaria. De acuerdo a la normativa vigente, para deshacerse de los aceites pesados las empresas deben desembolsar dinero a compañías especializadas en su retiro, las cuales a su vez los entregan a depósitos autorizados (Avila, 2011). El quemador de aceites pesados se hace por lo tanto una interesante alternativa ya que su combustible es un residuo costoso de tratar para otras empresas. No obstante, antes de poderse utilizar, el quemador requiere un análisis de las emisiones que genera.

Además de la energía solar, los ventiladores operarán en base a electricidad, es decir, se debe contar con una fuente de electricidad.

En resumen, la única fuente de energía convencional requerida es electricidad.

### 5.9.2 Sistema de almacenamiento de energía.

Aunque el almacenamiento de energía no representa ninguna complicación técnica, debe tenerse presente que el área asociada a la cubierta admite una cantidad finita de energía solar. Hay dos opciones: O la energía solar se utiliza inmediatamente al recibirse, por tanto calentando mucho al SSTI durante el mediodía pero con una muy pequeña diferencia de temperatura durante la noche, o la energía se guarda y se utiliza de manera más uniforme durante un periodo de 24 horas.

Si el almacenamiento se determinase como benéfico, el tamaño del colector debería incrementarse para suplir energía adicional que no pueda ser utilizada inmediatamente. Si el tamaño del colector no fuese aumentado entonces la captación de radiación solar diaria, y en consecuencia la entrada de energía diaria para las tablas de madera, sería la misma con o sin almacenamiento de energía. Por lo tanto, el almacenamiento de energía podría eventualmente no entregar ningún beneficio. Esta problemática propia de los sistemas de almacenamiento de energía se hace mayor si se considera que la irradiancia solar para Osorno difícilmente es mayor a la capacidad máxima de absorción de varias superficies metálicas pintadas negro.

Por otro lado, sin sistema de almacenamiento las temperaturas durante el día tenderían a ser más altas y acompañadas por RH más bajas, es decir, se aceleraría el proceso de secado. El almacenamiento de energía puede entregarle uniformidad y homogeneidad al proceso de secado, mejorando así la calidad del producto, pero esta función puede ser también cumplida exitosamente por ventiladores. Además, si no hay un sistema de almacenamiento, los ventiladores funcionarían sólo durante las horas de sol, disminuyendo así el consumo eléctrico.

Por las razones recién mencionadas, se decide no incorporar un sistema de almacenamiento de energía.

## 6. Comportamiento esperado de los secadores.

Un esquema del interior de un SSTI-pi es mostrado en la Figura 41, en la cual se pueden observar los flujos másicos que se definen para representar el movimiento de materia dentro de un SSTI-pi.  $F_{in}$  ingresa por el respiradero de entrada de aire que se ubica en una posición cercana a la batería de ventiladores, la cual a su vez succiona a  $F_r$ . El flujo que sale expulsado de la batería de ventiladores es  $F_1$  y una vez que atraviesa completamente el colector pasa a denominarse  $F_2$ . Al entrar la madera en contacto con  $F_2$ , parte de su humedad es evaporada y abandona la madera. Este flujo de humedad es  $F_W$ .  $F_3$  es el flujo que sale por el extremo de la cancha de secado y se divide en una fracción que es recirculada,  $F_r$ , y otra que es retirada del SSTI-pi por el respiradero de salida de aire,  $F_{out}$ .

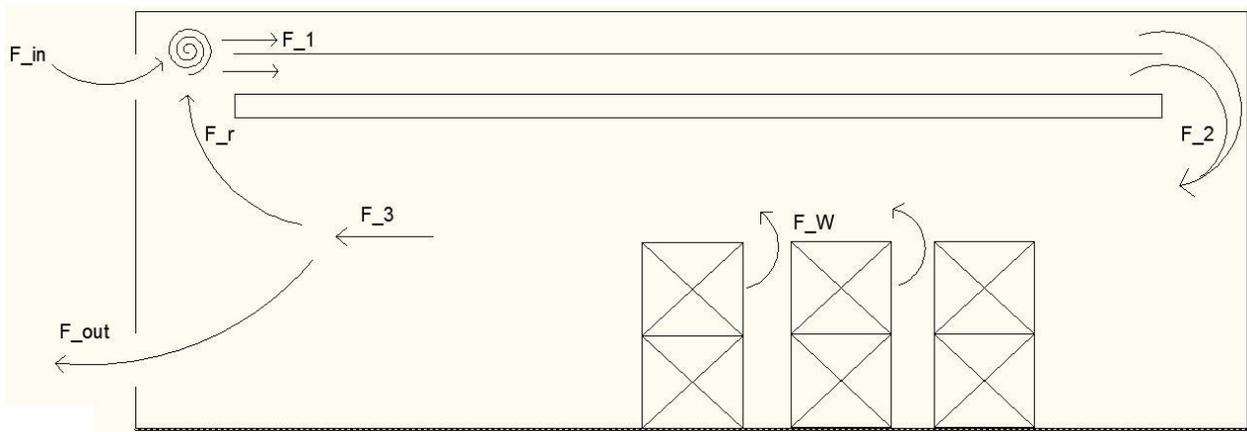


Figura 41: Esquema del interior de un SSTI-pi en que se muestran los flujos másicos que se utilizan para describir su fenomenología.

### 6.1 Flujo recirculado versus flujo de salida.

Al ya encontrarse determinadas la velocidad del aire y la superficie de colector, las variables de operación controladas diariamente son  $T_{BS}$  y RH. Los actuadores para estas variables son las aperturas de los respiraderos de entrada y salida de aire, a través de los cuales se selecciona la razón entre aire fresco y seco que ingresa,  $F_{in}$ , y aire húmedo y caliente que es recirculado,  $F_r$ .

Mejorar la eficiencia del colector carece de real impacto si se descuida la optimización de la humedad presente en la cancha de los secadores. Es importante recordar que existe un compromiso entre la eficiencia y la temperatura de salida del colector, siendo esta última la variable que no solamente determina la entalpía que es entregada a la madera sino que también afecta la RH del flujo de aire que ingresa a la cancha. La razón  $F_r/F_{out}$  es por tanto clave.

Para optimizar  $F_r/F_{out}$  se requiere de una simulación integral del transporte acoplado que rige la operación de los SSTI-pi. Al ser esta búsqueda de considerable complejidad e ir más allá de los objetivos del presente estudio, en el Anexo Q se discuten y se dejan planteadas las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento de un SSTI-pi para que en el futuro se trabaje en las simulaciones del sistema.

## 6.2 Aumento de temperatura en el colector.

El balance de energía en el colector está dado por:

$$\frac{dQ_C}{dt} = E_{rad} + H(F_1) - H(F_2) \quad (6.1)$$

La ecuación (6.1) es desarrollada en el Anexo Q y culmina en el planteamiento de la siguiente ecuación:

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{K_2}{K_1} + \frac{K_3(x_1)}{K_1}(T_1 - T_2) \quad (6.2)$$

En donde los coeficientes corresponden a:

$$K_1 = \frac{\rho_{ab}\Delta e_{ab}A_C C_{p,ab}}{f_{ab}} \quad (6.3)$$

$$K_2 = S_C I_N \eta \quad (6.4)$$

$$K_3(x_1) = (F_r + F_{in})(C_{p,A}(1 - x_1) + C_{p,V}x_1) \quad (6.5)$$

La Tabla 29 muestra los valores mediante los cuales es posible calcular  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3(x_1)$  para las propiedades reales estimadas del colector de un SSTI-pi.

Tabla 29: Valor de los parámetros necesarios para calcular las constantes del balance de energía del colector.

Parámetro	Valor y unidades	Parámetro	Valor y unidades
$C_{p,ab}$	500 [J/kgK]	$I_N$	284,6 [W/m <sup>2</sup> ]
$\rho_{ab}$	7850 [kg/m <sup>3</sup> ]	$(F_r + F_{in})$	2,7 [kg/s]
$\Delta e_{ab}$	0,00035 [m]	$C_{p,A}$	1007 [J/kgK]
$f_{ab}$	0,75 [ ]	$C_{p,V}$	1868 [J/kgK]
$S_C$	280 [m <sup>2</sup> ]	$\eta$	0,6 [ ]

De (6.3) se obtiene:

$$K_1 = 512\,867 \left[ \frac{J}{K} \right] \quad (6.6)$$

De (6.4) se obtiene:

$$K_2 = 47\,813 \left[ \frac{J}{s} \right] \quad (6.7)$$

Fijando  $x_1 = 0,009 \left[ \frac{kg\,W}{kg\,A+W} \right]$ , de (6.5) se obtiene:

$$K_3(0,009) = 2\,740 \left[ \frac{J}{s \cdot K} \right] \quad (6.8)$$

Cabe destacar que el valor de  $K_3$  se mantiene relativamente constante: aún si se aumenta en un 300% el valor de  $x_1$ ,  $K_3$  cambia en menos de un 2% con respecto a su valor para  $x_1 = 0,009$ .

Asumiendo que la variación de  $x_1$  en el tiempo es despreciable en su efecto sobre  $T_2$ , entonces la solución de (6.2) para condición inicial  $T_2(0) = T_1$ :

$$T_2(t) = \left( \frac{K_2}{K_3} + T_1 \right) - \frac{K_2}{K_3} \exp\left(-\frac{K_3}{K_1} t\right) \quad (6.9)$$

O equivalentemente:

$$\Delta T(t) = \frac{K_2}{K_3} - \frac{K_2}{K_3} \exp\left(-\frac{K_3}{K_1} t\right) \quad (6.10)$$

La Figura 42 muestra la ecuación (6.10) graficada para el intervalo  $t \in [0,800]$ . Es interesante notar que el incremento de temperatura en el aire que genera la superficie caliente del absorbedor alcanza una temperatura de estancamiento al igual que cualquier otro sistema de energía solar, incluidos los invernaderos agrícolas (Imre, 2006), y que en este caso es de  $\Delta T = 17,4$  [°C]. No obstante, el tiempo de residencia que posee una molécula de aire en el colector diseñado es sólo de 104,7 [s] (ver Tabla 27) por lo que un diferencial del flujo de aire, en un ciclo de circulación, alcanza un  $\Delta T$  de 7,5 [°C].

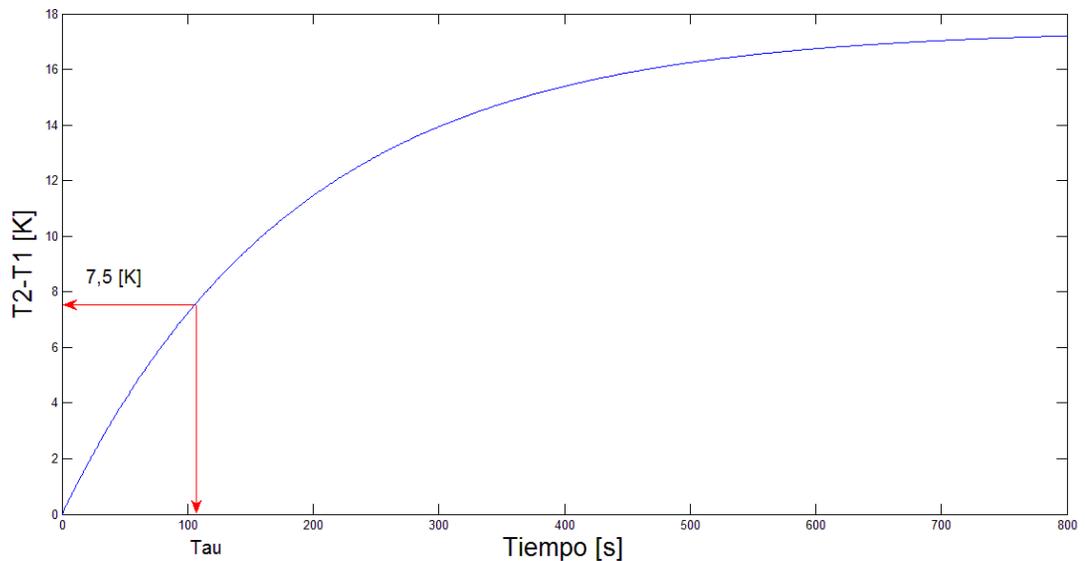


Figura 42: Incremento de la temperatura de salida del aire tras atravesar una vez el colector. En rojo se muestra  $\Delta T(\tau)$  y  $\tau$ .

Si bien la Figura 42 podría conducir a pensar que mientras mayor es  $\tau_c$  mayor es la temperatura con que el aire abandona el colector, esto no es así.

Karim y Hawlader (2007) muestran que  $\eta$  es afectado por el flujo másico que cruza el colector para cualquier forma que este posea, tal y como lo muestra la Figura 43. Este comportamiento es predecible a partir de la ecuación (5.20).

A partir de (5.25),  $\tau_c$  se relaciona con  $(F_r + F_{in})$  mediante:

$$\tau_c = \frac{L_C \Delta e_C A_C \rho_A}{(F_r + F_{in})} \quad (6.11)$$

Linealizando en el intervalo para  $\eta \in [0,30; 0,6]$  con los datos de flux de Karim y Hawlader (2007) es posible encontrar la siguiente función:

$$\eta(\tau_c) = -9,5557 \cdot 10^{-4} \cdot \tau_c + 0,7 \quad (6.12)$$

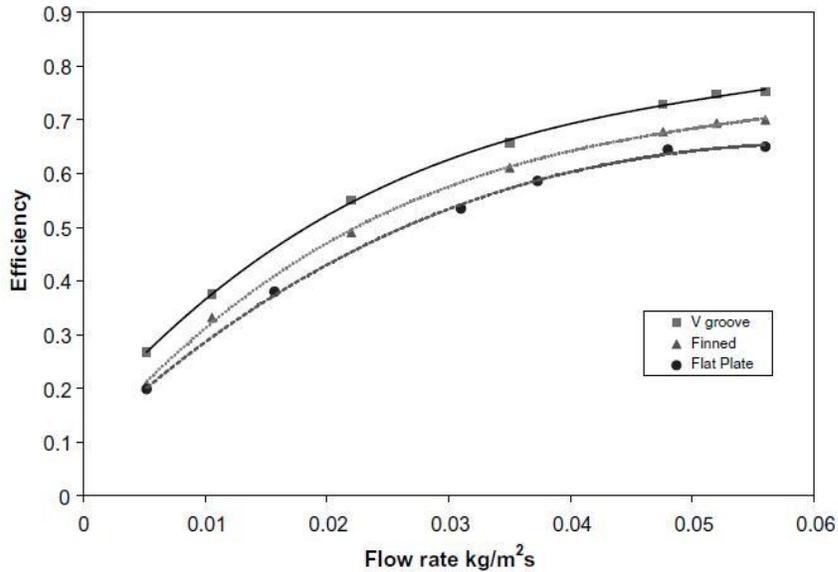


Figura 43: Eficiencia versus Flux de aire para tres tipos distintos de colectores. Fuente: Karim y Hawlader, 2007.

Introduciendo (6.12) en  $K_2$  (ecuación 6.7):

$$K_2' = S_C I_N (-9,5557 \cdot 10^{-4} \cdot \tau_c + 0,7) \quad (6.13)$$

A su vez se modifica  $K_3$  (ecuación 6.8):

$$K_3'(x_1) = \left( \frac{L_C \Delta e_C A_C \rho_A}{\tau_c} \right) (C_{p,A}(1 - x_1) + C_{p,V}x_1) \quad (6.14)$$

Nuevamente fijando  $x_1 = 0,009$  se modifica a (6.8) de manera tal que entregue el incremento de temperatura en el colector en función de distintos tiempos de residencia:

$$\Delta T(\tau_c) = \frac{K_2'}{K_3'} - \frac{K_2'}{K_3'} \exp\left(-\frac{K_3'}{K_1} \tau_c\right) \quad (6.15)$$

La Figura 44 muestra que para tiempos de residencia muy altos el mayor valor de  $\Delta T$  que se puede alcanzar es de 15,5 [°C]. Esto quiere decir que si los ventiladores impulsaran el aire a menos de 0,1

[m/s] entonces la ganancia de temperatura que tendrían sería, para efectos prácticos, completamente constante. No obstante, una convección forzada de flujo tan bajo podría ocasionar que el transporte difusivo predominara por sobre el transporte advectivo y que por tanto el flujo de aire se moviese azarosamente en el colector en vez de axialmente, perdiéndose así el propósito direccional de la convección forzada y dificultando severamente la succión de aire fresco ambiental.

Por otro lado, la Figura 44 también muestra que altas velocidades del aire (bajos tiempos de residencia), que si bien optimizan  $\eta$  mediante un aumento del número de Reynolds, incrementan casi de manera residual la temperatura de salida: menos de 4 [°C] para  $v_{a,c} \geq 0,58 \left[\frac{m}{s}\right]$ . El colector como calentador de aire carece de sentido para velocidades más altas.

La discusión anterior refuerza aún más la elección de la velocidad de aire que se hizo en la sección 5.5 ( $v_{a,c}$  de operación =  $0,3 \left[\frac{m}{s}\right]$ ) ya que responde correctamente al compromiso existente entre  $(T_2 - T_1)$  y  $\eta$ , con valores de 7,5 [°C] y 0,6 respectivamente.

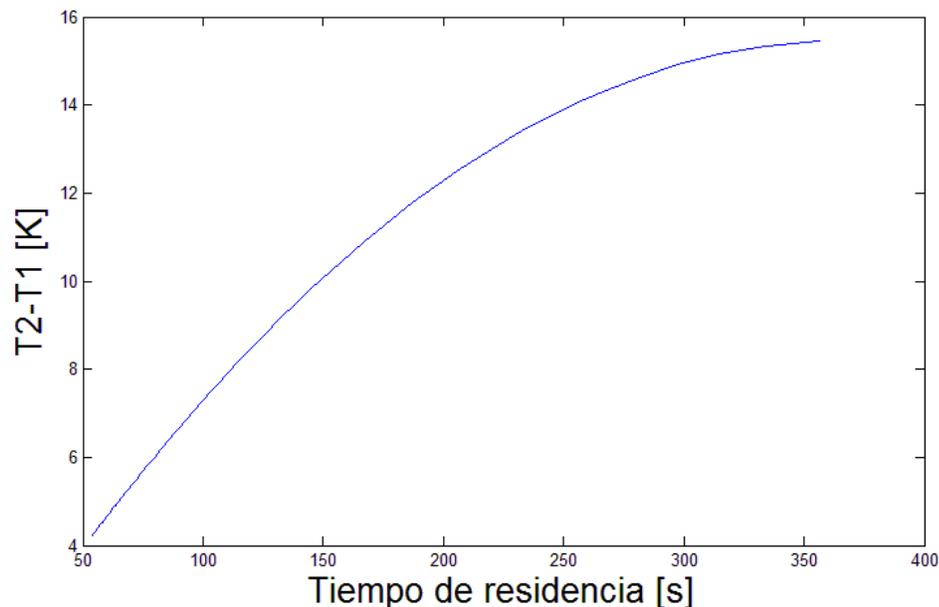


Figura 44: Tiempo de residencia en el colector versus incremento de la temperatura tras atravesar el colector.

### 6.3 Variación de EMC en función de $T_2$ .

Convencionalmente (e intuitivamente), la transferencia de masa entre dos medios está dada por:

$$\{\text{Variación de la humedad}\} = \{\text{Coeficiente}\} \cdot \{\text{Superficie interfaz}\} \cdot \{\text{Fuerza motriz}\} \quad (6.16)$$

Para el caso del secado de madera, la fuerza motriz corresponde a un gradiente de humedad existente entre el aire y la madera. No obstante,  $RH_A$  no puede sumarse o sustraerse con CH ya que representa una magnitud que no está definida con las mismas unidades que CH. En consecuencia debe

recurrirse al EMC de la madera (explicado en la sección 1.4), que usualmente se aproxima por la ecuación de Hailwood-Horrobin (1946) para dos hidratos:

$$EMC(T, RH) = \frac{1,8}{C_3} \left( \frac{C_0 RH}{1 - C_0 RH} + \frac{C_1 C_0 RH + 2C_1 C_2 C_0^2 RH^2}{1 + C_1 C_0 RH + C_1 C_2 C_0 RH^2} \right) \quad (6.17)$$

En donde el set de coeficientes que mayor precisión autorizan, con T en grados Celsius y RH como fracción, son los siguientes (Simpson, 1991):

$$C_0 = 0,8050 + 000736T - 0,00000273T^2 \quad (6.18)$$

$$C_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2 \quad (6.19)$$

$$C_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2 \quad (6.20)$$

$$C_3 = 349 + 1,29T + 0,0135T^2 \quad (6.21)$$

La ecuación que permite calcular RH en función de T y x es deducida en el Anexo P.

La forma matemática de (6.16) es:

$$\frac{dCH}{dt} = - \frac{k_m S_{A,M}}{M_M} (CH - EMC) \quad (6.22)$$

El coeficiente de transferencia de masa,  $k_m$ , cuyas unidades son [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ], es considerado como una constante para un set bien definido de parámetros relevantes por numerosos autores (Broche et al. (2002), Ananías et al. (2000)). Esto quiere decir que  $k_m$  puede considerarse constante si la especie arbórea, el grosor de las tablas, la velocidad de aire y la viscosidad del aire permanecen constantes. Los autores recién mencionados indican que  $k_m$  está en el orden de  $10^{-5}$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Valores de ese orden están en concordancia con los tiempos de secado que se esperan para el proyecto de la planta de secado (información no mostrada). Sin embargo, es posible cuestionar la independencia de  $k_m$  con respecto a la temperatura (Díaz, 2012).

Cabe mencionar que  $k_m$  podría eventualmente también depender de CH y EMC. Si se asume  $k_m$  constante (al menos para CH y  $T_2$ ), y a pesar de que para obtener la descripción completa de la remoción de humedad es necesario resolver las ecuaciones de transporte acoplado, la influencia parcial que  $T_2$  tiene sobre la fuerza motriz ( $CH - EMC$ ) puede evaluarse a través de  $EMC(T_2, RH_2)$ . Pero al depender  $RH_2$  a su vez de  $T_2$  y  $x_1$ , EMC se remite a ser una función  $EMC(T_2, x_1)$ . Es interesante comparar la importancia que tienen  $T_2$  y  $x_1$  en EMC y por tanto en la fuerza motriz.

La Figura 45 muestra la variación de EMC en función de la temperatura para distintas humedades absolutas. Las humedades absolutas representan el rango dentro del cual se espera que  $x_1$  se encuentre. Lo primero que destaca es que la influencia relativa de  $x_1$  decae a medida que  $T_2$  aumenta. Para  $T_2 > 40$  [°C], EMC alcanza un valor de 0,1 que tiende a descender muy poco (el valor asintótico de EMC es de 0,075) y es prácticamente independiente de la humedad absoluta con que ingresa el aire a la cancha de secado. Esto quiere decir que para  $T_2 > 40$  [°C] la variación de EMC tanto en función de  $x_1$  como de  $T_2$  es despreciable.

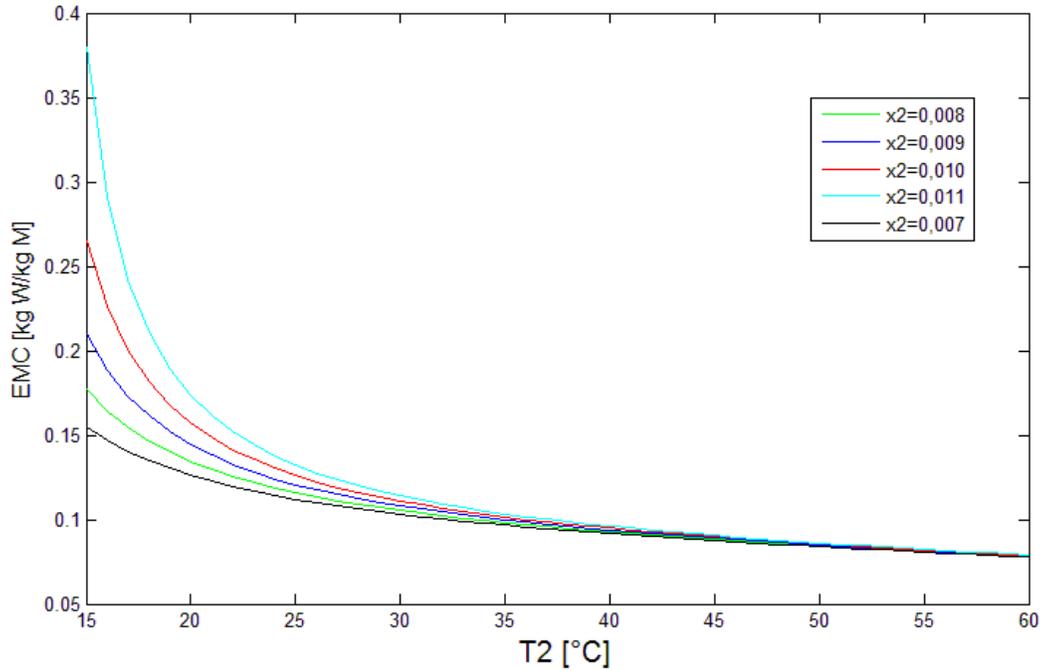


Figura 45: Variación de EMC en función de la temperatura de entrada a la cancha para distintas humedades absolutas (recordar que  $x_2=x_1$ ).

Si se asume que el aire transfiere en cada ciclo el 20% de su calor sensible, entonces el número de pasadas para alcanzar los 35 [°C] puede estimarse en alrededor de 10. De ahí en adelante EMC variará marginalmente.

## 6.4 Curvas de secado.

Simpson et al. (1987) realizaron estudios destinados a evaluar la factibilidad de secar leña en hornos normalmente utilizados para madera aserrada. Los experimentos se realizaron con cargamentos de 22 [m<sup>3</sup>] de leña picada de entre 35 y 45 [cm] de largo de roble americano (*Quercus Alba*). Las curvas de secado se obtuvieron para tres temperaturas diferentes, 60, 82 y 104 [°C], y dos alternativas de ordenamiento de las trozas, paralelas a la circulación de aire y al azar, tal y como se muestra en la Figura 46. Los resultados indican que para reducir el CHP desde aproximadamente un 52% hasta un 20% se necesitaron tiempos de 260, 90 y 30 [hr] para el horno operando a 60, 82 y 104 [°C] respectivamente. Además, el ordenamiento de las trozas impactó escasamente la tasa de secado.

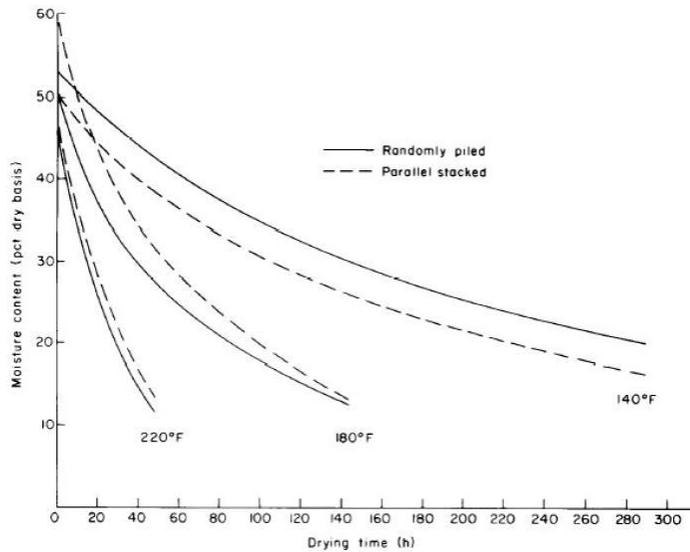


Figura 46: Curvas de secado para tablas de leña a distintas temperaturas de operación de un horno convectivo. Fuente: Simpson et al., 1987.

En otro estudio, CONAMA y UCT (2005) estudiaron el efecto en la velocidad del secado al aire libre de distintos ordenamientos y dimensiones de las trozas de la leña de hualle (*Nothofagus Obliqua*) en dos localidades climatológicamente diferentes de la IX región, Pillanlelbún (17 [km] al sur de Temuco) y Catripulli (25 [km] al este de Pucón). Para tablas de leña de 33 [cm] de largo, rieles que la sostengan por sobre el suelo y un cobertizo de polietileno, la curva de secado que se obtiene se muestra en la Figura 47 (para Catripulli la forma de la curva es prácticamente idéntica). De no haber precipitaciones considerables, al cabo de 22 semanas en la época estival se pueden obtener humedades finales de hasta un 25% para las pilas ordenadas perpendicularmente a la dirección de los vientos.

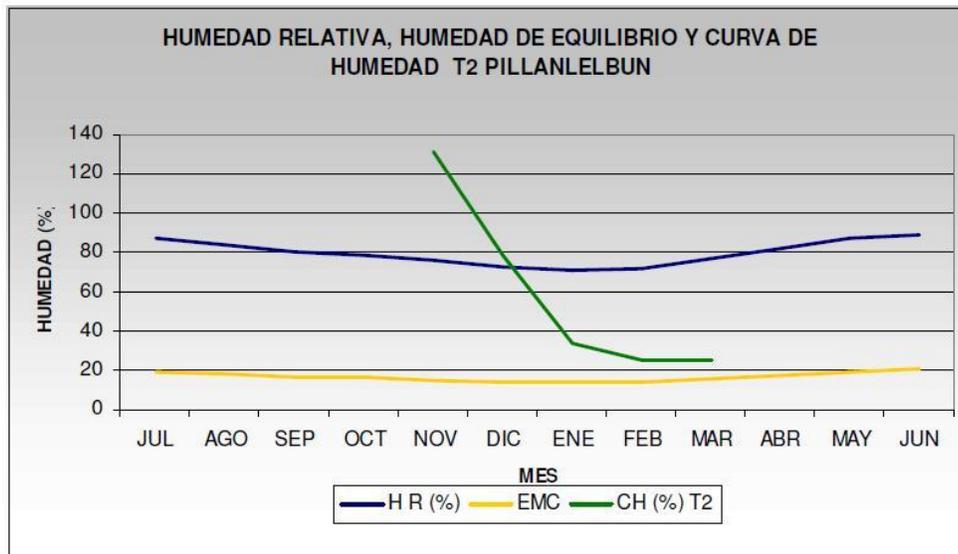


Figura 47: Humedad relativa, EMC y curva de secado de tablas de leña para secado al aire libre en la localidad de Pillanlelbún. Cabe destacar que durante el periodo diciembre-abril en que se realizaron las mediciones se registraron precipitaciones acumuladas de 128,1 [mm], lo que representa un déficit de un 95% con respecto al mismo promedio del periodo. Fuente: CONAMA y UCT, 2005.

Es destacable que tanto para el secado convectivo en horno ( $T < 80$  [°C]) como para el secado natural la forma de las curvas sea muy similar, aun cuando para el primero el relativamente bajo  $CH_0$  no permite apreciar la verdadera extensión del periodo de tasa de secado constante. Este comportamiento común es observable también en otros materiales higroscópicos como la miel o las frutas y se explica por las naturalezas disímiles del agua libre y el agua enlazada (o sus equivalentes para otras sustancia no maderosas), particularmente en términos energéticos (ver Figura 48): para remover el agua enlazada se requiere una cantidad cada vez mayor de calor. La consecuencia a nivel molecular de tal diferencia es que, al poseer las tablas de madera un  $CH$  menor a FSP, el movimiento de humedad se realiza preferentemente por difusión tanto de agua enlazada como de vapor (para profundizar la descripción, remitirse a la sección 3.1).

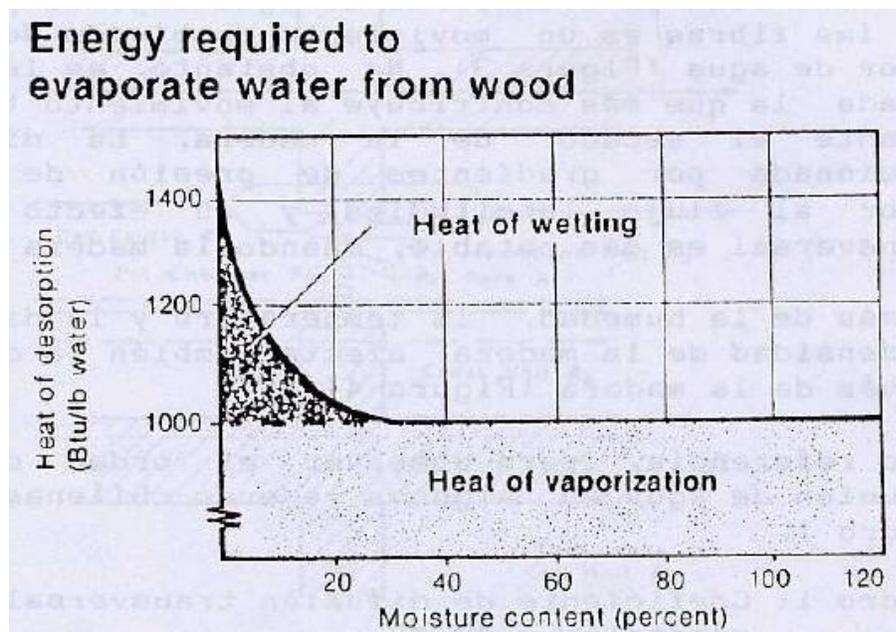


Figura 48: Calor de desorción necesario para retirar la humedad de la madera. Al ser  $CH < FSP$ , la cantidad de calor necesario para retirar el agua enlazada se incrementa exponencialmente. Fuente: Haygreen y Bowyer, 1982.

Desde un punto de vista del control de los secadores, la diferencia recién mencionada entre humedad libre y humedad enlazada es observable cuando el  $CHP$  de los empaques se acerca al  $EMC$  del interior de los SSTI-pi, comenzando por tanto a menguar la fuerza motriz de la transferencia de masa (ver ecuación 6.22). Por ende el transporte de humedad se hace a una velocidad cada vez menor: aparece el periodo de tasa de secado decreciente.

La curva de secado esperada para los SSTI-pi se muestra en la Figura 49. De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo 5 y a las curvas de secado previamente estudiadas, se espera que la madera verde (95%  $CHP$ ) de eucalipto nitens alcance un  $CHP$  de un 22% al cabo de la décima semana, asumiendo un  $FSP$  de 28%. El periodo de tasa de secado constante no debiese observarse más allá de la sexta semana, tras la cual el periodo de tasa de secado decreciente pasaría a predominar.

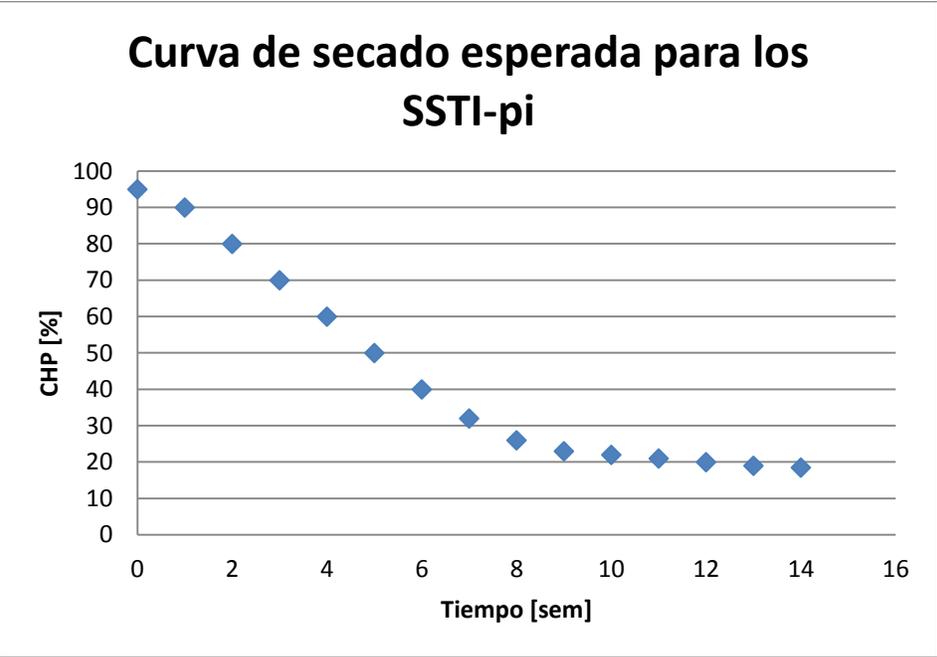


Figura 49: Curva de secado esperada para los SSTI-pi.

## 7. Análisis económico.

A continuación se presentan los ítems que componen el flujo de caja del proyecto puro de la planta de secado. Debe notarse que este abarca únicamente la producción de empaques de leña y no contempla la futura expansión al mercado de maderas nativas ornamentales (en particular mueblería) que Comercial Primavera tiene estipulada.

### 7.1 Inversión inicial.

La inversión inicial es el monto requerido para poner en marcha la planta. Los ítems que lo componen son:

$$I.I. = \{Construcción secadores\} + \{Artefactos y Equipos\} + \{Vehículos\} + \{Otros\} \quad (7.1)$$

Estos ítems a su vez se dividen en (no-exhaustivamente):

$$\begin{aligned} &\{Construcción secadores\} \\ &= \{Cubierta\} + \{Absorbedor\} + \{Ripio\} + \{Aislante\} + \{Polines\} \\ &+ \{Mano de obra\} + \{Movimiento de tierra\} \quad (7.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\{Artefactos y Equipos\} \\ &= \{Instrumentación\} + \{Ventiladores\} + \{Picadora\} + \{Apilador\} \\ &+ \{Minicargadora\} \quad (7.3) \end{aligned}$$

$$\{Vehículos\} = \{Camiones repartidores\} \quad (7.4)$$

$$\{Otros\} = \{Publicidad\} + \{Computadores\} + \{Oficinas\} \quad (7.5)$$

Los montos correspondientes a varios de los ítems ya fueron entregados anteriormente. Los montos de aquellos ítems que corresponden a componentes de los secadores se calcularon en base a ecuaciones de la sección 5.3. La Tabla 30 muestra una recopilación de todos los ítems incluidos en las ecuaciones 7.2 a 7.5. La inversión inicial se estima en 56 000 000 [€].

**Tabla 30: Monto requerido por cada ítem que compone la inversión inicial del proyecto.**

Ítem	Valor [€]
Plástico	375.611
Planchas ZincAlum	4.046.450
Aislante	3.745.415
Ripio suelo secadores	2.864.880
Ripio camino	716.220
Polines	2.000.625
Máquina picadora	20.000.000
Ventiladores	1.500.000
Instrumentación	381.000
Camiones repartidores (2)	9.000.000

Minicargadora	5.000.000
Apilador manual	503.000
Movimientos de tierra	1.000.000
Mano de obra / Maestranza	4.000.000
Otros (publicidad, computadores)	800.000
<b>Total</b>	<b>55.933.200</b>

## 7.2 Ingresos anuales.

El único ingreso asociado a la planta de secado corresponde a la venta de leña:

$$Ingresos = \{Venta\ leña\} \quad (7.6)$$

$$Ingresos = Precio\ Venta \left[ \frac{CL\$}{m^3} \right] \cdot E[m^3] \quad (7.7)$$

$$Ingresos = 28\ 000 \cdot 2\ 000 = 56\ 000\ 000\ [CL\$] \quad (7.8)$$

## 7.3 Costos variables anuales.

Los costos variables en los que se incurre son cuatro:

$$C.V. = \{Trozas\} + \{Bolsas\} + \{Transporte\} + \{Electricidad\} \quad (7.9)$$

Cada uno de estos ítems se calcula de la siguiente forma:

$$Costo\ trozas = Precio\ compra\ metro\ ruma \left[ \frac{CL\$}{m.r.} \right] \cdot 0,41 \left[ \frac{m.r.}{m^3} \right] \cdot E[m^3] \quad (7.10)$$

$$Costo\ Bolsas = Precio\ bolsa \left[ \frac{CL\$}{m^3} \right] \cdot E[m^3] \quad (7.11)$$

$$Costo\ transporte = \frac{E[m^3] \cdot Costo\ viaje \left[ \frac{CL\$}{via} \right]}{Capacidad\ camión \left[ \frac{m^3}{via} \right]} \quad (7.12)$$

Notar que en (7.12), el “costo viaje” medido en [CL\$/via] contempla tanto el consumo de combustible (para una distancia recorrida promedio) del vehículo como el desgaste que sufre, por ejemplo de sus neumáticos o de su aceite.

$$Costo\ electricidad = Consumo\ electricidad[kWh] \cdot Precio\ Energía \left[ \frac{CL\$}{kWh} \right] \quad (7.13)$$

A su vez, el consumo de electricidad está dado por:

$$\text{Consumo electricidad} = \text{Pot} \left[ \frac{W}{\text{ven}} \right] \cdot n^{\circ}\text{vent}[\text{ven}] \cdot \text{top}[\text{s}] \cdot 2,778 \cdot 10^{-7} \left[ \frac{\text{kWh}}{W \cdot \text{s}} \right] \quad (7.14)$$

La Tabla 31 muestra los valores de todos los parámetros involucrados en los costos variables.

Tabla 31: Valor asociado a los ítems relevantes para el cálculo de los costos variables anuales.

Variable	Valor	Unidades
Precio compra del metro-ruma	18.000	[CL\$/m.r.]
Precio compra metro cúbico	7.377	[CL\$/m3]
Producción anual	2.000	[m3]
<b>Gasto en madera verde</b>	<b>14.754.098</b>	<b>[CL\$]</b>
Precio bolsas	1,40	[US\$/bolsa]
Gasto en bolsas	1.363.600	[CL\$]
Capacidad cada camión	9	[m3/viaje]
Costo por viaje (petróleo, llantas, etc)	7.000	[CL\$/viaje]
Número de viajes necesarios	222	[viaje]
<b>Gasto transporte</b>	<b>1.555.556</b>	<b>[CL\$]</b>
Potencia de un ventilador	250	[W/vent]
Cantidad de ventiladores	9	[vent]
Semanas al año ventiladores operando	20	[sem]
Horas diarias ventiladores operando	8,5	[hr/día]
Tiempo al año ventiladores operando	4.284.000	[s]
Consumo total ventiladores	2.678	[kWh]
Precio kilowatt-hora	99	[CL\$/kWh]
<b>Gasto electricidad</b>	<b>265.094</b>	<b>[CL\$]</b>
<b>Costos variables anuales</b>	<b>17.938.348</b>	<b>[CL\$]</b>

## 7.4 Costos fijos anuales.

Los costos fijos anuales de la planta están asociados a cinco ítems:

$$C.F. = \{Sueldos\} + \{Arriendo terreno\} + \{Consumo picadora\} + \{Consumo minicargadora\} + \{Mantenimiento máquinas\} \quad (7.15)$$

Los consumos de la picadora y de la mini-cargadora son la cantidad de combustible que requieren para cortar las trozas y mover objetos pesados y es relativamente constante. El arriendo del terreno tiene un valor mensual fijo. La mantención de las máquinas también es una cantidad fija. El ítem sueldos se calcula en base al personal requerido para la administración a lo largo del año y el personal de planta. Este último se calcula dividiendo las etapas de funcionamiento de la planta en 3:

- Época de picado y llenado: 3 meses, septiembre-octubre-noviembre.
- Época de secado: 5 meses, diciembre-enero-febrero-marzo-abril.
- Época de distribución: 4 meses, mayo-junio-julio-agosto.

Es importante notar que el sub-periodo de secado 1 comienza a finales de noviembre pero durante esas semanas es pronosticable que el ordenamiento de los últimos SSTI-pi aún continuará. En el mes de abril, que si bien se incorpora en la época de secado, ya no debería realizarse el proceso de secado sino que debería estar preparándose la logística asociada a la época de distribución a los clientes.

En función de estas tres etapas se calculan los sueldos de los trabajadores de planta:

$$Sueldos = (Trab\ picado \cdot 3 + Trab\ secado \cdot 5 + Trab\ distrib \cdot 4) \{Mensualidad\ planta\} \quad (7.16)$$

La Tabla 32 muestra los valores de todos los parámetros involucrados en los costos fijos.

**Tabla 32: Valor asociado a los ítems relevantes para el cálculo de los costos fijos anuales.**

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Número de trab planta Sep-Oct-Nov		4	[ ]
Número de trab planta Dic-Ene-Feb-Mar-Abr		1	[ ]
Número de trab planta May-Jun-Jul-Ago		4	[ ]
Número de trabajadores administración		1	[ ]
Sueldo mensual trabaj planta		300.000	[CL\$/mes]
Sueldo mensual trabaj administración		500.000	[CL\$/mes]
<b>Gasto en sueldos</b>		<b>15.900.000</b>	<b>[CL\$]</b>
Arriendo terreno		150.000	[CL\$/mes]
<b>Gasto arriendo terreno</b>		<b>1.800.000</b>	<b>[CL\$]</b>
<b>Gasto combustible mini-cargadora</b>		<b>377.000</b>	<b>[CL\$]</b>
<b>Gasto combustible picadora de leña</b>		<b>754.000</b>	<b>[CL\$]</b>
<b>Mantenimiento de las máquinas</b>		<b>1.000.000</b>	<b>[CL\$]</b>
<b>Costos fijos anuales</b>		<b>19.831.000</b>	<b>[CL\$]</b>

## 7.5 Depreciación anual y valor residual.

Las maquinarias, los equipos, las estructuras, los caminos y los camiones repartidores están sometidos a depreciaciones y poseen un valor residual al final del horizonte del proyecto que debe considerarse. La depreciación se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Depreciación \left[ \frac{US\$}{año} \right] = \frac{Costo [US\$]}{Vida\ útil [año]} \quad (7.17)$$

La vida útil de los activos puede obtenerse desde el Portal del SII. A su vez, el valor residual de los activos se calcula como sigue:

$$VRes [US\$] = Costo [US\$] - Depreciación \left[ \frac{US\$}{año} \right] \cdot Horizonte\ proyecto [año] \quad (7.18)$$

La Tabla 33 resume el costo inicial, la depreciación y el valor residual de los activos del proyecto base que el SII considera depreciables.

Tabla 33: Depreciación anual y valor residual de los activos que pueden someterse a tal régimen de acuerdo a los criterios del Servicio de Impuestos Internos.

Variable	Costo inicial [CL\$]	VU [año]	Dep [CL\$/año]	VRes [CL\$]
Maquinarias y equipos	27.384.000	15	1.825.600	14.604.800
Estructuras y caminos	13.749.200	20	687.460	8.936.980
Camiones repartidores y cargadora	14.000.000	7	2.000.000	0
<b>Total</b>			<b>4.513.060</b>	<b>23.541.780</b>

## 7.6 Préstamos e intereses.

Para realizar el flujo de caja en distintos escenarios de financiamiento es necesario calcular, en primer lugar, el monto del préstamo:

$$\text{Préstamo[CL\$]} = \text{Fracción financiada[\%]} \cdot \text{Inversión Inicial[CL\$]} \quad (7.19)$$

Luego se calcula la cuota anual que se debe desembolsar:

$$\text{Cuota} \left[ \frac{\text{CL\$}}{\text{año}} \right] = \frac{\text{Préstamo[CL\$]} \cdot \text{int}[\%]}{\left( 1 - \frac{1}{(1 + \text{int})^{n^{\text{cuotas}}}} \right)} \quad (7.20)$$

En donde el número de cuotas, medido en [año], corresponde al horizonte del proyecto.

Una vez definido el monto de la cuota, se debe proceder a calcular el interés, la amortización y el saldo para un año  $i$ ,  $i \in \mathbb{Z}[1, \text{vida útil proyecto}]$ :

$$\text{Intereses}_i = \text{Saldo}_{i-1} \cdot \text{int} \quad (7.21)$$

$$\text{Amortización}_i = \text{Cuota} \cdot \text{Intereses}_i \quad (7.22)$$

$$\text{Saldo}_i = \text{Saldo}_{i-1} - \text{Amortización}_i \quad (7.23)$$

Además se define la condición inicial:

$$\text{Saldo}_0 = \text{Préstamo} \quad (7.24)$$

Con el set de ecuaciones recién entregadas se puede obtener la información necesaria para plantear la estructura de pago de cualquier préstamo.

## 7.7 Flujo de caja del proyecto base.

Todos los flujos de caja entregados más adelante asumen que  $E$  se mantiene constante a partir del segundo año y que en el primer año se alcanza sólo 2/3 del valor de  $E$ . Además, se asume que no hay desfase entre los pagos de los costos y los flujos de ingreso por lo que no hay capital de trabajo a considerar.

El proyecto base contempla una vida útil del proyecto de 7 años. No se escoge un horizonte más extenso para el proyecto base ya que debe contemplarse la posibilidad de un cambio de tecnología a mediano plazo que podría eventualmente modificar las características del negocio de la leña.

La evaluación del proyecto base se realizó considerando tres escenarios de financiamiento:

- I. Proyecto puro (sin préstamo).
- II. Préstamo de un 50%.
- III. Préstamo de un 100%.

Para una tasa de descuento del 11% y una tasa de interés del 8% (Avila, 2011), la Tabla 34 entrega los principales indicadores de los tres escenarios de financiamiento. Los flujos de caja completos y las estructuras de pago de los préstamos pueden encontrarse en el Anexo R.

**Tabla 34: Valor actual neto, tasa interna de retorno y periodo de recuperación de capital para los tres escenarios de financiamiento estudiados y una tasa de descuento del 11%.**

	VAN [CL\$]	TIR [%]	PRC [año]
<b>Sin préstamo (puro)</b>	14 800 000	17	5
<b>Préstamo 50%</b>	18 800 000	23	5
<b>Préstamo 100%</b>	22 900 000	59	3

Lo más destacable de la Tabla 34 es que los tres escenarios presentan valores actuales netos muy superiores a cero. Si se dividen por la vida útil del proyecto, se obtiene un VAN anual siempre superior a los 2,1 millones anuales. En consecuencia, el proyecto de planta de secado es, para todos los escenarios base, por un margen considerable más beneficioso que otros proyectos con tasa de descuento del 11%.

La tasa interna de retorno crece aceleradamente con el porcentaje de préstamo que se utilice para ejecutar la inversión. El escenario sin préstamo presenta una TIR de un 17%, valor que se encuentra por debajo del 20%, que es la TIR mínima deseada por Comercial Primavera. Esto implica que los escenarios con financiamiento son aquellos que resultan más atractivos para alcanzar la rentabilidad de negocio estipulada por la empresa.

Si bien el periodo de recuperación de capital del escenario con 100% de préstamo es considerablemente mayor, este indicador no representa una fuente decisiva para comparar los distintos escenarios y tan solo en caso de similitud de VAN y/o TIR puede poseer un verdadero impacto.

## 7.8 Análisis de sensibilidad.

Esta sección tiene como propósito analizar el comportamiento del proyecto si los valores supuestos en base a los cuales se construyeron los flujos de caja varían. La sensibilización se realizó modificando 5 variables en el proyecto puro más la tasa de interés para los proyectos con préstamo, tal y como se especifica a continuación:

- $\pm 5\%$  y  $\pm 10\%$  la producción anual de empaques de leña seca.

- $\pm 5\%$  el precio de venta del metro cúbico de leña.
- $\pm 10\%$  el precio de compra del metro-ruma de madera.
- $\pm 2\%$  la tasa de descuento del proyecto.
- $\pm 2\%$  la tasa de interés con la que se realizan los préstamos.
- $+5\%$  y  $+10\%$  el monto de la inversión inicial.

Los resultados del análisis de sensibilidad de las cinco primeras variables se resumen en la Tabla 35, mientras que los cambios provocados en los proyectos con préstamo por variaciones en la tasa de interés se muestran en la Tabla 36.

Tabla 35: Principales indicadores para el análisis de sensibilidad del proyecto puro.

Variable	Variación	VAN [CL\$]	TIR [%]
<b>Producción anual</b>	Aumento en 10%	26.900.000	21
	Aumento en 5%	21.000.000	19
	Disminución en 5%	8.600.000	14
	Disminución en 10%	2.400.000	12
<b>Precio de venta m<sup>3</sup> de leña</b>	Aumento en 5%	24.700.000	21
	Disminución en 5%	4.900.000	13
<b>Precio de compra metro-ruma</b>	Aumento en 10%	9.200.000	15
	Disminución en 10%	20.400.000	19
<b>Tasa de descuento</b>	Aumento en 2%	9.200.000	17
	Disminución en 2%	21.100.000	17
<b>Inversión inicial</b>	Aumento en 10%	9.200.000	14
	Aumento en 5%	12.000.000	16

Tabla 36: Principales indicadores para el análisis de sensibilidad de la tasa de interés sobre los proyectos con préstamo.

	Proyecto	VAN [CL\$]	TIR [%]
<b>Disminución de un 2% (<i>int</i> = 6%)</b>	50% préstamo	20.200.000	24
	100% préstamo	25.600.000	67
<b>Aumento de un 2% (<i>int</i> = 10%)</b>	50% préstamo	17.500.000	22
	100% préstamo	20.100.000	51

El análisis de sensibilidad permite detectar que la rentabilidad del proyecto de la planta de secado está severamente influenciada por el precio de venta del producto: una variación de un 1% de esta variable implica casi la misma fluctuación en puntos porcentuales de la TIR. Tras el precio de venta, la producción de leña seca le sigue en importancia. El precio de compra de las trozas de madera también es una variable relevante pero, en comparación a las dos anteriores, de menor impacto. Por último, una sub-estimación de un 5% de la inversión inicial no afecta apreciablemente al proyecto pero sub-estimaciones mayores hacen caer considerablemente el VAN.

Una posibilidad interesante de estrategia de negocio que se recomienda es la de, tras algunos años de adquisición de experiencia y establecimiento en el mercado, expandir la producción en al menos

dos SSTI-pi completos (800 [m<sup>3</sup>] adicionales) e idealmente en 5 (2000 [m<sup>3</sup>] adicionales), aumentando anualmente el precio en un 2% (500 [CL\$]).

Para los escenarios con financiamiento, la Tabla 36 muestra claramente que el proyecto con préstamo por el 50% de la inversión es relativamente insensible a variaciones en *int* ya que los cambios no modifican en más de un punto la TIR. Sin embargo el proyecto con 100% de préstamo es drásticamente afectado por *int*: 2 puntos de variación de la tasa alteran la TIR en 9 puntos porcentuales.

En base tanto a estimaciones previas como a los flujos de caja de los escenarios con financiamiento, Comercial Primavera contempla tomar un préstamo por el 70-80% de la inversión inicial. En consecuencia, es indispensable que la tasa de interés del préstamo sea negociada para que sea menor al 7% ya que, como muestra la Tabla 36, semejantes tasas benefician enormemente al proyecto. Además de tomar los créditos de la banca, es fundamental analizar las alternativas de financiamiento que ofrecen CORFO y FODAPE para empresas innovadoras y/o emprendimientos ya que los montos son entregados bajo condiciones mucho más favorables.

Ante un incremento de un 2% en el retorno ofrecido por otros proyectos disponibles para Comercial Primavera, el VAN asociado a la planta de secado se mantiene alejado de cero en más de 9 000 000 [CL\$]. No obstante, puede que este valor pase a ser insatisfactorio para las pretensiones de la empresa por lo que de existir otra iniciativa que sea excluyente con la planta de secado y cuya TIR para proyecto puro se estime entre 14 y 16% se deberán hacer evaluaciones adicionales más precisas.

Resulta notable que aún con la gran cantidad de escenarios estudiados el proyecto se mantenga como una alternativa rentable, con una TIR siempre superior a la tasa de descuento del 11%. No obstante, hay que resaltar que estos resultados son posibles sólo si la totalidad de la producción es vendida a un mismo precio. Aun cuando la demanda de leña seca en Osorno va muy probablemente a incrementarse sostenidamente, irrumpir en el mercado con una imagen corporativa distintiva y un servicio integral es importante para ocupar rápidamente una fracción de la oferta local.

## 8. Conclusiones.

Se realizó un exhaustivo análisis del sector forestal chileno y del mercado de la leña en el sur de Chile, estudiándose desde el consumidor individual hasta la exportación de celulosa. Este análisis arroja que el mayor valor de  $Y_{TOT}$  se obtiene para el eucalipto nitens, por lo que es la especie arbórea óptima para comercializar como leña certificada.

Se hizo una completa revisión del estado del arte de las tecnologías de secado de madera, poniendo particular hincapié en los secadores de tipo invernadero. En base a los requerimientos de la empresa, se determina que la mejor alternativa de secador es el secador solar tipo invernadero de pared inclinada (SSTI-pi), que es aquel que obtiene el mayor valor para  $Z_{TOT}$ .

El diseño de la planta de secado consiste en dividir la producción total en 5 secadores solares tipo invernadero de pared inclinada con 400 [m<sup>3</sup>] de capacidad cada uno que operan por convección forzada. Las dimensiones de cada SSTI-pi son:

- Largo = 34,6 [m]
- Ancho = 9,2 [m]
- Altura pared sur = 5,0 [m]
- Altura pared norte = 3,2 [m]
- $\theta = 11$  [°]

El diseño del colector de los secadores está compuesto por una cubierta única de polietileno, absorbedor de zincalum corrugado en V, aislante de lana mineral, circulación de aire de doble paso y sus dimensiones son:

- Largo = 31,4 [m]
- Ancho = 9,4 [m]
- Grosor = 0,9 [m]

Para obtener el mejor trade-off posible entre eficiencia del colector y temperatura de salida de este, se escoge una velocidad de 0,3 [m/s] para el aire que atraviesa el colector, lo que implica un caudal de aire en cada SSTI-pi de 2,45 [m<sup>3</sup>/s] y un tiempo de residencia del aire en el colector de 104,7 [s].

La evaluación económica realizada muestra que para todos los escenarios analizados y para todas las sensibilizaciones llevadas a cabo, el proyecto de planta de secado para comercializar leña seca es económicamente rentable. Sin embargo, solo algunos escenarios generan las utilidades esperadas por la empresa patrocinante.

Para alcanzar las metas pecuniarias deseadas por la empresa patrocinante, se recomienda elaborar un plan de negocio que en parte consista en (i) Acordar un préstamo por el 70-80% de la inversión inicial a una tasa de interés del 7% anual o menor, (ii) ejecutar el proyecto base hasta estandarizar el funcionamiento tanto de la planta como de las ventas, (iii) al tercer o cuarto año realizar una expansión de la producción de al menos 800 [m<sup>3</sup>] (idealmente duplicar el proyecto base) con un aumento anual de 2% en el precio de venta.

## 9. Bibliografía.

- ALARCÓN Araya, César. Rentabilidad integrada de un sistema de cortinas forestales productivas. INFOR-INIA, 2004. 13 p.
- Allwoodwork. Como secar madera con un horno solar. [En línea] Disponible en: <http://www.allwoodwork.com/article/woodwork/solarkiln.htm> [Última visita: febrero 2012]
- American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for gross calorific and ash value of waste materials. 2007. 8h.
- Atmosfera, meteorología interactiva. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. [En línea] Disponible en: <http://www.atmosfera.cl/HTML/climatologia/DATOS/CHILECENTRO.HTM> [Última visita: abril 2012]
- ANANÍAS, R.A., CERDA, C., CORTEZ, H. y HERNÁNDEZ, G. Impacto del precalentamiento en ambiente saturado sobre la velocidad del presecado de coigüe. IX Reunión de Investigación y Desarrollo en Productos Forestales, Concepción, Chile, 2000. Resumen.
- AUER, W.W. Drying '80. Hemisphere, Nueva York, Estados Unidos, 1980. p. 292.
- AVILA B., Walter. Ingeniero civil industrial miembro propietario de Comercial Primavera. Conversaciones privadas. Septiembre 2011.
- BELESSIOTIS, V. y DELYANNIS E. Solar drying. Solar Energy, 85: 1665-1691, 2011.
- BEN SLAMA, Rondhane. The air solar collectors: comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer. Solar Energy, 81:139-149, 2007.
- BERTRAN S., José y MORALES V., Eduardo. Potencial de biomasa forestal. Santiago, Chile. Comisión nacional de energía (CNE), 2008. 54 h.
- BHUSHAN, B. y SINGH, R. A review on methodology of artificial roughness used in duct of solar air heaters. Energy, 35:202-212, 2010.
- BOONE, R.S., KOZLIK, C.J., BOIS, P.J. Dry Kiln Schedules for commercial woods: temperate and tropical. General Technical Report FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1998, 158 p.
- Brenndorfer B., Kennedy L., Bateman C.O.O., Mrema G.C. y Wereko-Brobby C. Solar dryers - their role in post-harvest processing. Commonwealth Science Council, Commonwealth Secretariat Publications, London, 1985.
- BROCHE, W., ANANÍAS, R.A., SALINAS, C. y RUIZ, P. Modelación del secado convencional de coigüe, parte 2: resultados experimentales. Maderas, Ciencia y Tecnología, 4(1):69-76, 2002.

BURGOS Olavarría, Francisco. Caracterización energética de la biomasa en la región de los Ríos. En: Seminario Internacional de dendroenergía: Alternativa Energética para Chile. 28 de septiembre de 2011. Valdivia, Universidad Austral de Chile.

ChileBosques. Árboles nativos de Chile. [En línea]  
Disponible en: <<http://www.chilebosque.cl/tree.html>> [Última visita: abril 2012]

CHOUDHURY, C. y GARG H.P. Evaluation of jet plate solar air heater. Solar Energy, 46:199-209, 1999.

CONAF. Datos forestales acumulados por CONAF enviados de manera privada para la realización de esta memoria. Octubre 2011.

CONDORI, M., ECHAZÚ, R., SARAVIDA, L. Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse dryer. Renewable Energy, 22:447-460, 2001.

CONAMA y Universidad Católica de Temuco, UCT. Estudio de secado de leña y equivalencia de unidades de comercialización. 2005. 91 p. [En línea]  
Disponible en: <[www.sinia.cl/1292/articles-46039\\_recurso\\_1.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-46039_recurso_1.pdf)> [Última visita: junio 2012]

CORMA. Sector forestal en Chile. 2006 [en línea] Disponible en:  
<<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/NodosExcelencia/SectorForestalChile.pdf>>  
[Última visita: noviembre 2011]

CORMA. ¿Hacia dónde va la industria forestal chilena? La industria de la celulosa. 2009. [en línea]  
Disponible en:  
<[http://www.aipf.cl/subir/industria\\_celulosa\\_guillermo\\_mullins.pdf](http://www.aipf.cl/subir/industria_celulosa_guillermo_mullins.pdf)> [Última visita: noviembre, 2011]

Cloutier, A., Salvo, L. y Ananías, R. Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad específica transversal al gas del pino radiata. Maderas: Ciencia y Tecnología, 6(1):24-32, 2004.

CTB. Résumé de l'étude en cours on CTB sur l'utilisation de l'énergie solaire. Centre technique du Bois, París, Francia, 1978.

Dahlblom O., Petersson H. y Ormarsson S. Numerical simulation of the development of deformation and stress in wood during drying. Proceedings of the 4th IUFRO Wood Drying Symposium, 1994, 165-180, Rotorua, New Zealand.

DAVIS, Cory Philip. Drying Pinus Radiata boards in dehumidifier conditions. Tesis (Doctor en Física). Dunedin, Nueva Zelandia. Universidad de Otago, Departamento de Física, 2001.

DE LA CASTILLEJA Mendoza, Rodrigo. Diseño y estudio de factibilidad técnico-económica de una central con tecnología solar comprimida. Memoria (Ingeniería civil eléctrica). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2008. 97 h.

DERNEDDE, W. y PETERS H. Landtechnik, 29, 1978.

DIAZ Alvarado, Felipe. Estudiante de doctorado en ingeniería química en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Conversaciones privadas. 2012.

Dirección meteorológica de Chile, informe de precipitaciones. [En línea] Disponible en:  
< [http://www.meteochile.gob.cl/climas/climas\\_decima\\_region.html](http://www.meteochile.gob.cl/climas/climas_decima_region.html) > [Última visita: noviembre 2011]

Edición especial, Sunworld. 4:179, 1980.

EducarChile, Geografía y Clima de la X región de Los Lagos. [En línea] Disponible en:  
<<http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/VerContenido.aspx?ID=130238>> [Última visita: abril 2012]

EducarChile, mapa climatológico del sur de Chile. [En línea] Disponible en:  
<[http://www.educarchile.cl/UserFiles/P0001/Image/CR\\_Imagen/Mapas%20IGM/mapas\\_chile/climas.gif](http://www.educarchile.cl/UserFiles/P0001/Image/CR_Imagen/Mapas%20IGM/mapas_chile/climas.gif)  
> [Última visita: abril 2012]

EKECHUKWU, O.V. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. Tesis de doctorado, Cranfield Institute of Technology, United Kingdom, 1987.

EKECHUKWU, O.V. y NORTON, B. Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. Energy Conversion and Management, 40:657-667, 1999.

Esfera Verde, Portal educativo de INFOR. Fichas de especies. [En línea] Disponible en:  
<[http://www.laesferaverde.cl/bo\\_fdei.htm](http://www.laesferaverde.cl/bo_fdei.htm)> [Última visita: abril 2012]

Forestal Arauco. El mercado del eucalipto. Santiago, Chile. Septiembre 2007.

Genskow, L.R., Beimesch, W.E., Hecht, J.P., Kemp, I., Langrish, T., Schwartzbach, C., Smith, F.L. Psychrometry, Evaporative Cooling, and Solids Drying. En: Perry, R.H. y Green, D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Estados Unidos, McGraw-Hill, 2008, capítulo 12.

GEREKE, T. y NIEMZ, P. Moisture-induced stresses in spruce cross-laminates. Engineering Structures, 32(2):600-606, 2010.

Gobierno regional de Los Lagos. Estadísticas población y superficie. [En línea] Disponible en:  
<[http://www.goreloslagos.cl/estadisticas/poblacion\\_superficie](http://www.goreloslagos.cl/estadisticas/poblacion_superficie)> [Última visita: abril 2012]

Gómez-Lobo, A., Lima, J.L., Hill, C., Meneses, M. Diagnóstico del mercado de la leña en Chile. Departamento de Economía, Universidad de Chile, 2006, 157 p.

HAILWOOD, A.J. y HORROBIN, S. "Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model". Trans. Faraday Society, 42B: 84-102, 1946.

HAQUE, M.N. y LANGRISH, T.A.G. Assessment of the actual performance of an industrial solar kiln for drying timber. Drying Technology, 23(7):1541-1553, 2005.

HAYGREEN John, G. y BOWYER Jim, L. Forest products and wood science: an introduction. Ames, Iowa, Iowa State Univ. Press, 1982. 495p.

HILDERBRAND, R. The drying of sawn timber. Nürtingen. Hilderbrand Maschinenbau. 1989.

Hottel, H.C., Noble, J.J., Sarofim, A.F., Silcox, G.D., Wankat, P.C. y Knaebel, K.S. Heat and Mass Transfer. En: Perry, R.H. y Green, D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Estados Unidos, McGraw-Hill, 2008, capítulo 5.

HUECHAN Quintana, Alina Marisol. Análisis de subcuencas en torno al Lago Ranco, provincia de Valdivia, X región. Tesis (título de profesora de historia, geografía y educación cívica). Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de Filosofía y Matemáticas, 1997. 56 h.

IMRE, L., KISS, L.I. y MOLNÁR, K. En: Proceedings of the third international drying symposium (1982), Wolverhampton, Inglaterra, Drying Research Limited, 1982, p. 370.

IMRE, Lázló. Solar drying. En: MUJUMBAR, A.S. Handbook of industrial drying. Tercera edición. Estados Unidos. CRC Press. 2006. pp 333-387.

INFOR. El sector forestal chileno. Boletín número 46. Santiago, Chile, 2009, 12 p.

INFOR. Estimación de la superficie de bosques plantados por especie según región (a diciembre 2008). Santiago, Chile. 2010.

INFOR. Mercado Forestal. Boletín trimestral. (46): 3-6, octubre 2011.

ITURRIAGA, Carola y NEIRA, Eduardo. Utilización residencial de leña como combustible en la ciudad de Puerto Montt. Revista Bosque Nativo (43): 3-8. Diciembre 2008.

JAIN, D. y TIWARI, G.N. Thermal aspects of open sun drying of various crops. Energy, 28: 37-54, 2003.

JAIRAJ, K.S., SINGH S.P. y SRIKANT K. A review of solar dryers developed for grape drying. Solar Energy, 83(1): 1698-1712, 2009.

JARA Soto, Brigitte Solange. Evaluación técnico y económica de una planta de secado y cepillado de madera en la VIII región. Memoria para título de ingeniero civil industrial. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2006, 98 p.

JASEN Arriagada, Claudio Marcelo. Estudio de factibilidad técnico-económico de instalar una empresa de secado de madera. Memoria para título de ingeniero civil industrial. Santiago, Chile Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 1989, 147 h.

KAMKE, F.A. y CASEY, L.J. Gas pressure and temperature in the mat during flakeboard manufacture. Forest Products Journal, 38:41-43, 1988.

KARABAGLI, A., MOUGEL, E., CHRUSCIEL, L., ZOULALIAN, A. Study on a low temperature convective wood drier: Influence of some operating parameters on drier modelling and on quality of dried wood. Holz Roh Werkstoff, 55:221-226, 1997.

KARIM, M.A. y HAWLADER, M.N.A. Development of solar air collectors for drying applications. Energy Conversion and Management, 45:329-344, 2004.

KARSLI, Suleyman. Performance analysis of new-design solar air collectors for drying applications. Renewable Energy, 32:1645-1660, 2007.

KEEY, R.B., LANGRISH, T.A.L., WALKER, J.C.F. The Kiln-drying of lumber. Alemania. Springer. 2000.

KOYUNCU, Turham. Performance of various designs of solar air heaters for crop drying applications. Renewable Energy, 31:1073-1088, 2006.

La zona de sombra pluviométrica en la X región y su impacto agronómico por Patricio Montaldo B., Rafael Pessot Z., Ricardo Fuentes P., Isacio Saralegui M. Agricultura técnica, 47(4):340-344, 1987.

LASSERRE Fischman, Luis Felipe. Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta de aserrío, secado y remanufactura para madera de exportación. Memoria para título de ingeniero civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2002, 214 p.

LIDE, D.R. Handbook of chemistry and physics. 76va edición. Estados Unidos. CRC Press. 1995.

LUENGO, Daniel. Ingeniero forestal gerente general de Hacienda Trinidad (fundo de 5000 [ha] de la comuna de San Pablo, provincia de Osorno). Conversaciones privadas. Septiembre 2011.

LUNA, D. NADEAU, J.-P., JANNOT, Y. Solar timber kilns: state of the art and foreseeable developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13: 1446-1455. 2009.

LURASCHI, Marco. Análisis de la cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: estudio del caso de Chile. Santiago, Chile. CEPAL, 2007, 93 p.

LUTZ, K., MUHLBAUER, W., MULLER, J. y REISINGER, G. Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zones. Solar and Wind Technology, 4(4): 417-424, 1987.

MARDONES, F. Establecerán uso obligatorio de leña certificada [en línea] Diario electrónico de Radio Universidad de Chile, 23 de junio de 2009.

Disponible en: <<http://radio.uchile.cl/noticias/53656/>> [Última visita: noviembre 2011]

NEIRA, Eduardo. Dendroenergía: una fuente más de energía renovable. En: Seminario Internacional de dendroenergía: Alternativa Energética para Chile. 28 de septiembre de 2011. Valdivia, Universidad Austral de Chile.

ÖZISIK, M.N., HUANG, B.K. y TOKSOY, M. Solar Energy, 24(4):397-401, 1980.

ÖZTÜRK, H.H. y DEMIREL, Y. Exergy-based performance analysis of packed-bed solar air heaters. International Journal of Energy Research, 28:423-32, 2004.

Parker, B.F., Lindley, M.R., Colliver, D.G. y Murphy, W.E. Thermal performance of three solar air heaters. Solar Energy, 51:467-479, 1993.

Parque nacional Puyehue. [En línea]

Disponible en: <<http://www.parquepuyehue.cl>> [Última visita: noviembre 2011]

PERRÉ, P. The numerical modeling of physical and mechanical phenomena involved in wood drying: an excellent tool for assisting with the study of new processes. En: International IUFRO Wood Drying Conference, quinta edición, 1996. Quebec, Canadá. 1996, 9-38.

PERRÉ, P. The drying of wood: the benefit of fundamental research to shift from improvement to innovation. En: CONFERENCIA internacional IUFRO (7°, Tokio, Japón, 2001). Proceedings. p 2-13. 2001.

PERRÉ, P. y TURNER I.W., Determination of the material property variations across the growth ring of softwood for use in a heterogeneous drying model, part I, capillary pressure, tracheid model and absolute permeability correlations, Holzforschung J., 55(3):318-323, 2001.

PERRÉ, P. y TURNER I.W., Determination of the material property variations across the growth ring of softwood for use in a heterogeneous drying model, part II, the use of homogenisation to predict bound liquid diffusivity and thermal conductivity correlations, Holzforschung J., 55(4):417-425, 2002.

PERRÉ, P. y KEYE R.B. Drying of wood: Principles and practices. En: Mujumbar, A.S. Handbook of industrial drying, 3ra edición, Estados Unidos, CRC Press, 2006, pp 822-872.

PUIGGALI, J.R. y LARA, M.A. En: Proceedings of the third international drying symposium (1982), Wolverhampton, Inglaterra, Drying Research Limited, 1982, p. 390.

READ, W.R., A. CHODA y P.I. COPPER. A solar timber kiln. Solar Energy, 15(4): 309-310, 1974.

REYES, René. Caracterización de los sistemas de Producción y Comercialización de leña para la ciudad de Puerto Montt. Tesis (título de ingeniero forestal). Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Forestales y de Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, 2000. 95 p.

RIETZ, Raymond C. y PAGE, Rufus H. Air drying of lumber, a guide to industry practice. 2ª edición. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. 1999, 62 p.

ROCHA, Carola. Estudiante de Ingeniera forestal de la UACH cuya memoria analiza los poderes caloríficos en función de sección del árbol que se analiza. Conversaciones privadas. 2011.

SCHIAPPACASSE, Nicolás. Impactos en la salud de la población por uso de leña en estufas y cocinas. En: Seminario Internacional de dendroenergía: Alternativa Energética para Chile. 28 de septiembre de 2011. Valdivia, Universidad Austral de Chile.

SCHIFFMANN, R.F. Microwave and dielectric drying. En: MUJUMBAR, A.S. Handbook of industrial drying. Tercera edición. Estados Unidos. CRC Press. 2006. pp 286-305.

SELCUK, M.K., ERSAY, Ö. y AKYURT, M. Solar Energy, 16:81, 1974.

Servicio de Impuestos Internos. Nueva tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado [en línea]  
Disponible en: [http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla\\_vida\\_enero.htm](http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm) [Última visita: abril 2012]

SETHI, V.P. y ARORA, S. Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. Solar Energy, 83(1): 1472-1484, 2009.

SIMPSON, W., BOONE, S., CHERN, J. y MACE, T. Kiln drying time of split oak firewood. Estados Unidos: Departamento de Agricultura, Forest Products Laboratory. 1987. 6p.

SIMPSON, W.T. Specific gravity, moisture content, and density relationships for wood. General Technical Report, FPL-GTR-76. Madison, Estados Unidos: Departamento de Agricultura, Forest Products Laboratory. 1991. 13p.

Sistema Nacional de Certificación de Leña. Senador Patricio Walker propone subsidios para compra de leña seca y certificada [en línea] Portal del sistema nacional de certificación de leña (SNCL), 10 de junio de 2011.

Disponible en: <<http://www.lena.cl/?q=node/1094>> [Última visita: abril 2012]

Sistema Nacional de Certificación de Leña. Manual para la certificación de comerciantes de leña [en línea] Disponible en:

<[http://www.lena.cl/documentos/Documentos\\_oficiales/Manual\\_Certificacion\\_comerciantes.pdf](http://www.lena.cl/documentos/Documentos_oficiales/Manual_Certificacion_comerciantes.pdf)> [Última visita: abril 2012]

Sistema Nacional de Certificación de Leña. Universidad de Rottenburg firmó convenios con C. de certificación de leña y U. Austral y UCT para desarrollar biomasa forestal. [En línea]

Disponible en: <<http://www.lena.cl/?q=node%2F1217>> [Última visita: abril 2012]

Sistema Nacional de Certificación de Leña. Instructivo a servicios públicos para comprar leña certificada. [En línea]

Disponible en: <<http://www.lena.cl/?q=node/992>> [Última visita: abril 2012]

SMITH, W.B., y SMITH, A. Radio frequency/Vacuum drying of red oak: energy quality value. En: IUFRO Wood Drying Symposium, 1994. Rotorua, Nueva Zelanda. 1994, 263-270.

SUBIABRE, Ariela y ROJAS, Carlos. Geografía física de la región de los Lagos. Valdivia, Chile. Ediciones Universidad Austral de Chile, 1994. 118 p.

Surlink. Osorno al filo del colapso por contaminación [en línea] Portal de noticias Surlink, 12 de enero de 2010.

Disponible en: <[http://www.surlink.cl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4397:osorno-al-filo-del-colapso-por-contaminacion&catid=62:osorno&Itemid=84](http://www.surlink.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=4397:osorno-al-filo-del-colapso-por-contaminacion&catid=62:osorno&Itemid=84)> [Última visita: abril 2012]

TORRES, C. El 95% de la contaminación de Temuco corresponde a emisiones más dañinas [en línea]

Diario Austral de Temuco, 2 de febrero de 2009. Disponible en:

<[http://www.australtemuco.cl/prontus4\\_noticias/site/artic/20090202/pags/20090202023309.html](http://www.australtemuco.cl/prontus4_noticias/site/artic/20090202/pags/20090202023309.html)> [Última visita: abril 2012]

Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) junto a la Comisión Nacional de Energía (CNE).

Irradiancia solar en territorios de la república de Chile..Santiago de Chile, 2008.

VENEGAS S., Andrés. Sistema nacional de certificación de leña. [En línea]

<[http://www.gtz-cepal.cl/files/andres\\_venegas.pdf](http://www.gtz-cepal.cl/files/andres_venegas.pdf)> [Última visita: noviembre 2011]

VILLARROEL Córdova, Paula Alejandra. Análisis económico de una aplicación de riego por aspersión sobre una plantación de eucalyptus nitens (Deane & Maiden) maiden establecida en un suelo rojo arcilloso del valle central de la VIII región, Chile. Tesis (ingeniería forestal). Temuco, Chile. Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, 2004. 123 h.

WENGERT, E.M. y OLIVEIRA, L.C. Solar heated, lumber dry kiln designs: A discussion and a compilation of existing solar heated lumber dry kiln designs. Brooks Forest Products Center, Virginia Polytechnic Institute and State University. 1987. [En línea]

[http://www.woodweb.com/knowledge\\_base/Solar\\_Kiln\\_Designs\\_1.html](http://www.woodweb.com/knowledge_base/Solar_Kiln_Designs_1.html) [Última visita: abril 2012]

WHITE, R.H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. Wood and Fiber Science, 19(4):11-19, 1986.

WIBULSWAS, P. y NIYOMKARN, C. En: Registers of the Workshop on solar drying (1980). CNED-UNESCO, Manila, Filipinas. p.1

WIENEKE, W. Agricultural Mechanization in Asia, Autumn, 11, 1980.

Wijesundera, N.E., Lee, Lee Ah y Lim, Ek Tijoe. Thermal performance study of two pass solar air heaters. Solar Energy, 28:363-370, 1982.

YEH, H.M. y TING, Y.C. Efficiency of solar air heaters packed with iron fillings. Energy, 13(7):543-9, 1988.

Zhai, X.Q., Dai, Y.J. y Wang, R.Z. Experimental investigation on air heating and natural ventilation of a solar air collector. Energy and Buildings, 37:373-381, 2005.

## Anexo A: Abundancia relativa de las especies plantadas en Chile.

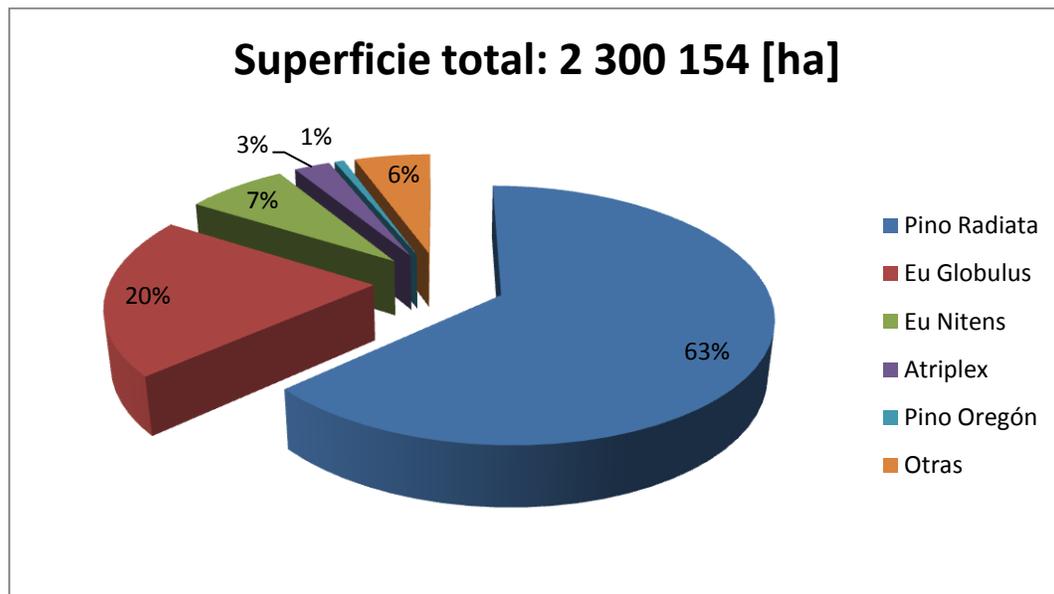


Figura 50: Abundancia relativa de las principales especies arbóreas plantadas en Chile para una superficie total de 2 300 154 [ha]. Fuente: INFOR, 2010.

## Anexo B: Características de las especies arbóreas plantadas en Chile.

### 1. Pináceas (*Pinaceae*).

La familia de las pináceas agrupa alrededor de 220 especies de coníferas diferentes, originarias en su totalidad del hemisferio norte.

Al igual que con todas las gimnospermas, la madera de pinácea es anatómicamente clasificable como madera blanda.

#### a) Pino radiata (*Pinus radiata*).

También conocido como pino insigne, es una especie originaria de California. Se desarrolla mejor en suelos silíceos y muy profundos. Es un árbol de fuste recto y puede alcanzar hasta 50 [m] de altura y 1,5 [m] de diámetro (Portal Esfera Verde).

El éxito que ha tenido en Chile es atribuible a su notable adaptabilidad: mantiene altas tasas de crecimiento en muchos suelos diferentes que pueden variar tanto en morfología (se planta desde la quinta región hasta la décima región) como en altitud (hasta 1000 [m.s.n.m]).

Las dificultades que pueden limitar su distribución son los periodos secos prolongados, los suelos excesivamente arcillosos y la presencia de nieve. La rotación de los cultivos de pino radiata es de entre 17 y 19 años.

#### b) Pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*).

Especie originaria del oeste de América del Norte (desde Canadá hasta México), alcanza 70 [m] de altura y 70 [cm] de diámetro. Su madera es muy apreciada para productos ornamentales por su característico color rojizo, su vistosa veta y resistencia.

El pino oregón presenta dos diferencias principales con el pino radiata. La primera es que posee una mayor tolerancia a las bajas temperaturas, por lo que es recomendado para ser plantado en la precordillera desde la VIII hasta la X región, mientras que el pino radiata crece óptimamente en las zonas costeras. La segunda es que el pino oregón es de crecimiento más lento: el periodo de rotación del oregón suele ser la mitad del periodo de rotación del pino radiata (Alarcón, 2003).

### 2. Eucalipto (*Eucalyptus*).

Prácticamente todas las especies de eucalipto (más de 700) son originarias de Australia y Tasmania. Si bien existe una considerable variabilidad silvícola entre diferentes especies de eucaliptos, estas presentan rasgos distintivos que les son comunes y se mencionan a continuación.

Los eucaliptos prefieren terrenos ligeramente ácidos por lo que son comúnmente plantados para reducir la salinidad de suelos. Poseen una altísima capacidad de absorción de humedad a través del proceso de transpiración por lo que suelen utilizarse para sanear zonas pantanosas o reducir la tabla de agua en cuencas. Por otro lado, esta característica los transforma en una especie muy agresiva para

todo el ecosistema huésped, pudiendo fácilmente desecar la tierra en donde ha sido plantado. Sin embargo las raíces que poseen no superan los 2,5 metros de largo por lo que no alcanzan el nivel freático, es decir, riego y/o lluvias pueden volver a humedecer el suelo.

Al igual que con todas las angiospermas, la madera de eucalipto es anatómicamente clasificable como madera dura.

a) Eucalipto globulus (*Eucalyptus globulus*).

Es la especie de eucalipto más plantada tanto en Chile como en el mundo. Se desarrolla sobre un amplio rango de sustratos, pero se ubica especialmente sobre suelos derivados de rocas graníticas, limosos, de buen drenaje y sobre todo con buen contenido de humedad.

En condiciones favorables alcanza hasta 70 [m] de altura y 2,3 [m] de diámetro, con un fuste recto hasta las dos terceras partes de la altura total del árbol, por lo que un sólo ejemplar puede entregar grandes cantidades de madera aserrable de gran calidad (Portal Esfera Verde).

Esta especie se recomienda para ser plantada en zonas con más de 600 [mm] de precipitaciones anuales y libres de heladas severas ya que suele no soportar temperaturas inferiores a -4 [°C]. Aún cuando puede sobrevivir, su tasa de crecimiento se ve fuertemente disminuida.

El globulus alcanza un rendimiento óptimo entre los 18 y 20 años (Luengo, 2011), por lo que su periodo de rotación es muy similar al del pino radiata.

b) Eucalipto nitens (*Eucalyptus nitens*).

Al igual que el globulus, el nitens puede alcanzar los 70 [m] de altura y sobrepasar los 2 [m] de diámetro en condiciones favorables.

Su desarrollo óptimo se da a una altitud de 1000 a 2000 [m.s.n.m] en regiones que posean precipitaciones superiores a los 1000 [mm] anuales.

El nitens ha cobrado gran importancia en Chile ya que es la especie de más rápido crecimiento plantada en el país: su periodo de rotación es de entre 12 y 14 años (Villaruel, 2004). Sin embargo, los periodos cortos de rotación que le son propios van en desmedro de la densidad de su madera, que es considerablemente menor que la del globulus (más información en la sección 2.3).

La mayor ventaja que posee el nitens por sobre el globulus es su gran resistencia al frío, pudiendo desarrollarse aún durante prolongadas heladas de hasta -15 [°C]. Por ende, puede plantarse en zonas térmicamente intolerables para el globulus.

## Anexo C: Plantaciones de pino y eucalipto por regiones.

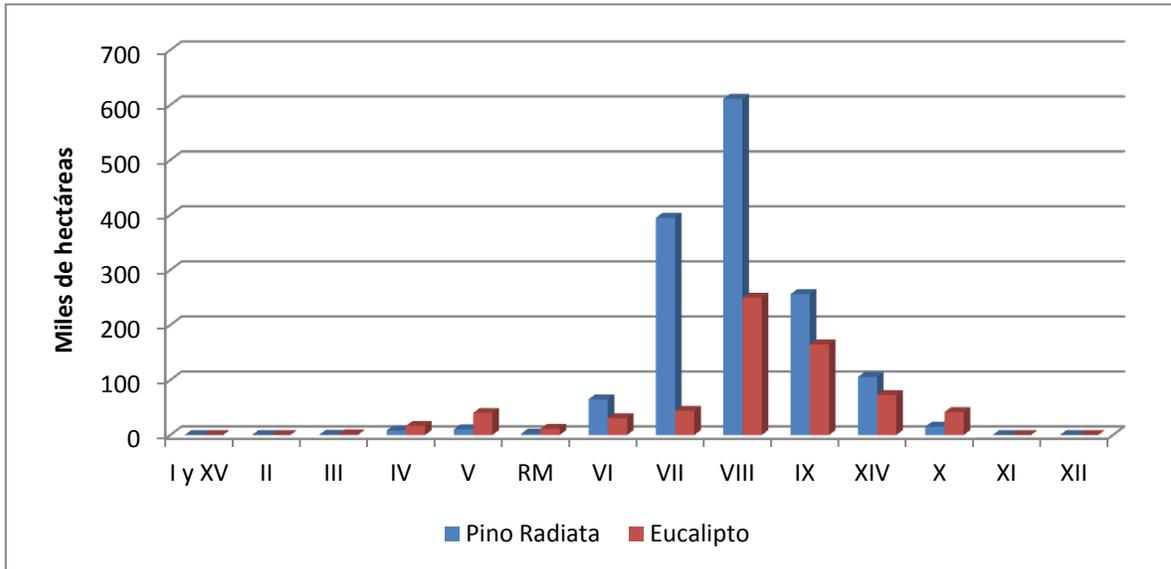


Figura 51: Plantaciones de pino radiata y de eucalipto por regiones. Fuente: Luraschi, 2007.

## Anexo D: Mapa de las zonas madereras de Chile.

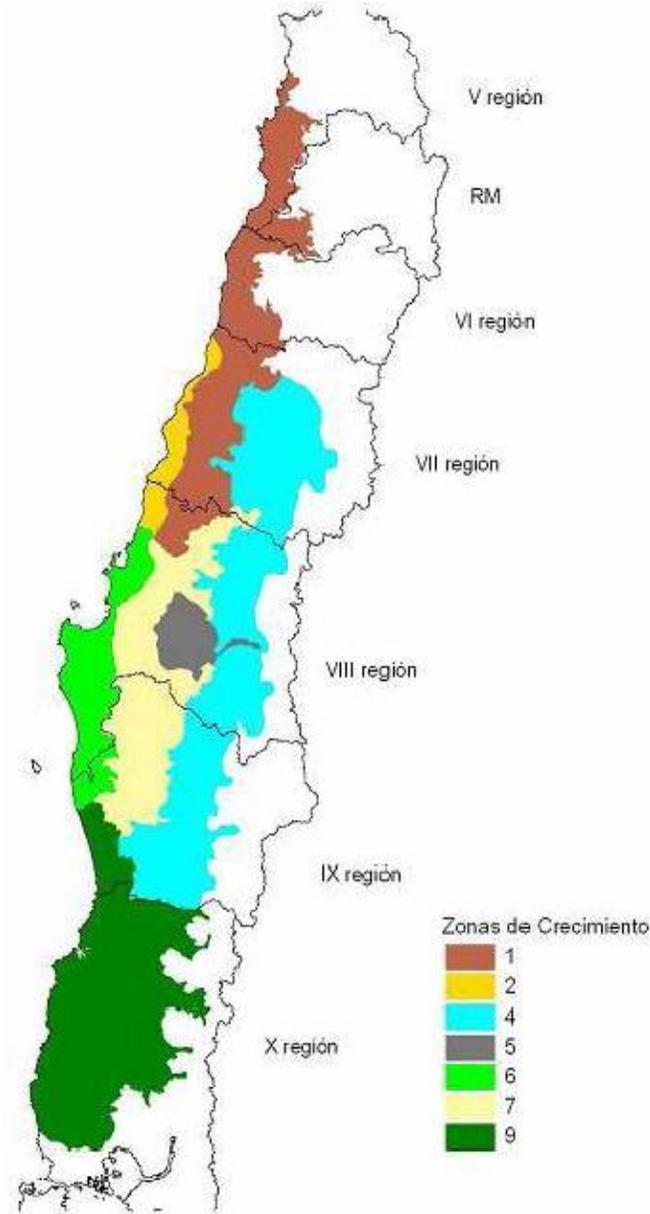


Figura 52: Zonas de crecimiento, sumamente similares a las zonas climatológicas, de acuerdo a las cuales la Tabla 9 es presentada. Fuente: Forestal Arauco, 2007.

## Anexo E: Tablas anuales de superficies forestadas y reforestadas en Osorno.

Tabla 37: Superficies forestadas y reforestadas durante el año 2006 para las cuatro principales especies arbóreas y para cada comuna de la provincia de Osorno. Fuente: Elaboración propia a partir de CONAF, 2011.

Comuna	Euc Nit [%]	Euc Glo [%]	Pino Rad [%]	Pino Ore [%]	Otros [%]	Sup total [ha]
<b>Osorno</b>	63,6	7,2	19,9	0,9	8,5	147
<b>Purranque</b>	38,6	54,8	6,7	0	0	864
<b>Puerto Octay</b>	54,1	45,9	0	0	0	16
<b>Puyehue</b>	100	0	0	0	0	43
<b>Río Negro</b>	44,7	0,1	49,8	0,7	4,4	769
<b>S. J. de la Costa</b>	66,1	1	29,3	0,2	2,8	766
<b>San Pablo</b>	67,1	17,5	14,4	0	0,9	188

Tabla 38: Superficies forestadas y reforestadas durante el año 2007 para las cuatro principales especies arbóreas y para cada comuna de la provincia de Osorno. Fuente: Elaboración propia a partir de CONAF, 2011.

Comuna	Euc Nit [%]	Euc Glo [%]	Pino Rad [%]	Pino Ore [%]	Otros [%]	Sup total [ha]
<b>Osorno</b>	20,3	37,1	39,8	0	1,6	62
<b>Purranque</b>	28,6	60,1	11,3	0	0	1070
<b>Puerto Octay</b>	100	0	0	0	0	2,4
<b>Puyehue</b>	30,7	69,3	0	0	0	6,5
<b>Río Negro</b>	89,3	1	8,4	0	1,3	169
<b>S. J. de la Costa</b>	65,4	0,2	25,4	1,3	7,7	709
<b>San Pablo</b>	29,4	1,6	44,9	0	24,1	152

Tabla 39: Superficies forestadas y reforestadas durante el año 2008 para las cuatro principales especies arbóreas y para cada comuna de la provincia de Osorno. Fuente: Elaboración propia a partir de CONAF, 2011.

Comuna	Euc Nit [%]	Euc Glo [%]	Pino Rad [%]	Pino Ore [%]	Otros [%]	Sup total [ha]
<b>Osorno</b>	73,4	0	22	0	0	113
<b>Purranque</b>	29,7	61,1	9,1	0	0	801
<b>Puerto Octay</b>	-	-	-	-	-	0
<b>Puyehue</b>	-	-	-	-	-	0
<b>Río Negro</b>	48,3	0	51,7	0	0	324
<b>S. J. de la Costa</b>	71,3	2	26,1	0,3	0,3	418
<b>San Pablo</b>	43,6	0	2,4	4,6	49,3	115

Tabla 40: Superficies forestadas y reforestadas durante el año 2009 para las cuatro principales especies arbóreas y para cada comuna de la provincia de Osorno. Fuente: Elaboración propia a partir de CONAF, 2011.

Comuna	Euc Nit [%]	Euc Glo [%]	Pino Rad [%]	Pino Ore [%]	Otros [%]	Sup total [ha]
<b>Osorno</b>	73,1	1,2	24,6	0,6	0,4	163
<b>Purranque</b>	51,4	44,1	4,6	0	0	821
<b>Puerto Octay</b>	-	-	-	-	-	0
<b>Puyehue</b>	-	-	-	-	-	0
<b>Río Negro</b>	78,2	1,5	16,1	2,3	2	335
<b>S. J. de la Costa</b>	15,4	0,8	69	1	13,9	312
<b>San Pablo</b>	15,4	0	80,1	0,7	3,8	109

Tabla 41: Superficies forestadas y reforestadas durante el año 2010 para las cuatro principales especies arbóreas y para cada comuna de la provincia de Osorno. Fuente: Elaboración propia a partir de CONAF, 2011.

Comuna	Euc Nit [%]	Euc Glo [%]	Pino Rad [%]	Pino Ore [%]	Otros [%]	Sup total [ha]
<b>Osorno</b>	31,6	4,2	61,5	2,7	0	95
<b>Purranque</b>	51,6	33,1	0,5	0	14,9	826
<b>Puerto Octay</b>	100	0	0	0	0	118
<b>Puyehue</b>	-	-	-	-	-	0
<b>Río Negro</b>	34,1	5,1	25,7	0	35	19
<b>S. J. de la Costa</b>	56,4	2,7	39,4	0,7	0,9	207
<b>San Pablo</b>	3,6	0	93	0	3,4	52

## Anexo F: PCS y Densidad presentadas por Burgos, 2011.

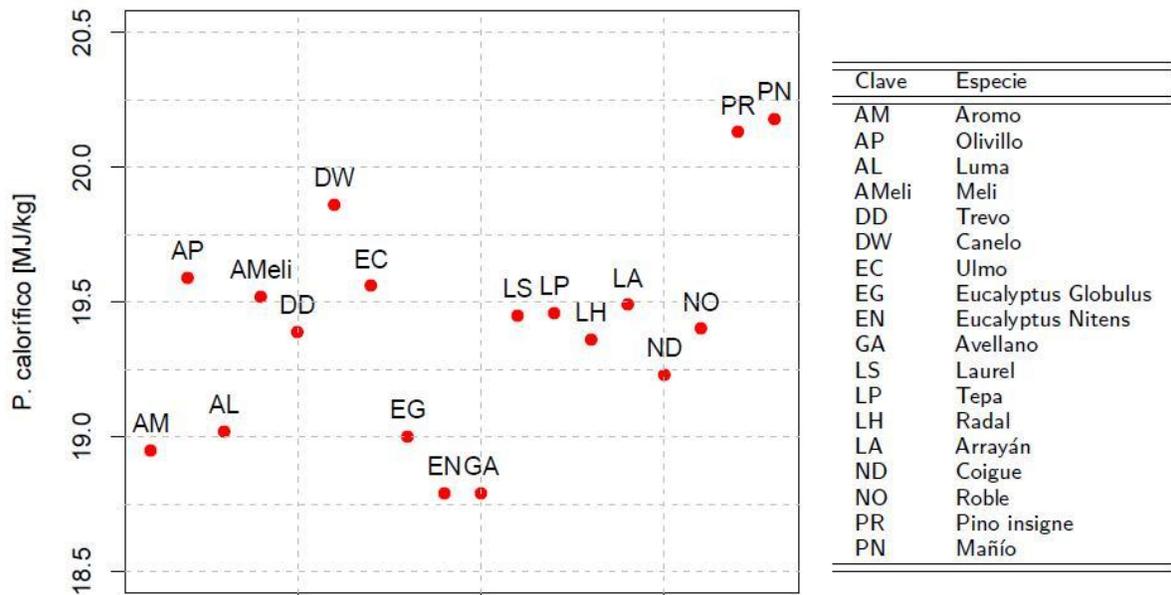


Figura 53: Poderes caloríficos superiores presentados por Burgos, 2011.

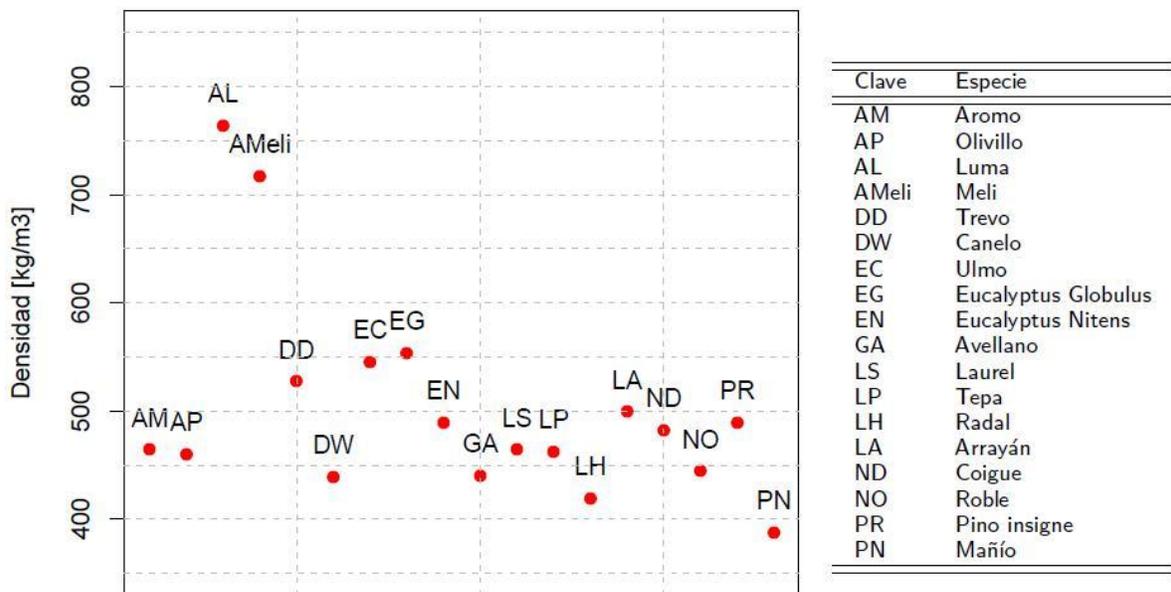


Figura 54: Densidades presentadas por Burgos, 2011.

**Anexo G: Reducción del punto de ebullición con respecto a la presión de vapor saturado.**

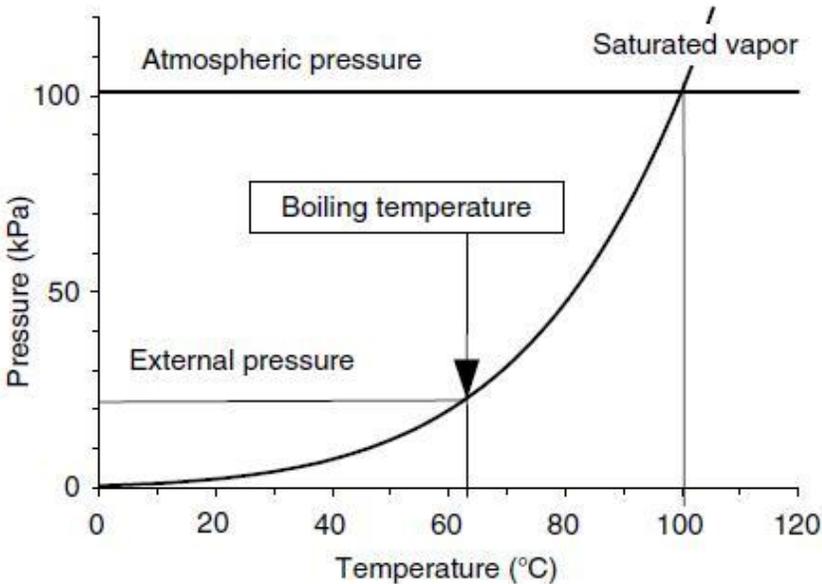


Figura 55: El secado al vacío apunta a reducir el punto de ebullición del agua para obtener un efecto de alta temperatura con condiciones moderadas de secado. Fuente: Lide, 1995.

## Anexo H: Direcciones de corte de las tablas de madera.

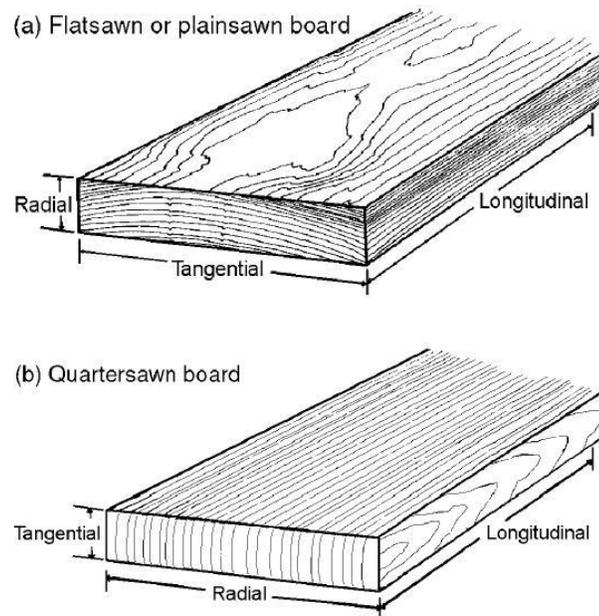


Figura 56: (a) Corte longitudinal perpendicular a los anillos. (b) Corte longitudinal paralelo a los anillos de crecimiento.

## Anexo I: Diagramas de secadores artificiales solarmente asistidos.

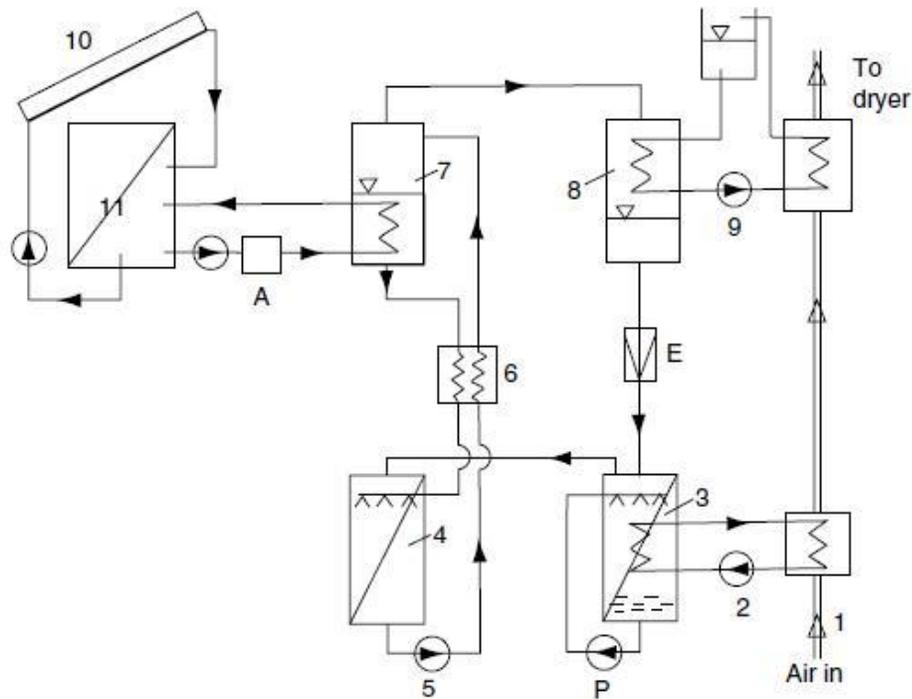


Figura 57: Secador artificial solarmente asistido para maní equipado con una bomba de calor por absorción y almacenamiento de energía. Fuente: Auer, 1980.

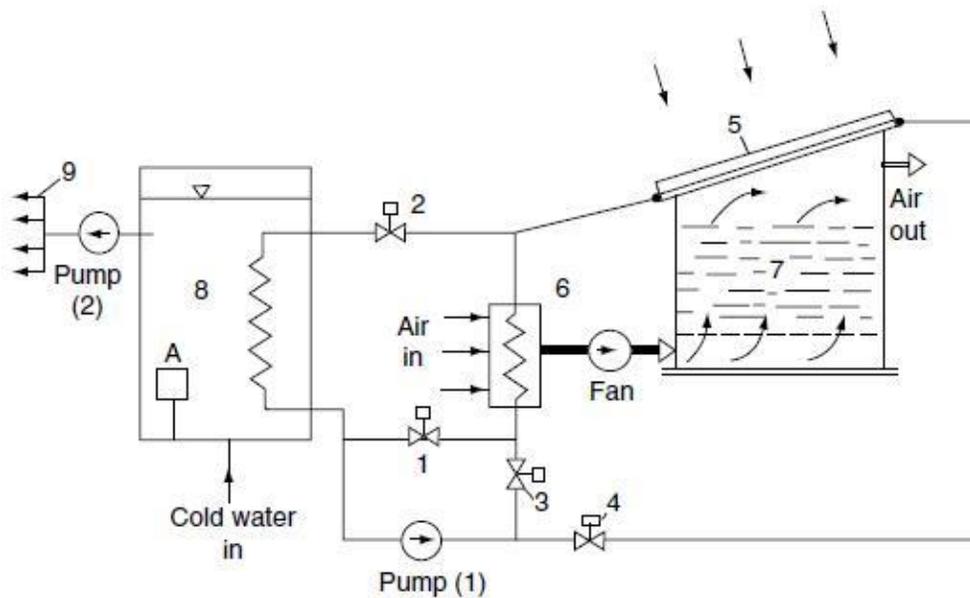


Figura 58: Secador artificial solarmente asistido para heno conectado a un sistema de agua caliente de una granja ganadera. Fuente: Imre et al. (1982).

## Anexo J: Tabla de secadores solares estudiados por Wengert y Oliveira, 1987.

Tabla 42: Información general de los 31 secadores solares estudiados por Wengert y Oliveira (1987). La numeración de los secadores solares se corresponde con aquella utilizada por los autores. Fuente: Elaboración propia a partir de Wengert y Oliveira (1987).

Secador [ ]	Latitud [°]	Capacidad [m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Grosor [cm]	t secado [día]	CH <sub>0</sub> / CH <sub>f</sub> [%]
1	42N	2,4	3,9	2,5	35	Verde/7
2	36N	9,4	1,2	¿?	60	Verde/9
3	30N	0,85	2,9	5	20	81/14
4	35N	3,5	3,9	2,5	69	72/8
5	27S	15	3,3	5	72	38/12
6	--	--	--	--	--	--
7	--	--	--	--	--	--
8	--	--	--	--	--	--
9	25S	1	9,1	¿?	23	90/12
10	30N	7,1	3,1	6,2	28	Verde/¿?
11	43N	0,9	3,7	2,5	52	60/6
12	48N	1,9	2,2	5	47	130/10
13	41N	2,9	5,9	2,5	14	50/15
14	--	--	--	--	--	--
15	60N	4,7	3,3	¿?	¿?	Verde/12
16	0N	3,3	2,4	2,5	27	112/12
17	43N	1,0	8,7	2,5	24	70/20
18	--	--	--	--	--	--
19	--	--	--	--	--	--
20	50N	7	4,7	5	60	Verde/12
21	--	--	--	--	--	--
22	37N	59	0,51	3,2	11	Verde/20
23	40N	2,3	4,7	2,5	14	39/15
24	17S	7,1	2,9	5	39	60/14
25	--	--	--	--	--	--
26	3S	10	1,5	¿?	103	80/17
27	--	--	--	--	--	--
28	19S	4,4	3,6	8	94	Verde/20
29	48N	1,18	3,7	5	12	60/19
30	--	--	--	--	--	--
31	36N	7,8	7,8	1,1	15	90/20

### Anexo K: Efecto del número de cubiertas en la eficiencia de un colector.

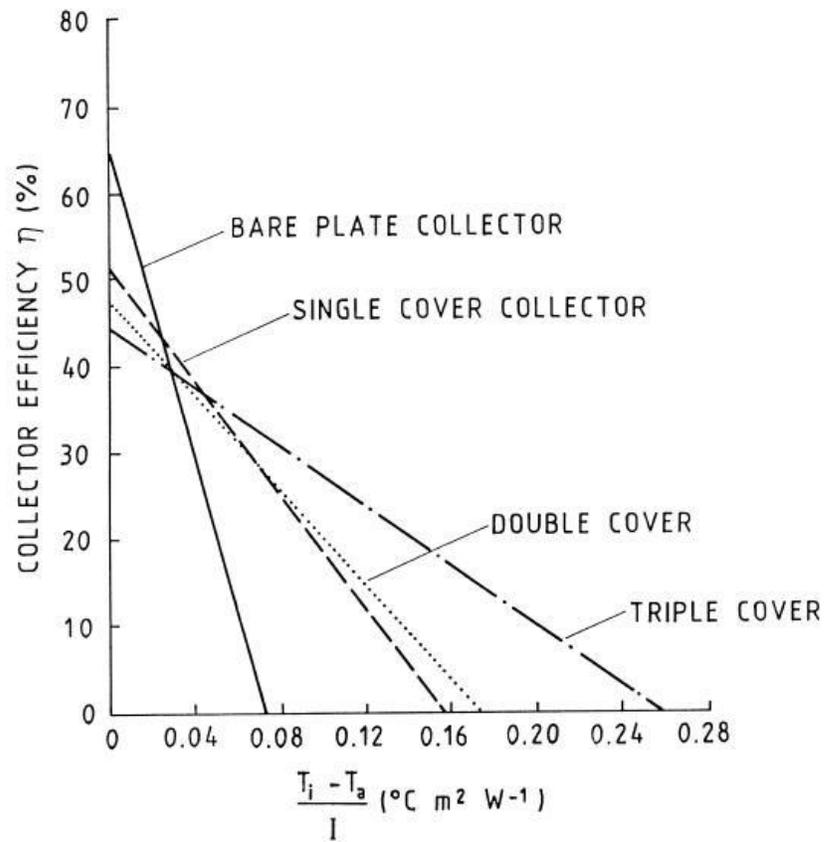


Figura 59: Comparación del efecto que tiene el número de cubiertas en la eficiencia de un colector solar calentador de aire de placa plana. Fuente: Ekechukwu, 1987.

## Anexo L: Modelos de colectores estudiados por Koyuncu, 2006.

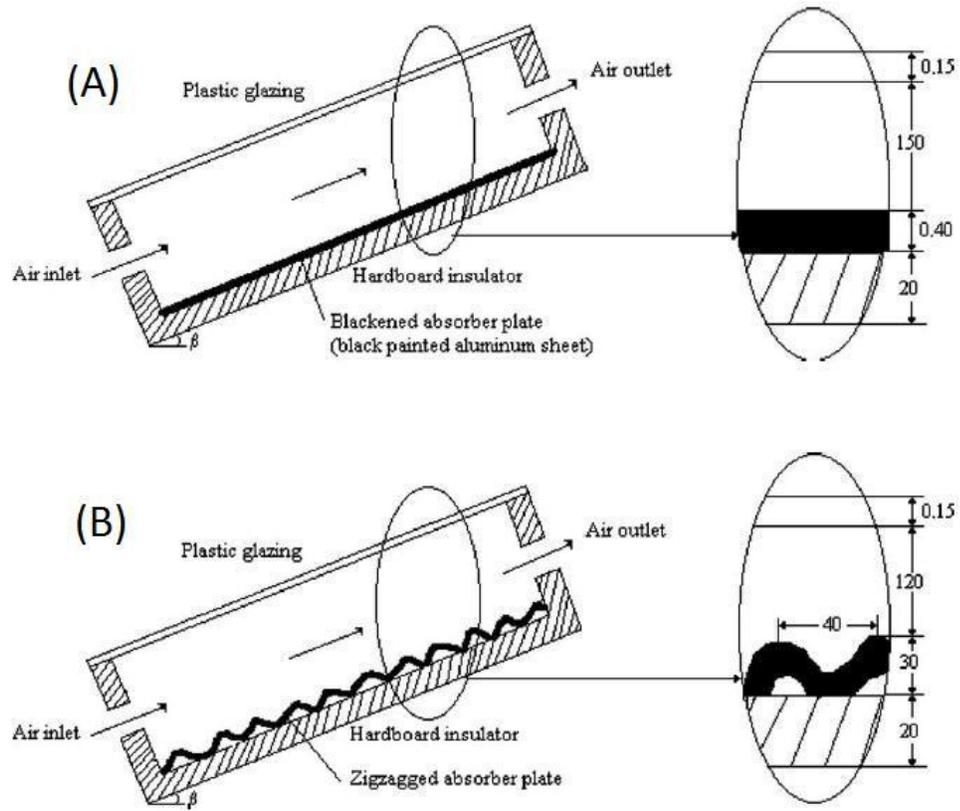


Figura 60: Esquema de dos de los modelos de colectores estudiados por Koyuncu (2006): (A) Colector M2. (B) Colector M3. Todas las medidas en milímetros. Fuente: Koyuncu, 2006.

## Anexo M: Trayectoria del flujo de aire en colectores con deflectores.

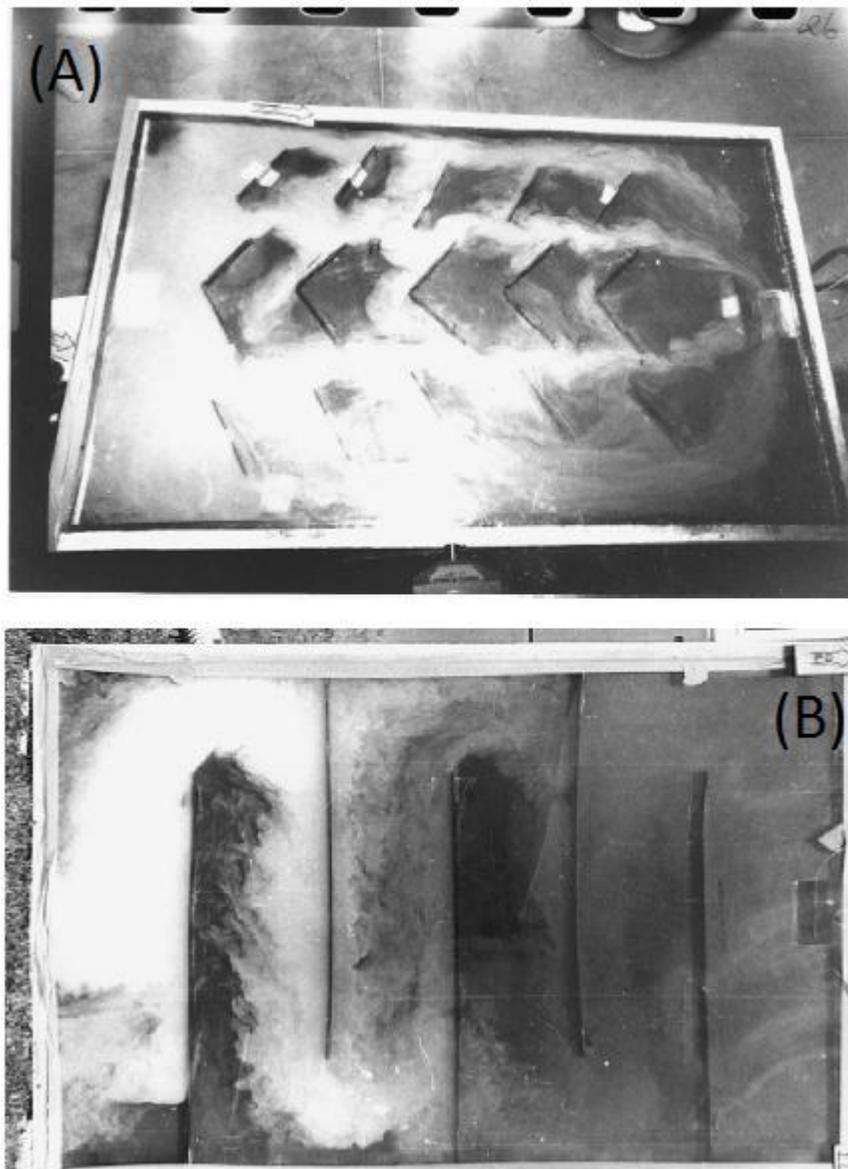


Figura 61: Visualización de la trayectoria del flujo de aire en dos colectores con deflectores. Nótese tanto las zonas muertas como el efecto que tienen los respiraderos de aire en ambos casos: (A) Pequeños deflectores. (B) Deflectores transversales.

## Anexo N: Bolsas para empaques de madera.



Figura 62: Empaques de madera formados mediante bolsas de poli-propileno. El llenado de las bolsas se hace dentro de una rejilla metálica que le da la forma cuadrada al empaque. Nótese el soporte inferior del empaque que permite el paso de aire.

## Anexo 0: Medidores de humedad por conductancia.

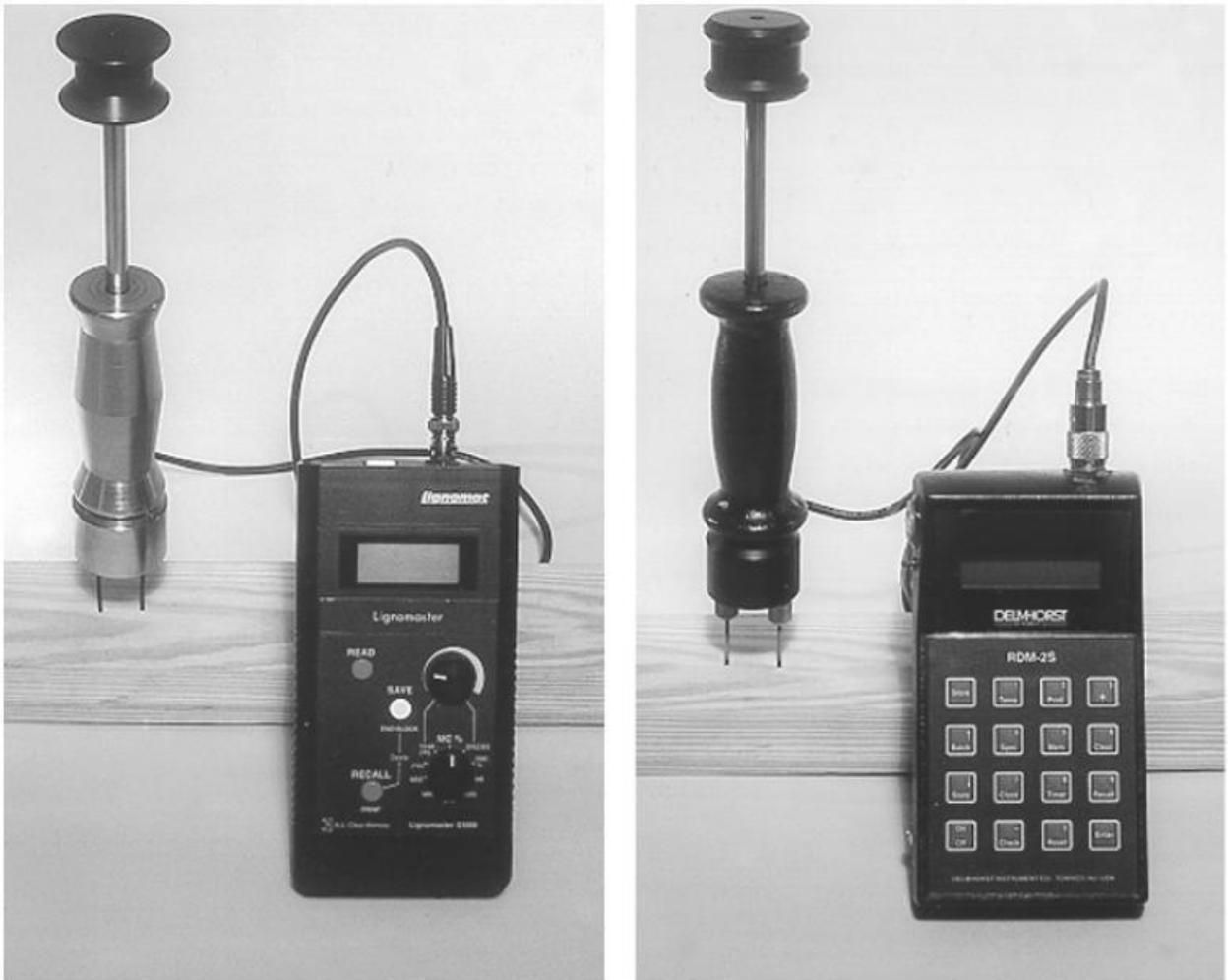


Figura 63: Medidores de humedad por conductancia. Fuente: Rietz y Rufus, 1999.

## Anexo P: Cálculo de la humedad relativa.

La definición de la humedad relativa es:

$$RH = \frac{P_V}{P_{sat}} \quad (P.1)$$

La presión parcial de vapor de agua en el aire está dada por:

$$P_V = P_T \frac{n_V}{n_V + n_A} \quad (P.2)$$

Transformando los moles en kilogramos:

$$P_V = P_T \frac{\frac{M_V}{PM_V}}{\frac{M_A}{PM_A} + \frac{M_V}{PM_V}} \quad (P.3)$$

Simplificando y agrupando términos:

$$P_V = P_T \left( \frac{M_V}{PM_V} \right) \cdot \left( \frac{PM_A PM_V}{PM_V M_A + PM_A M_V} \right) \quad (P.4)$$

$$P_V = P_T \left( \frac{PM_A M_V}{PM_V M_A + PM_A M_V} \right) \quad (P.5)$$

Pero además:

$$M_V = F \cdot x \quad (P.6)$$

Y:

$$M_A = F(1 - x) \quad (P.7)$$

Introduciendo (P.5) y (P.6) en (P.4), se obtiene la presión parcial de vapor en función de la fracción másica de humedad:

$$P_V = P_T \left( \frac{PM_A \cdot x}{PM_V(1 - x) + PM_A \cdot x} \right) \quad (P.7)$$

Reemplazando las constantes con  $P_T = 101\,325 \text{ [Pa]}$ ,  $PM_A = 0,02897 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]$ ,  $PM_V = 0,018 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]$ :

$$P_V = 2935,38 \left( \frac{x}{0,01097x + 0,018} \right) \quad (P.8)$$

La presión de saturación del agua puede calcularse mediante la ecuación de Antoine:

$$P_{sat} = \exp\left(C_0 - \frac{C_1}{T - C_2}\right) \quad (P. 9)$$

Los coeficientes de mayor exactitud que se conocen para el intervalo que va de 0 a 100 [°C] (menos de 1,2% de error) son (Genskow et al., 2008):

$$C_0 = 23,19 [ ], C_1 = 3830 [ ], C_2 = 44,83 [K]$$

Con estos coeficientes, (P.9) es:

$$P_{sat} = \exp\left(23,19 - \frac{3830}{T - 44,83}\right) \quad (P. 10)$$

Con (P.7) y (P.9) es posible obtener  $RH_A$  como una función del tipo:

$$RH_A = RH(x, T) \quad (P. 11)$$

Reemplazando (P.8) y (P.10) en (P.1), se obtiene la expresión completa de RH:

$$RH(x, T) = 2935,38 \cdot \left(\frac{x}{0,01097x + 0,018}\right) \cdot \exp\left(\frac{3830}{T - 44,83} - 23,19\right) \quad (P. 12)$$

## Anexo Q: Sistema de ecuaciones fenomenológicas del SSTI-pi.

Para facilitar la modelación matemática del interior del SSTI-pi se definen cuatro sistemas mostrados en la Figura 64. El sistema A corresponde a la batería de ventiladores y representa una unión de flujos. El sistema B corresponde al colector, en cuya superficie ocurre una transferencia de energía entre el absorbedor y el aire. El sistema C es la cancha de secado y es aquí en donde ocurre el transporte acoplado. El sistema D representa una división de flujos.

Los sistemas A, B, C y D se utilizan a continuación para plantear los balances de masa y energía. Lo que se busca es definir la totalidad del sistema en función de las variables ambientales medibles,  $x_{in}$ , y  $T_{in}$ , y de las variables de operación controlables,  $F_r$  y  $F_{in}$ .

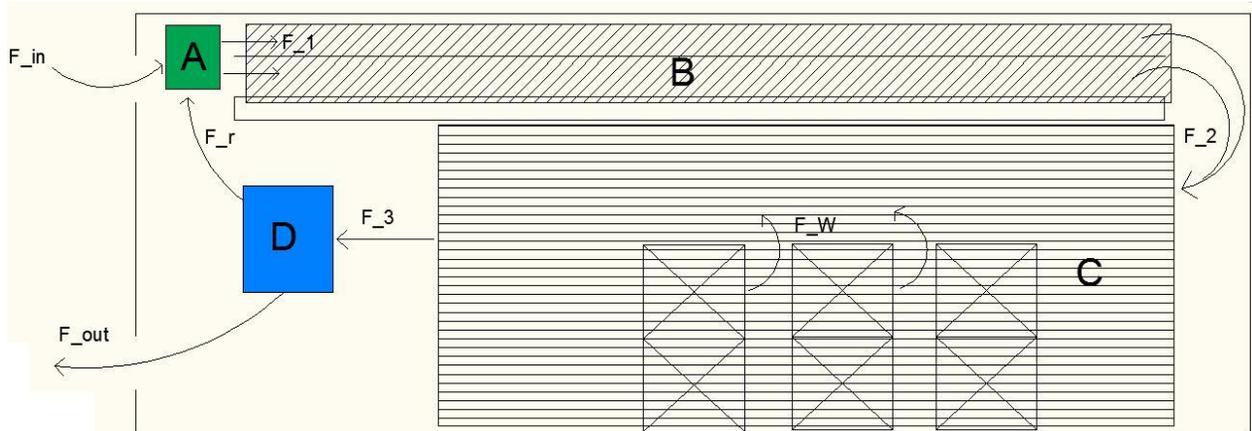


Figura 64: Esquema del interior de un SSTI-pi en que se muestran los sistemas que se utilizan para realizar los balances de masa y energía.

### 1. Balances de masa.

Se asume que el aire (tanto húmedo como seco) es un fluido gaseoso incompresible y que por tanto el volumen de este dentro del SSTI-pi permanece constante.

BM global sistema A:

$$F_{in} + F_r = F_1 \quad (Q.1)$$

BM global sistema B:

$$F_2 = F_1 \quad (Q.2)$$

(Q.1) en (Q.2):

$$F_2 = F_{in} + F_r \quad (Q.3)$$

BM global sistema C':

$$F_3 = F_W + F_2 \quad (Q.4)$$

(Q.3) en (Q.4):

$$F_3 = F_W + F_{in} + F_r \quad (Q.5)$$

BM global sistema D:

$$F_{out} = F_3 - F_r \quad (Q.6)$$

(Q.4) en (Q.6):

$$F_{out} = F_W + F_{in} \quad (Q.7)$$

BM humedad sistema A:

$$F_{in}x_{in} + F_r x_r = F_1 x_1 \quad (Q.8)$$

Reordenando términos:

$$x_1 = \frac{F_{in}x_{in} + F_r x_r}{F_{in} + F_r} \quad (Q.9)$$

BM humedad sistema B:

$$x_2 = x_1 \quad (Q.10)$$

BM humedad sistema C':

$$F_3 x_3 = F_2 x_2 + F_W \quad (Q.11)$$

Reordenando términos e introduciendo (Q.3), (Q.5) y (Q.10):

$$x_3 = \frac{(F_{in} + F_r)x_1 + F_W}{F_{in} + F_r + F_W} \quad (Q.12)$$

BM humedad sistema D:

$$x_{out} = x_r = x_3 \quad (Q.13)$$

La ecuación (Q.13) se plantea así pues se asume que la altura del SSTI-pi no es suficiente como para aprovechar la flotabilidad del aire. Introduciendo (Q.12) en (Q.13):

$$x_r = \frac{(F_{in} + F_r)x_2 + F_W}{F_{in} + F_r + F_W} \quad (Q.14)$$

Volviendo a (Q.9), se introduce (Q.14) y ordenando los términos:

$$x_1 = x_{in} \left( \frac{F_{in}(F_{in} + F_r + F_W)}{(F_{in} + F_W)(F_{in} + F_r)} \right) + \frac{F_r F_W}{(F_{in} + F_W)(F_{in} + F_r)} \quad (Q.15)$$

E introduciendo (Q.15) en (Q.12) y ordenando los términos:

$$x_3 = x_{in} \left( \frac{F_{in}}{F_{in} + F_W} \right) + \frac{F_W^2 + F_{in}F_W + F_r F_W}{(F_{in} + F_r + F_W)(F_{in} + F_W)} \quad (Q.16)$$

Ahora se tiene la totalidad de los balances de masa, tanto globales como por especie, descritos en función de las variables ambientales medibles y operacionales controlables, con la excepción de  $F_W$  que más adelante debe ser expresado en función de estas.

## 2. Balances de energía.

**BE sistema D:**

$$T_3 = T_r = T_{out} \quad (Q.17)$$

**BE sistema A:**

$$\frac{dQ_{vent}}{dt} = H(F_{in}) + H(F_r) - H(F_1) \quad (Q.18)$$

Asumiendo que la batería de ventiladores capta una cantidad despreciable de calor desde el aire, (Q.17) se transforma en:

$$0 = (C_{p,A}(1 - x_{in}) + C_{p,V}x_{in})F_{in}T_{in} + (C_{p,A}(1 - x_r) + C_{p,V}x_r)F_rT_r - (C_{p,A}(1 - x_1) + C_{p,V}x_1)F_1T_1 \quad (Q.19)$$

Reemplazando expresiones de los BM junto con (Q.17) se despeja  $T_1$ :

$$T_1 = \frac{F_{in}T_{in}(C_{p,V}x_{in} + C_{p,A}(1 - x_{in})) + F_rT_3(C_{p,V}x_r + C_{p,A}(1 - x_r))}{(F_{in} + F_r)(C_{p,V}x_1 + C_{p,A}(1 - x_1))} \quad (Q.20)$$

De (Q.20) se observa que  $T_3$  falta por ser definida.

**BE sistema B (colector):**

$$\frac{dQ_C}{dt} = E_{rad} + H(F_1) - H(F_2) \quad (Q.21)$$

Desarrollando los términos e introduciendo igualdades de los BM:

$$\frac{d(M_{ab}C_{p,ab}T_{ab})}{dt} = S_C I_N \eta + F_1 T_1 (C_{p,A}(1 - x_1) + C_{p,V}x_1) - F_2 T_2 (C_{p,A}(1 - x_2) + C_{p,V}x_2) \quad (Q.22)$$

$$\rho_{ab} \Delta e_{ab} A_C C_{p,ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = S_C I_N \eta + (F_r + F_{in})(T_1 - T_2)(C_{p,A}(1 - x_2) + C_{p,V}x_2) \quad (Q.23)$$

Nótese de la ecuación (Q.23) que es necesaria una relación entre la temperatura del absorbedor,  $T_{ab}$ , y la temperatura con que el aire abandona el colector,  $T_2$ . Esta relación puede eventualmente obtenerse de una descripción fenomenológica compleja de la transferencia de energía y que involucra por un lado convección entre el aire y el absorbedor y por otro la radiación que impacta sobre el absorbedor. Sin embargo, existe en la literatura información suficiente como para simplificar la relación entre  $T_{ab}$  y  $T_2$ . Koyuncu (2006) mide  $T_{ab}$  y  $T_2$  para varios tipos de colectores, apreciándose la importancia decisiva de la forma del absorbedor y del paso del aire. Si bien no analiza colectores con

doble paso de aire, es posible realizar estimaciones a partir de los valores que obtiene para paso frontal del aire para establecer un factor de forma del absorbedor:

$$T_{ab} \cdot f_{ab} = T_2 \quad (Q.24) \quad \text{con } f_{ab} \in [0; 1]$$

Para el colector de placa plana con paso frontal, Koyuncu (2006) encuentra un  $f_{ab}$  igual a 0,71. En consecuencia, el mismo colector de placa plana con doble paso del aire puede tener un factor de forma de aproximadamente 0,75. Un colector con absorbedor corrugado en V con doble paso del aire debería alcanzar un  $f_{ab}$  de 0,8 e incluso más.

Reemplazando (Q.24) en (Q.23) y recordando además que  $x_1 = x_2$ :

$$\frac{\rho_{ab} \Delta e_{ab} A_C C_{p,ab}}{f_{ab}} \frac{dT_2}{dt} = S_C I_N \eta + (F_r + F_{in})(T_1 - T_2)(C_{p,A}(1 - x_1) + C_{p,V}x_1) \quad (Q.25)$$

Para simplificar (Q.14), se definen los siguientes parámetros:

$$K_1 = \frac{\rho_{ab} \Delta e_{ab} A_C C_{p,ab}}{f_{ab}} \quad (Q.26)$$

$$K_2 = S_C I_N \eta \quad (Q.27)$$

$$K_3(x_1) = (F_r + F_{in})(C_{p,A}(1 - x_1) + C_{p,V}x_1) \quad (Q.28)$$

Nótese que  $K_1$  y  $K_2$  son constantes. Con los nuevos parámetros, (Q.25) simplificada queda planteada en función de constantes y de las variables ambientales y controlables:

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{K_2}{K_1} + \frac{K_3(x_1)}{K_1}(T_1 - T_2) \quad (Q.29)$$

**BE sistema C (cancha):**

$$\frac{d(Q_M + Q_W)}{dt} = H(F_2) - H(F_1) \quad (Q.30)$$

El término de acumulación de (Q.30) expresa que tanto la madera como la humedad contenida en la madera retienen calor. Desarrollando este término se obtiene:

$$\frac{d(Q_M + Q_W)}{dt} = \frac{d}{dt} (C_{p,M} M_M T_M + C_{p,W} M_M T_M CH) \quad (Q.31)$$

$$\frac{d(Q_M + Q_W)}{dt} = M_M \frac{d}{dt} (T_M (C_{p,M} + C_{p,W} CH)) \quad (Q.32)$$

$$\frac{d(Q_M + Q_W)}{dt} = M_M (C_{p,M} + C_{p,W} CH) \frac{dT_M}{dt} + M_M C_{p,W} T_M \frac{dCH}{dt} \quad (Q.33)$$

El contenido de humedad de la madera, CH, se relaciona íntimamente con  $F_W$  mediante una EDO que se muestra un poco más adelante.

Desarrollando el término de entrada de energía al sistema se obtiene:

$$H(F_2) = T_2 C_{p,A} F_2 (1 - x_2) + T_2 C_{p,V} F_2 x_2 \quad (Q.34)$$

Introduciendo (Q.10) y (Q.5):

$$H(F_2) = T_2 (F_r + F_{in}) (C_{p,A} (1 - x_1) + C_{p,V} x_1) \quad (Q.35)$$

Desarrollando el término de salida de energía se obtiene:

$$H(F_3) = T_3 C_{p,A} F_3 (1 - x_3) + T_3 C_{p,V} F_3 x_3 + \Delta H_{vap,W} F_W \quad (Q.36)$$

(Q.36) contempla no sólo el aumento de temperatura del aire húmedo sino que también la energía que se “invirtió” en evaporar el flujo de vapor de agua que fue removido desde la madera. Cabe además destacar que  $\Delta H_{vap,W}$  debe determinarse para la temperatura de la superficie en donde ocurre el cambio de fase de la humedad, es decir para  $T_M$ .

Agrupando los términos de (Q.36) e introduciendo (Q.5):

$$H(F_3) = T_3 (F_W + F_{in} + F_r) (C_{p,A} (1 - x_3) + C_{p,V} x_3) + \Delta H_{vap,W} F_W \quad (Q.37)$$

Tomando en consideración el análisis hecho para  $T_2$  y  $T_{ab}$ , es aparentemente necesario encontrar también una relación entre  $T_3$  y  $T_M$ . Sin embargo, Broche et al. (2002) muestran que  $T_3$  y  $T_M$  se iguala tanto en el estado estacionario como en el transiente. Karabagli et al. (1997) corroboran este comportamiento para varias especies arbóreas europeas. La equivalencia de  $T_3$  y  $T_M$  indica que el coeficiente convectivo de transferencia de calor puede ser despreciado para el sistema aire – madera. La relación entre  $T_3$  y  $T_M$  es entonces:

$$T_3 = T_M \quad (Q.38)$$

Regresando a (Q.30), se reúnen los términos que la componen y se introduce (Q.38) para establecer la EDO que describe  $T_3$ :

$$\begin{aligned} (C_{p,M} + C_{p,W} CH) \frac{dT_3}{dt} + C_{p,W} T_3 \frac{dCH}{dt} \\ = \frac{T_2 (F_r + F_{in})}{M_M} (C_{p,A} (1 - x_1) + C_{p,V} x_1) - \frac{T_3 (F_W + F_{in} + F_r)}{M_M} (C_{p,A} (1 - x_3) + C_{p,V} x_3) \\ + \frac{\Delta H_{vap,W}}{M_M} F_W \quad (Q.39) \end{aligned}$$

Si se definen:

$$K_4(x_1) = \frac{(C_{p,A} (1 - x_1) + C_{p,V} x_1)}{M_M} \quad (Q.40)$$

$$K_5(x_3) = \frac{(C_{p,A} (1 - x_3) + C_{p,V} x_3)}{M_M} \quad (Q.41)$$

$$K_6 = \frac{\Delta H_{vap,W}}{M_M} \quad (Q.42)$$

Entonces (Q.39) queda de la forma:

$$\begin{aligned} (C_{p,M} + C_{p,W}CH) \frac{dT_3}{dt} + C_{p,W}T_3 \frac{dCH}{dt} \\ = T_2K_4(x_1)(F_r + F_{in}) - T_3K_5(x_3) \cdot (F_W + F_{in} + F_r) + K_6F_W \end{aligned} \quad (Q.43)$$

### 3. Expresión para $F_W$ y CH.

Para describir la totalidad del sistema de ecuaciones que modelan el funcionamiento interno de un SSTI-pi en función de las variables  $x_{in}$ ,  $T_{in}$ ,  $F_r$  y  $F_{in}$  es absolutamente necesario plantear una expresión para  $F_W$  y CH.

En primer lugar,  $F_W$  y CH se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$F_W = -M_M \frac{dCH}{dt} \quad (Q.44)$$

La ecuación (Q.44) quiere decir que  $F_W$  representa la tasa de cambio de toda la humedad contenida en un SSTI-pi.

Convencionalmente (e intuitivamente), la transferencia de masa entre dos medios está dada por:

$$\{Variación\ de\ la\ humedad\} = \{Coeficiente\} \cdot \{Superficie\ interfaz\} \cdot \{Fuerza\ motriz\} \quad (Q.45)$$

Para el caso del secado de madera, la fuerza motriz corresponde a un gradiente de humedades existente entre el aire y la madera. No obstante,  $RH_A$  no puede formar parte directamente de (Q.45) ya que representa una magnitud que no está definida por los mismos escalares (o unidades) que CH. En consecuencia debe recurrirse al EMC de la madera (explicado en la sección 1.4), que usualmente se aproxima por la ecuación de Hailwood-Horrobin (1946) para dos hidratos:

$$EMC(T, RH) = \frac{1,8}{C_3} \left( \frac{C_0RH}{1 - C_0RH} + \frac{C_1C_0RH + 2C_1C_2C_0^2RH^2}{1 + C_1C_0RH + C_1C_2C_0RH^2} \right) \quad (Q.46)$$

En donde el set de coeficientes que mayor precisión autorizan, con T en grados Celsius y RH como fracción, son los siguientes (Simpson, 1991):

$$C_0 = 0,8050 + 000736T - 0,00000273T^2 \quad (Q.47)$$

$$C_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2 \quad (Q.48)$$

$$C_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2 \quad (Q.49)$$

$$C_3 = 349 + 1,29T + 0,0135T^2 \quad (Q.50)$$

La ecuación que permite calcular RH en función de T y x es deducida en el Anexo P.

La forma matemática de (Q.45) es:

$$F_W = k_m S_{A,M} (CH - EMC) \quad (Q.51)$$

O equivalentemente en función de CH:

$$\frac{dCH}{dt} = -\frac{k_m S_{A,M}}{M_M} (CH - EMC) \quad (Q.52)$$

El coeficiente de transferencia de masa,  $k_m$ , cuyas unidades son  $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ , es considerado como una constante para un set bien definido definida de parámetros relevantes por numerosos autores (Broche et al. (2002), Ananías et al. (2000)). Esto quiere decir  $k_m$  puede considerarse constante si la especie arbórea, el grosor de las tablas, la velocidad de aire y la viscosidad del aire permanecen constantes. Los autores recién mencionados indican que  $k_m$  está en el orden de  $10^{-5} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ . Valores de ese orden están en concordancia con los tiempos de secado que se esperan para el proyecto de la planta de secado (información no mostrada). Sin embargo, es posible cuestionar la independencia de la temperatura  $k_m$ , entre otras variables (Díaz, 2012).

#### 4. Sistema de EDOs por resolver.

A continuación se agrupan las EDOs que deben resolverse numéricamente para describir la operación diaria de un SSTI-pi en función de  $x_{in}$ ,  $T_{in}$ ,  $F_r$  y  $F_{in}$ .

$$(Q.15): \quad x_1 = x_{in} \left( \frac{F_{in}(F_{in} + F_r + F_W)}{(F_{in} + F_W)(F_{in} + F_r)} \right) + \frac{F_r F_W}{(F_{in} + F_W)(F_{in} + F_r)}$$

$$(Q.16): \quad x_3 = x_{in} \left( \frac{F_{in}}{F_{in} + F_W} \right) + \frac{F_W^2 + F_{in} F_W + F_r F_W}{(F_{in} + F_r + F_W)(F_{in} + F_W)}$$

$$(Q.20): \quad T_1 = \frac{F_{in} T_{in} (C_{p,v} x_{in} + C_{p,A} (1 - x_{in})) + F_r T_3 (C_{p,v} x_r + C_{p,A} (1 - x_r))}{(F_{in} + F_r) (C_{p,v} x_1 + C_{p,A} (1 - x_1))}$$

$$(Q.29): \quad \frac{dT_2}{dt} = \frac{K_2}{K_1} + \frac{K_3(x_2)}{K_1} (T_1 - T_2)$$

$$(Q.43): \quad (C_{p,M} + C_{p,W} CH) \frac{dT_3}{dt} + C_{p,W} T_3 \frac{dCH}{dt} \\ = T_2 K_4(x_1)(F_r + F_{in}) - T_3 K_5(x_3) \cdot (F_W + F_{in} + F_r) + K_6 F_W$$

$$(Q.44): \quad F_w = -M_M \frac{dCH}{dt}$$

$$(Q.46): \quad EMC(T_2, RH_2) = \frac{1,8}{C_3} \left( \frac{C_0 RH}{1 - C_0 RH} + \frac{C_1 C_0 RH + 2C_1 C_2 C_0^2 RH^2}{1 + C_1 C_0 RH + C_1 C_2 C_0 RH^2} \right)$$

$$(P.12): \quad RH(x_1, T_2) = 2935,38 \cdot \left( \frac{x}{0,01097x + 0,018} \right) \cdot \exp \left( \frac{3830}{T - 44,83} - 23,19 \right)$$

$$(Q.52): \quad \frac{dCH}{dt} = -\frac{k_m S_{A,M}}{M_M} (CH - EMC(x_1, T_2))$$

Este set de 9 ecuaciones requiere de considerable trabajo matemático para obtener una solución simultánea para todo el sistema. Métodos numéricos de fácil aplicación en MatLab como ODE45 u ODE23s no arrojan resultados debido a la presencia de numerosos términos no-lineales que dificultan enormemente la creación de una malla de evaluación de puntos que se mantenga estable en el rango de los números reales. La rigidez generalizada del set de 9 ecuaciones prácticamente imposibilita utilizar técnicas de integración numérica explícitas tipo Runge-Kutta (independiente de su orden) y muy posiblemente demanda aproximaciones numéricas manuales sofisticadas. Díaz (2012) plantea, en orden de prioridades, alternativas potenciales para resolver el sistema:

1. Método de las diferencias finitas (explícito o implícito en función de la rigidez obtenida).
2. Método de los elementos finitos con un software pre-diseñado (por ejemplo COMSOL).
3. Simulink.

La inversión de tiempo necesaria para solucionar el sistema de EDOs, y al mismo tiempo realizar la optimización de la operación diaria de los SSTI-pi, obliga a que el problema quede propuesto.

## Anexo R: Flujos de caja para tres escenarios de financiamiento.

### 1. Estructura de pago para los escenarios con préstamo.

Si se financia el 50% de la inversión inicial del proyecto con un préstamo a una tasa de interés del 8% anual (estimada por Avila, 2011) entonces la cuota anual a pagar es, de acuerdo a (7.19):

$$Cuota(50\%) = 5\,371\,612 \left[ \frac{CL\$}{\text{año}} \right] \quad (R.1)$$

Para 7 años de vida útil del proyecto, se calcula la estructura de pago del préstamo. Esta se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43: Estructura de pago para el escenario de financiamiento con un 50% de préstamo.

Pago	Cuota	Interés	Amortización	Saldo
1	5.371.612	2.237.328	3.134.284	24.832.316
2	5.371.612	1.986.585	3.385.027	21.447.289
3	5.371.612	1.715.783	3.655.829	17.791.460
4	5.371.612	1.423.317	3.948.295	13.843.165
5	5.371.612	1.107.453	4.264.159	9.579.006
6	5.371.612	766.321	4.605.292	4.973.715
7	5.371.612	397.897	4.973.715	0

Análogamente, se calcula la cuota para préstamo total de la inversión inicial (se mantiene una tasa de interés del 8% anual):

$$Cuota(100\%) = 10\,743\,224 \left[ \frac{CL\$}{\text{año}} \right] \quad (R.2)$$

Tabla 44: Estructura de pago para el escenario de financiamiento con un 100% de préstamo.

Pago	Cuota	Interés	Amortización	Saldo
1	10.743.224	4.474.656	6.268.568	49.664.632
2	10.743.224	3.973.171	6.770.053	42.894.578
3	10.743.224	3.431.566	7.311.658	35.582.921
4	10.743.224	2.846.634	7.896.590	27.686.330
5	10.743.224	2.214.906	8.528.318	19.158.013
6	10.743.224	1.532.641	9.210.583	9.947.430
7	10.743.224	795.794	9.947.430	0

### 2. Flujos de caja.

A continuación se muestran los flujos de caja del proyecto base para los 3 escenarios evaluados.

Tabla 45: Flujo de caja para el escenario sin financiamiento (puro). Para una tasa de descuento del 11%: VAN = 14 814 915 [CL\$] y TIR = 17%.

Unidades: [CL\$]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7
Ingresos		37.296.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000
Costos Fijos		-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000
Costos Variables		-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348
Intereses								
Depreciaciones		-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060
Pérdida ejercicios anteriores		0	-4.986.408	0	0	0	0	0
Variaciones de capital								
Utilidades antes de Impuesto		-4.986.408	8.731.185	13.717.592	13.717.592	13.717.592	13.717.592	13.717.592
Impuesto (20%)		0	-1.746.237	-2.743.518	-2.743.518	-2.743.518	-2.743.518	-2.743.518
Utilidades después de impuesto		-4.986.408	6.984.948	10.974.074	10.974.074	10.974.074	10.974.074	10.974.074
Depreciaciones		4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060
Pérdida ejercicios anteriores		0	4.986.408	0	0	0	0	0
Variaciones de capital		0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo de caja operacional</b>	<b>0</b>	<b>-473.348</b>	<b>16.484.415</b>	<b>15.487.134</b>	<b>15.487.134</b>	<b>15.487.134</b>	<b>15.487.134</b>	<b>15.487.134</b>
Préstamo								
Amortizaciones								
Inversiones		-55.933.200						
Recuperación valores residuales								23.541.780
<b>Flujo de caja de capitales</b>	<b>-55.933.200</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>23.541.780</b>
<b>Flujo de caja neto</b>	<b>-55.933.200</b>	<b>-473.348</b>	<b>16.484.415</b>	<b>15.487.134</b>	<b>15.487.134</b>	<b>15.487.134</b>	<b>15.487.134</b>	<b>39.028.914</b>

Tabla 46: Flujo de caja para el escenario con financiamiento de un 50% de la inversión. Para una tasa de descuento del 11%: VAN = 18 845 214 [CL\$] y TIR = 23%.

Unidades: [CL\$]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7
Ingresos		37.296.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000
Costos Fijos		-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000
Costos Variables		-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348
Intereses		-2.237.328	-1.986.585	-1.715.783	-1.423.317	-1.107.453	-766.321	-397.897
Depreciaciones		-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060
Pérdida ejercicios anteriores		0	-7.223.736	0	0	0	0	0
Variaciones de capital								
Utilidades antes de Impuesto		-7.223.736	4.507.271	12.001.809	12.294.276	12.610.139	12.951.272	13.319.695
Impuesto (20%)		0	-901.454	-2.400.362	-2.458.855	-2.522.028	-2.590.254	-2.663.939
Utilidades después de impuesto		-7.223.736	3.605.817	9.601.447	9.835.420	10.088.111	10.361.017	10.655.756
Depreciaciones		4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060
Pérdida ejercicios anteriores		0	7.223.736	0	0	0	0	0
Variaciones de capital		0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo de caja operacional</b>	<b>0</b>	<b>-2.710.676</b>	<b>15.342.613</b>	<b>14.114.507</b>	<b>14.348.480</b>	<b>14.601.171</b>	<b>14.874.077</b>	<b>15.168.816</b>
Préstamo	27.966.600							
Amortizaciones		-3.134.284	-3.385.027	-3.655.829	-3.948.295	-4.264.159	-4.605.292	-4.973.715
Inversiones	-55.933.200							
Recuperación valores residuales								23.541.780
<b>Flujo de caja de capitales</b>	<b>-27.966.600</b>	<b>-3.134.284</b>	<b>-3.385.027</b>	<b>-3.655.829</b>	<b>-3.948.295</b>	<b>-4.264.159</b>	<b>-4.605.292</b>	<b>18.568.065</b>
<b>Flujo de caja neto</b>	<b>-27.966.600</b>	<b>-5.844.960</b>	<b>11.957.586</b>	<b>10.458.679</b>	<b>10.400.185</b>	<b>10.337.013</b>	<b>10.268.786</b>	<b>33.736.881</b>

Tabla 47: Flujo de caja para el escenario con financiamiento de un 100% de la inversión. Para una tasa de descuento del 11%: VAN = 22 875 514 [CL\$] y TIR = 59%.

Unidades: [CL\$]	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7
Ingresos		37.296.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000	56.000.000
Costos Fijos		-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000	-19.831.000
Costos Variables		-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348	-17.938.348
Intereses		-4.474.656	-3.973.171	-3.431.566	-2.846.634	-2.214.906	-1.532.641	-795.794
Depreciaciones		-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060	-4.513.060
Pérdida ejercicios anteriores		0	-9.461.064	0	0	0	0	0
Variaciones de capital								
Utilidades antes de Impuesto		-9.461.064	283.358	10.286.026	10.870.959	11.502.686	12.184.951	12.921.798
Impuesto (20%)		0	-56.672	-2.057.205	-2.174.192	-2.300.537	-2.436.990	-2.584.360
Utilidades después de impuesto		-9.461.064	226.687	8.228.821	8.696.767	9.202.149	9.747.961	10.337.438
Depreciaciones		4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060	4.513.060
Pérdida ejercicios anteriores		0	9.461.064	0	0	0	0	0
Variaciones de capital		0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo de caja operacional</b>	<b>0</b>	<b>-4.948.004</b>	<b>14.200.810</b>	<b>12.741.881</b>	<b>13.209.827</b>	<b>13.715.209</b>	<b>14.261.021</b>	<b>14.850.498</b>
Préstamo	55.933.200							
Amortizaciones		-6.268.568	-6.770.053	-7.311.658	-7.896.590	-8.528.318	-9.210.583	-9.947.430
Inversiones	-55.933.200							
Recuperación valores residuales								23.541.780
<b>Flujo de caja de capitales</b>	<b>0</b>	<b>-6.268.568</b>	<b>-6.770.053</b>	<b>-7.311.658</b>	<b>-7.896.590</b>	<b>-8.528.318</b>	<b>-9.210.583</b>	<b>13.594.350</b>
<b>Flujo de caja neto</b>	<b>0</b>	<b>-11.216.572</b>	<b>7.430.757</b>	<b>5.430.223</b>	<b>5.313.237</b>	<b>5.186.891</b>	<b>5.050.438</b>	<b>28.444.849</b>