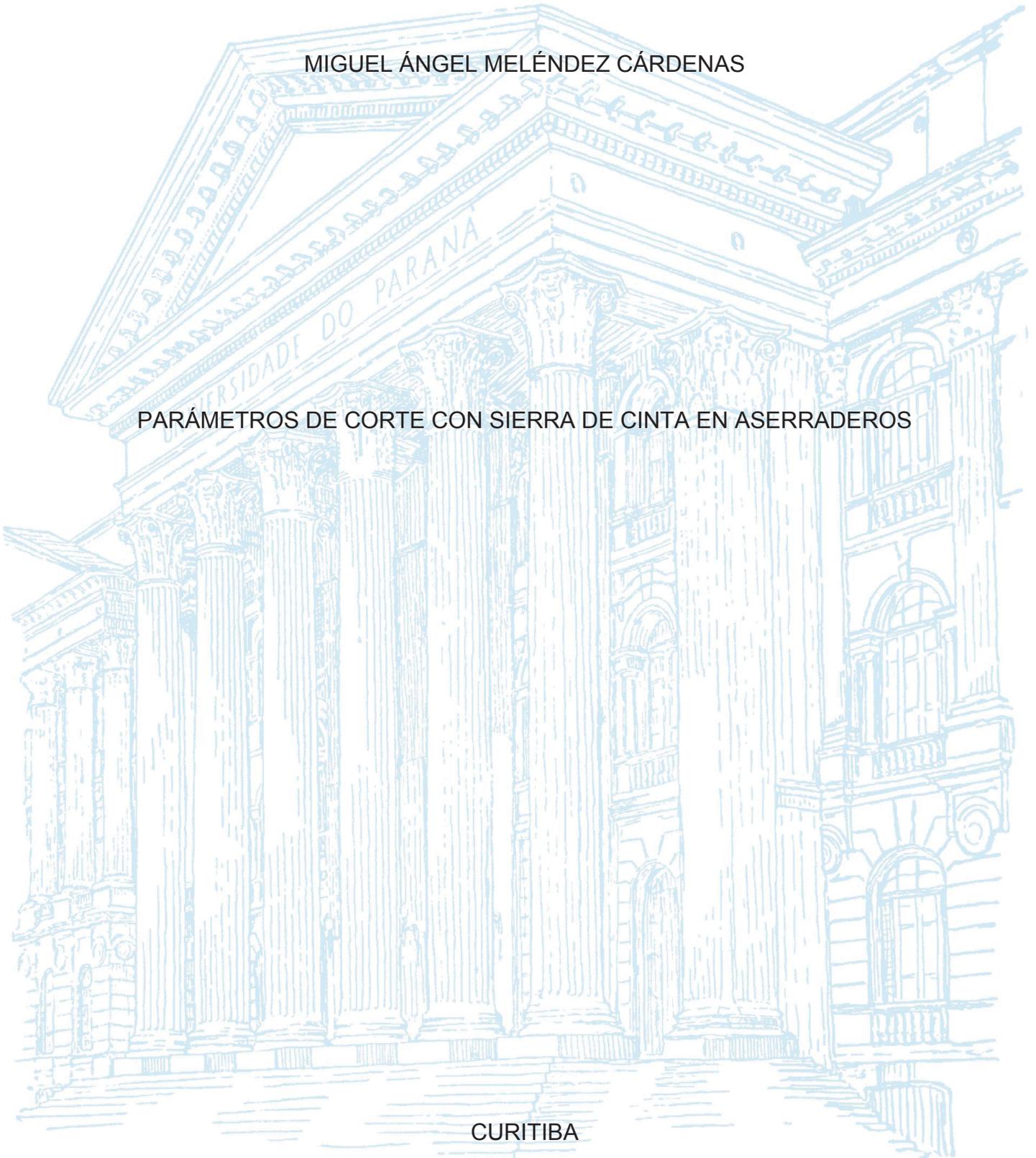


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MIGUEL ÁNGEL MELÉNDEZ CÁRDENAS

PARÁMETROS DE CORTE CON SIERRA DE CINTA EN ASERRADEROS



CURITIBA

2020

MIGUEL ÁNGEL MELÉNDEZ CÁRDENAS

PARÁMETROS DE CORTE CON SIERRA DE CINTA EN ASERRADEROS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientadores: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha  
Prof. PhD. Héctor E. Gonzáles Mora

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Meléndez Cárdenas, Miguel Ángel

Parâmetros de corte con sierra de cinta en aserraderos / Miguel Ángel  
Meléndez Cárdenas. - Curitiba, 2020.

144 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientadores: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Prof. PhD. Héctor Enrique Gonzáles Mora

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências  
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:  
Curitiba, 06/03/2020.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Serrarias. 2. Madeira serrada - Qualidade. 3 Máquinas para trabalho  
em madeira. 4. Teses. I. Klitzke, Ricardo Jorge. II. Rocha, Márcio Pereira da.  
III. González Mora, Héctor Enrique. IV. Universidade Federal do Paraná,  
Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.832.1

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL - 40001016015P0

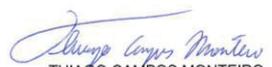
## TERMO DE APROVAÇÃO

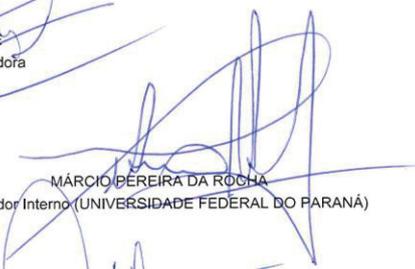
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MIGUEL ANGEL MELÉNDEZ CÁRDENAS** intitulada: **PARÁMETROS DE CORTE CON SIERRA DE CINTA EN ASERRADEROS**, sob orientação do Prof. Dr. RICARDO JORGE KLITZKE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

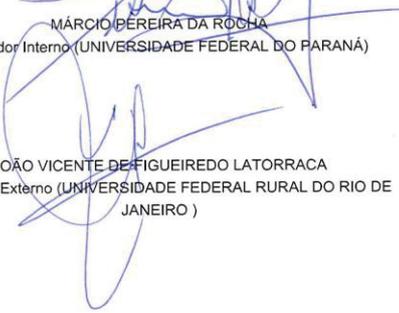
CURITIBA, 06 de Março de 2020.

  
RICARDO JORGE KLITZKE  
Presidente da Banca Examinadora

  
THIAGO CAMPOS MONTEIRO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

  
MÁRCIO PEREIRA DA ROCHA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

  
UGO LEANDRO BELINI  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

  
JOÃO VICENTE DE FIGUEIREDO LATORRACA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO)

A mi esposa YOLY

A mis queridos hijos MIGUEL y LENA

A mi nieta LISA

Por ser fuente de alegría para mi vida

## **AGRADECIMENTOS**

A Dios por darme salud y guiarme hacia la satisfacción de culminar el presente trabajo.

Al Programa de Postgrado en Ingeniería Forestal de la Universidad Federal de Paraná, por la oportunidad brindada para la realización de mis estudios de doctorado.

A los Laboratorios de Ensayos Tecnológicos, Química Forestal y Anatomía de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por la colaboración prestada para las determinaciones físico-mecánicas, químicas y anatómicas requeridas, en especial al Sr. Vicente Cuba Huamán, a la profesora Deysi Guzmán Loayza, al Sr. Enrique Cabrera Vaquerizo y al Sr. David Huamán Cabrera.

A la Dirección Ejecutiva Forestal y de Fauna Silvestre – Ucayali, por la información proporcionada sobre la plantación de Capirona del Sr. Arturo Galán Zumba.

Al aserradero INDUSTRIAS FORESTALES B.J. S.A.C, por su esmero en el escuadrado de trozas de Capirona en Pucallpa para su traslado a Lima.

A la empresa Gestión Maderera SAC (GEMASAC), por facilitar la maquinaria y el personal necesario para la ejecución de este trabajo, en particular al Sr. Bernardo Feijó Cogorno.

A mi orientador, Profesor Dr. Ricardo Jorge Klitzke, por sus atinadas sugerencias durante el tiempo que me ha guiado y colaboración para mejorar el primer artículo presentado a Revista Floresta.

Al Profesor Dr. Márcio Pereira da Rocha, por su oportuna revisión del proyecto de tesis y de la versión preliminar del primer artículo presentado a Revista Floresta.

Al PhD. Enrique Gonzáles Mora, Profesor Principal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por su gentileza de revisar los primeros resultados de esta investigación y la versión preliminar del segundo artículo preparado.

Al PhD. Roger Hernández Peña, profesor de la Universidad de Laval, por los diversos artículos científicos facilitados y su ayuda en una parte de las discusiones.

Al Dr. Francisco García Fernández, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid, por las normas técnicas facilitadas y su valioso comentario cuando fue consultado.

Al Ing. M.S. Moisés Acevedo Mallque, Profesor Principal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por sus comentarios y consejos en la etapa de preparación de probetas e interpretación de resultados.

Al Ing. Mg.Sc. Rolando Montenegro Muro, Docente de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por su valioso apoyo en los ensayos de dureza, la medición de elementos anatómicos y el análisis estadístico de los datos colectados en la presente investigación.

Al Ing. M.Sc. Claudio Gumane Francisco Juízo, por su valiosa ayuda.

Al Ing. Neptalí Bustamante Guillén, Profesor Asociado de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por cubrir mi carga académica durante el ciclo 2018-II en que estuve de licencia por capacitación.

Al Bach. Felipe Palma Palomino, por su esfuerzo y dedicación en la colecta de datos de consumo energético en la planta de GEMASAC y ubicación de puntos para medición de la rugosidad superficial.

Al Ing. Álvaro Guerra Miranda, por su paciencia en la elaboración de las figuras requeridas, así como en la preparación y codificación de probetas para densidad y contenido de humedad.

A la señorita Luisa Maribel Orellano Avendaño, secretaria de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por su gentileza en editar el presente trabajo de investigación.

## RESUMO

O presente trabalho refere-se à avaliação da potência de corte na madeira de *Calycophyllum spruceanum* (pau mulato) e sua rugosidade superficial, sob os formatos dente mareado e dente-reto, ao reserrar com uma serra de fita. Seis árvores de pau mulato foram selecionadas para a preparação de seis blocos da parte basal e seis do intermediário, os quais foram re-serrados usando uma velocidade média de corte de  $15,74 \text{ m.s}^{-1}$  com três velocidades de avanço distribuídas aleatoriamente na seção transversal, para determinar a espessura de cavacos finos (0,35 mm), médios (0,65 mm) e grossos (0,90 mm). Antes da re-serragem, uma amostra foi removida de cada bloco para biometria de vasos e fibras. Durante a re-serragem dos blocos para cada linha de corte, foi registrada a energia consumida pelo motor de uma serra de fita com um diâmetro de volante de 1,1 m, também foi coletada serrín de cada bloco para determinar seu teor de sílica e duas amostras para dureza lateral e densidade foram extraídas por tábua. Em seguida, a rugosidade da superfície Ra e Rz foi medida nas seis tábuas obtidas de cada bloco. Para a madeira estudada, foram determinadas uma média de densidade básica de  $0,64 \text{ g.cm}^{-3}$ , dureza lateral de  $708,52 \text{ kg.cm}^{-2}$  e teor de sílica de 0,20%. A baixa abrasividade da madeira é corroborada, assim como a estreita relação direta entre sua densidade básica e dureza lateral, características que são melhor explicadas com a fração e porção da parede da fibra estimada a partir dos elementos anatômicos medidos. No corte do pau mulato com o formato de dente mareado, foi determinada uma potência útil de 4417,05 W para cavacos médios e 5072,82 W para cavacos grossos, que diminuíram respectivamente para 3929,93 e 4588,83 W com o formato do dente-reto para a espessura de cavacos mencionada acima; conseguindo estabelecer para os cavacos grossos uma economia de energia do dente-reto em comparação com o dente mareado de  $0,059 \text{ kW.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$  da superfície serrada, que em uma hora efetiva de trabalho representa  $3,54 \text{ kW.m}^{-2}$ . Em relação à rugosidade da superfície, mantém-se a tendência geral da potência de corte, ao alterar o formato do dente, obtendo com o dente mareado um Ra de  $20,35 \text{ }\mu\text{m}$  e um Rz de  $117,61 \text{ }\mu\text{m}$  que diminui para  $19,16$  e  $114,57 \text{ }\mu\text{m}$  respectivamente com o dente-reto. A potência útil de corte é determinada para aumentar com a espessura do cavaco, mostrando correlações satisfatórias para os dois formatos de dente. No caso do dente mareado, ele gera maior degradação da superfície quando sua rugosidade aumenta com a espessura do cavaco e a potência útil. Conclui-se que a potência útil de corte e a rugosidade da superfície da madeira diferem significativamente com a geometria do dente, destacando-se o dente-reto sobre o dente mareado, devido à menor solicitação de potência útil e à melhoria da qualidade da superfície para os cavacos grossos.

Palavras-chave: Perfil do dente. Espessura de cavaco. Velocidade de avanço. Potência útil. Rugosidade superficial. Pau mulato.

## ABSTRACT

This work evaluates the cutting power in the wood of *Calycophyllum spruceanum* (capirona) and its surface roughness, under the hook tooth and skip tooth formats on the resawing with band saw. Six capirona trees were selected for the preparation of six blocks from the basal part and six from the intermediate part, which were resawed using an average cutting speed of  $15,74 \text{ m.s}^{-1}$  with three feed rates distributed randomly in the cross section to determine the chip thicknesses thin (0,35 mm), medium (0,65 mm) and thick (0,90 mm). Before resawing, a sample was taken from each block for the biometrics of vessels and fibers. During the resawing of the blocks for each cutting line, the power consumed by the motor of a band saw with 1,1 m of wheel diameter was recorded, as well as sawdust was collected from each block to determine its silica content and two specimens for lateral hardness and density was extracted by table. Then the surface roughness Ra and Rz was measured in the six tables obtained from each block. For the wood studied, an average basic density of  $0,64 \text{ g.cm}^{-3}$ , a lateral hardness of  $708,52 \text{ kg.cm}^{-2}$  and a silica content of 0,20 % were determined. The low abrasiveness of the wood is corroborated, as well as the close direct relationship between its basic density and lateral hardness, characteristics that are best explained with the fraction and portion of the estimated fiber wall from the measured anatomical elements. In the cutting of the capirona with the hook tooth format, a useful power of 4417,05 W for medium chips and 5072,82 W for thick chips was determined, which decreases respectively to 3929.93 and 4588.83 W with the skip type format for the alluded chip thickness; attaining to establish for the thick shavings a power saving of the skip tooth with respect to the hook tooth of  $0,059 \text{ kW.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$  of sawn surface, which in an effective working hour represents  $3,54 \text{ kW.m}^{-2}$ . As for the surface roughness, the general tendency for cutting power is maintained, when changing the tooth format, obtaining a Ra of 20,35  $\mu\text{m}$  and an Rz of 117,61 with the hook tooth  $\mu\text{m}$  that decreases to 19,16 and 114,57  $\mu\text{m}$  respectively with the skip tooth. It is determined that the useful cutting power increases with chip thickness, showing satisfactory correlations for both formats tooth. In the case of the hook profile, it generates greater surface degradation when its roughness increases with chip thickness and useful power. It is concluded that the useful cutting power and the surface roughness of the wood differs significantly with the tooth geometry, the skip tooth standing out over the hook type due to its lower solicitation of useful power and improvement of the surface quality for thick chips.

Key-words: Tooth profile. Chip thickness. Feed speed. Useful power. Surface roughness. Capirona.

## RESUMEN

El presente trabajo se refiere a la evaluación de la potencia de corte en la madera de *Calycophyllum spruceanum* (capirona) y su rugosidad superficial, bajo los formatos de diente tipo lobo y encía, en el tableado con sierra de cinta. Se seleccionaron seis árboles de capirona para la preparación de seis bloques de la parte basal y seis de la intermedia, los cuales se tablearon a una velocidad promedio de corte de  $15,74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  con tres velocidades de avance distribuidas al azar en la sección transversal, para determinar los espesores de viruta delgado (0,35 mm), mediano (0,65 mm) y grueso (0,90 mm). Antes del tableado se extrajo una muestra de cada bloque para la biometría de vasos y fibras. Durante el tableado de los bloques por cada línea de corte se registró la potencia consumida por el motor de una sierra de cinta con 1,1 m de diámetro de volante, así mismo se colectó aserrín de cada bloque para determinar su contenido de sílice y se extrajo por tabla dos probetas para dureza lateral y densidad. Luego se midió la rugosidad superficial  $R_a$  y  $R_z$  en las seis tablas obtenidas de cada bloque. Para la madera estudiada se determinó en promedio una densidad básica de  $0,64 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , una dureza lateral de  $708,52 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  y un contenido de sílice de 0,20 %. Se corrobora la poca abrasividad de la madera, así como la estrecha relación directa entre su densidad básica y dureza lateral, características que llegan a explicarse mejor con la fracción y porción de pared de fibra estimada a partir de los elementos anatómicos medidos. En el corte de la capirona con el formato de diente tipo lobo se determinó una potencia útil de 4417,05 W para las virutas medianas y 5072,82 W para las virutas gruesas, que disminuye respectivamente a 3929,93 y 4588,83 W con el formato tipo encía para los espesores de viruta aludidos; lográndose establecer para las virutas gruesas un ahorro de potencia del diente encía respecto al diente de lobo de  $0,059 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$  de superficie aserrada, que en una hora de trabajo efectivo representa  $3,54 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . En cuanto a la rugosidad superficial se mantiene la tendencia general de la potencia de corte, cuando se cambia de formato de diente, obteniéndose con el diente de lobo un  $R_a$  de  $20,35 \mu\text{m}$  y un  $R_z$  de  $117,61 \mu\text{m}$  que disminuye a  $19,16$  y  $114,57 \mu\text{m}$  respectivamente con el diente encía. Se determina que la potencia útil de corte aumenta con el espesor de viruta, mostrando correlaciones satisfactorias para ambos formatos de diente. En el caso del perfil lobo genera mayor degradación de la superficie cuando su rugosidad aumenta con el espesor de viruta y la potencia útil. Se concluye que la potencia útil de corte y la rugosidad superficial de la madera se diferencia significativamente con la geometría del diente, destacando el diente encía sobre el tipo lobo por su menor sollicitación de potencia útil y mejora de la calidad superficial para las virutas gruesas.

Palabras-clave: Perfil de diente. Espesor de viruta. Velocidad de avance. Potencia útil. Rugosidad superficial. Capirona.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ARBOL DE CAPIRONA.....	26
FIGURA 2 - MADERA DE CAPIRONA.....	27
FIGURA 3 - ELEMENTOS DEL DIENTE DE UNA HOJA DE SIERRA-CINTA ...	36
FIGURA 4 - PERFILES BÁSICOS DE DIENTES PROPUESTO POR JUNAC (1989).....	37
FIGURA 5 - ÁNGULOS DE RECTIFICACIÓN .....	41
FIGURA 6 - FRAGMENTACIÓN DE LA VIRUTA.....	56
FIGURA 7 - ZONA DE BUEN CORTE DEFINIDA POR SALES (1990) .....	69
FIGURA 8 - DESVIACIONES DE FORMA DEL PERFIL DE UNA SUPERFICIE	72
FIGURA 9 - RECORRIDO DE PALPAMIENTO PARA LA MEDICION DE RUGOSIDAD .....	74
FIGURA 10 - DISTRIBUCIÓN DE TROZAS DE CAPIRONA PARA SU ESCUADRADO .....	78
FIGURA 11 - BLOQUES OBTENIDOS DE LAS TROZAS DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	80
FIGURA 12 - OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS FÍSICO- MECÁNICOS .....	80
FIGURA 13 - PERFILES DE DIENTE EVALUADOS .....	81
FIGURA 14 - TABLEADO DE LOS BLOQUES .....	84
FIGURA 15 - CONEXIÓN DEL ANALIZADOR DIGITAL DE POTENCIA TIPO PINZA.....	85
FIGURA 16 - UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL.....	86
FIGURA 17 - DENSIDAD BASICA POR NIVEL DE ALTURA DEL FUSTE EN SEIS ÁRBOLES DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	97
FIGURA 18 - DUREZA LATERAL POR NIVEL DE ALTURA DEL FUSTE EN SEIS ÁRBOLES DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	97
FIGURA 19 - CONTENIDO DE SILICE POR NIVEL DE ALTURA DEL FUSTE EN SEIS ÁRBOLES DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	98

FIGURA 20 - VARIACION DE LA DUREZA LATERAL RESPECTO A LA DENSIDAD BASICA DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	100
FIGURA 21 - INTERACCION DEL PERFIL DE DIENTE CON EL ESPESOR DE VIRUTA PARA LA POTENCIA ÚTIL DE CORTE EN LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	110
FIGURA 22 - POTENCIA ÚTIL PROMEDIO PARA EL CORTE DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA.....	112
FIGURA 23 - INTERACCION DEL PERFIL DE DIENTE CON EL ESPESOR DE VIRUTA PARA EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Ra EN LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	115
FIGURA 24 - INTERACCION DEL PERFIL DE DIENTE CON EL ESPESOR DE VIRUTA PARA EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Rz EN LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	116
FIGURA 25 - PARAMETRO Ra PROMEDIO PARA EL CORTE DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA.....	118
FIGURA 26 - PARAMETRO Rz PROMEDIO PARA EL CORTE DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA.....	120
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE LA POTENCIA UTIL Y ESPESOR DE VIRUTA PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	124
FIGURA 28 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Ra Y ESPESOR DE VIRUTA PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	125
FIGURA 29 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Rz Y ESPESOR DE VIRUTA PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	126

FIGURA 30 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD $R_a$ Y POTENCIA ÚTIL PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	127
FIGURA 31 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD $R_z$ Y POTENCIA ÚTIL PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	128

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 - POTENCIAS INSTALADAS SEGÚN DIÁMETRO DEL VOLANTE....	31
TABLA 2 - COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL ACERO DE LAS HOJAS DE SIERRA CINTA .....	32
TABLA 3 - ANCHOS Y ESPESORES DE CINTA PARA DIFERENTES DIÁMETROS DE VOLANTE .....	35
TABLA 4 - PASOS SEGÚN VOLLMER WERKE PARA CINTAS SIN FÍN RECALCADAS .....	43
TABLA 5 - CLAVE PARA LA ASIGNACIÓN DE GRUPOS ENERGÉTICOS .....	70
TABLA 6 - CARACTERÍSTICAS DE LOS ARBOLES COLECTADOS.....	78
TABLA 7 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS FORMATOS DE DIENTE EMPLEADOS .....	82
TABLA 8 - DISTRIBUCIÓN DE LAS VELOCIDADES DE AVANCE BAJA, MEDIA Y ALTA PARA EL TABLEADO DE BLOQUES.....	83
TABLA 9 - CLASIFICACIÓN DEL ESPESOR DE VIRUTA POR TIPO DE ACABADO.....	89
TABLA 10 - CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> RELATIVAS A SU PROCESO DE CORTE .....	95
TABLA 11 - DISTRIBUCIÓN DE LA DENSIDAD BÁSICA EN LOS CORTES DE TABLEADO PARA 12 MÓDULOS DE <i>Calycophyllum spruceanum</i>	100
TABLA 12 - PARÁMETROS ANATÓMICOS DETERMINADOS EN LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	102
TABLA 13 - MATRIZ DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE ENTRE DUREZA LATERAL, DENSIDAD BÁSICA Y PARÁMETROS ANATÓMICOS DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	103
TABLA 14 - PARÁMETROS ANATÓMICOS DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> INHERENTES A SU DENSIDAD Y DUREZA LATERAL .....	104
TABLA 15 - PARÁMETROS DE CORTE PARA LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	106
TABLA 16 - EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS FORMATOS DE DIENTE EMPLEADOS PARA EL CORTE DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	107

TABLA 17 - ANALISIS DE VARIANCIA DE LA POTENCIA ÚTIL DE CORTE PARA LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA .....	109
TABLA 18 - VALORES MEDIOS DE POTENCIA ÚTIL DE CORTE PARA LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA .....	111
TABLA 19 - ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE PARA TRES CATEGORIAS DE ESPESOR DE VIRUTA Y DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	113
TABLA 20 - ANALISIS DE VARIANCIA DE LOS PARAMETROS Ra Y Rz PARA LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA .....	115
TABLA 21 - VALORES MEDIOS DEL PARAMETRO Ra PARA LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA.....	117
TABLA 22 - VALORES MEDIOS DEL PARAMETRO Rz PARA LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA.....	119
TABLA 23 - MATRIZ DE CORRELACION ENTRE POTENCIA UTIL, ESPESOR DE VIRUTA, PARAMETROS DE RUGOSIDAD Y FISICO-MECANICOS PARA EL CORTE CON EL DIENTE TIPO LOBO ....	121
TABLA 24 - MATRIZ DE CORRELACION ENTRE POTENCIA UTIL, ESPESOR DE VIRUTA, PARAMETROS DE RUGOSIDAD Y FISICO-MECANICOS PARA EL CORTE CON EL DIENTE TIPO ENCIA ...	122
TABLA 25 - PARÁMETROS DETERMINADOS PARA EL CORTE DE LA MADERA DE CAPIRONA CON DOS PERFILES DE DIENTE .....	132

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA	- Análisis de variancia
BWG	- Birmingham Wire Gauge
DAP	- Diámetro a la altura del pecho
m.s.n.m.	- Metros sobre el nivel del mar
NTP	- Norma Técnica Peruana
PSF	- Punto de saturación de las fibras
Pulg	- Pulgada
rpm	- Revoluciones por minuto
SAC	- Sociedad Anónima Cerrada
UTM	- Universal Transverse Mercator
V	- Volumen

## INDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>CONTEXTO Y PROBLEMA.....</b>	<b>21</b>
1.2.1	Objetivo general.....	23
1.2.2	Objetivos específicos.....	23
<b>2.</b>	<b>REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
2.1.	ESPECIE ESTUDIADA.....	24
2.1.1.	Descripción general.....	24
2.1.2.	Descripción y características tecnológicas de la madera.....	26
2.1.3.	Principales aplicaciones y potencial de la especie.....	29
2.2.	MÁQUINA DE SIERRA CINTA VERTICAL.....	30
2.2.1.	Tamaño.....	30
2.2.2.	Material de la cinta sinfín.....	31
2.2.3.	Dimensiones de la cinta sinfín.....	33
2.3.	GEOMETRÍA DEL DIENTE.....	36
2.3.1.	Perfil de la dentadura.....	36
2.3.2.	Ángulos elementales.....	38
2.3.3.	Ángulos libres laterales o de rectificación.....	40
2.3.4.	Paso.....	42
2.3.5.	Altura del diente.....	43
2.3.6.	Traba.....	44
2.3.7.	Área o seno de la garganta.....	46
2.4.	CONDICIONES DE MECANIZADO.....	47
2.4.1.	Velocidad de corte o velocidad lineal de la cinta.....	47
2.4.2.	Velocidad de avance o velocidad de alimentación.....	49

2.4.3.	Espesor de viruta o mordida .....	51
2.4.4.	Ancho de corte .....	53
2.4.5.	Altura de corte .....	54
2.5.	DINAMICA DE CORTE.....	55
2.5.1.	Esfuerzo de corte.....	55
2.5.2.	Factores de influencia sobre el esfuerzo de corte.....	57
2.5.3.	Resistencia específica de corte.....	65
2.5.4.	Potencia de corte.....	66
2.5.5.	Condiciones óptimas de corte y requerimientos energéticos .....	68
2.6.1.	Generalidades .....	71
2.6.2.	Factores que afectan la rugosidad superficial de la madera.....	75
<b>3.</b>	<b>MATERIAL Y METODOS.....</b>	<b>77</b>
3.1.	SELECCIÓN DE LA ESPECIE.....	77
3.2.	COLECCIÓN DE MATERIAL.....	77
3.2.1.	Selección de árboles y obtención de trozas.....	77
3.2.2.	Preparación y transporte de bloques.....	79
3.2.3.	Colección de muestras para caracterización de bloques.....	79
3.3.	CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE TABLEADO .....	80
3.4.	CARACTERIZACIÓN DE LA HOJA DE SIERRA CINTA.....	81
3.4.1.	Especificación de dimensiones de la cinta sinfín.....	81
3.4.2.	Identificación de perfiles de diente evaluados.....	81
3.4.3.	Determinación de la geometría del diente .....	82
3.5.	REALIZACION DEL ENSAYO DE CORTE CON SIERRA CINTA .....	83
3.5.1.	Selección de velocidades de avance .....	83
3.5.2.	Distribución de velocidades de avance en los bloques .....	83
3.5.3.	Tableado de bloques con sierra cinta .....	84

3.6.	MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL .....	86
3.7.	CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA DE CAPIRONA .....	87
3.7.1.	Determinación de la dureza lateral, contenido de humedad y densidad.	87
3.7.2.	Determinación del contenido de sílice .....	87
3.7.3.	Biometría de vasos y fibras .....	87
3.7.4.	Estimación de la fracción y porción de pared de fibra .....	88
3.8.	PROCESAMIENTO DE DATOS .....	88
3.9.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	92
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>95</b>
4.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> INHERENTES A SU CORTE.....	95
4.2.	ELEMENTOS ESTRUCTURALES MICROSCOPICOS EN LA MADERA DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> .....	101
4.3.	CONDICIONES DE CORTE PARA LA MADERA DE <i>Calycophyllum</i> <i>spruceanum</i> .....	105
4.4.	GEOMETRIA DE LOS FORMATOS DE DIENTE PARA EL CORTE DE LA MADERA DE <i>Calycophyllum. spruceanum</i> .....	107
4.5.	VARIACION DE LA POTENCIA DE CORTE Y DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN LA MADERA DE <i>Calycophyllum. spruceanum</i> .....	109
4.5.1.	Efecto de las variables estudiadas sobre la potencia útil de corte.....	109
4.5.2.	Efecto de las variables estudiadas sobre la rugosidad superficial .....	114
4.5.3.	Variación de la potencia de corte y de la rugosidad superficial con los parámetros densidad básica y dureza lateral .....	120
4.6.	ESTUDIO DE LOS PARAMETROS UTILIZADOS EN EL CORTE DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS FORMATOS DE DIENTE .....	123
4.6.1.	Análisis de la potencia útil de corte en función del espesor de viruta ....	123
4.6.2.	Análisis de la rugosidad superficial en función del espesor de viruta ....	125

4.6.3.	Análisis de la rugosidad superficial en función de la potencia útil de corte .....	126
4.7.	ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO DE CORTE UNITARIO Y COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN DE LA GARGANTA EN EL MECANIZADO DE <i>Calycophyllum spruceanum</i> CON DOS FORMATOS DE DIENTE .....	128
5.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>133</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>135</b>
	<b>ANEXO 1 - GRUPOS ENERGETICOS DE ASERRIO PARA ESPECIES SEGUN SU DENSIDAD AL 12% DE CONTENIDO DE HUMEDAD....</b>	<b>144</b>
	<b>ANEXO 2 - FORMATO DE EVALUACION DE LA TRABA PARA EL PERFIL DIENTE DE LOBO .....</b>	<b>151</b>
	<b>ANEXO 3 - FORMATO DE EVALUACION DE LA TRABA PARA EL PERFIL DIENTE EN CIA.....</b>	<b>152</b>
	<b>ANEXO 4 - CARACTERISTICAS DE LOS BLOQUES DE CAPIRONA EMPLEADOS EN EL ENSAYO DE ASERRADO .....</b>	<b>153</b>
	<b>ANEXO 5 - METRAJE DE CORTE DE CAPIRONA CON CAMBIO DE CUATRO CINTAS DURANTE EL REGISTRO DE VARIABLES DE CORTE POR MELENDEZ (1999) .....</b>	<b>153</b>
	<b>ANEXO 6 - ESCALA DE CALIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN SEGÚN CALZADA (1982).....</b>	<b>155</b>
	<b>ANEXO 7 - ELEMENTOS ESTRUCTURALES MICROSCOPICOS EN LOS BLOQUES DE CAPIRONA ENSAYADOS.....</b>	<b>155</b>

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 CONTEXTO Y PROBLEMA

En la actualidad la industria maderera peruana aprovecha una diversidad de especies forestales, de manera empírica sin un sustento técnico ni científico, lo cual evidencia serios problemas tecnológicos para su transformación mecánica y conlleva a la experimentación de tecnologías de procesamiento industrial con especies poco conocidas. Una especie que está presente en el mercado nacional e internacional es la capirona (*Calycophyllum spruceanum*) cuya demanda tiene una tendencia creciente por sus características tecnológicas y bajo costo (LLÚNCOR, ROEDER y YPUSHIMA, 2006). Esta madera se encuentra entre las seis especies de mayor importancia por el nivel de producción en el Perú (URBAN y ULLILEN, 2011), a lo cual puede agregarse su gran potencial de uso en plantaciones a campo abierto a pequeña escala.

La escasez de investigaciones sobre puntos críticos en la cadena productiva de la madera ha limitado la evolución del mecanizado de las maderas tropicales del Perú, debido a que la industria viene aplicando el ensayo-error para disponer de un conjunto de buenas prácticas que optimicen el procesamiento de los principales productos maderables, limitando el tiempo de corte, el desgaste del filo y el consumo de energía, sin mermar la calidad de superficie.

La falta de estudios tecnológicos completos de especies maderables con valor comercial potencial en los bosques primarios residuales y bosques secundarios, dificulta su introducción al mercado. Dado que la mayoría de especies producen maderas blandas y claras, que pueden resultar poco atractivas, o maderas duras con algunas limitaciones para su transformación, deben estudiarse modelos y procesos de acabado que acentúen sus ventajas comparativas y reduzcan sus limitaciones (SANTIAGO, GUEVARA y ESPINOZA, 2013).

El estudio de las condiciones de corte en el aserrío es un aspecto tecnológico vinculado directamente a las 80 especies maderables comercializadas actualmente en el mercado peruano, que puede ayudar a mejorar su aprovechamiento y productividad, así como establecer los parámetros de corte por grupo de especies que orienten el mecanizado de maderas con requerimientos energéticos similares,

y de esta manera expandir los horizontes de negociación e inversión de una industria maderera con programas de corte que optimizan sus recursos.

El hecho de disponer de una gama de maderas amazónicas con propiedades y características extremas, implica enfrentar en su procesamiento industrial diversas exigencias del producto final que determinan su aceptación en unas aplicaciones más que en otras. De allí que la transformación mecánica de la madera requiere mantener un alto nivel de productividad y calidad para competir con éxito en los mercados nacionales e internacionales, lo cual demanda el monitoreo de los procesos de corte con fines de su optimización, para obtener productos con convenientes niveles de calidad superficial y pequeños consumos energéticos en especies madereras (VEGA y AGUILERA, 2005). Ante este panorama el estudio de la potencia de corte en maderas duras como la capirona se sustenta en la necesidad de evaluar el consumo de energía e identificar el deterioro de la superficie después del corte para su respectiva correlación.

En la transformación mecánica de la capirona la eficiencia del proceso de corte con sierra cinta dentro de límites esperados, no sólo depende del funcionamiento de la máquina, sino de un conjunto de variables relacionadas con las características de la madera, condiciones de trabajo y estado del filo (GARCÍA et al., 2002). Por ello la optimización de recursos y de herramientas se puede alcanzar, estableciendo controles rigurosos que permitan ajustar algunos parámetros de corte, tales como la velocidad de corte, velocidad de avance y altura de corte, con el fin de conseguir productos de mejor calidad y paralelamente disminuir los costos asociados al consumo de energía.

Las variables que intervienen en los procesos de aserrío y reaserrío de cada especie maderable son materia de investigación, teniendo en cuenta que pueden proporcionar parámetros e indicadores de su dificultad en el procesamiento mecánico, e inclusive estimar con suficiente seguridad rangos de consumo energético en función a la dureza de la madera y a la geometría del perfil de diente seleccionado. De allí que se presta mayor atención a la reducción de los esfuerzos de corte e incremento de la capacidad de almacenamiento en la garganta del diente seleccionado por su repercusión positiva en el proceso de aserrío.

En el aserrío de las maderas amazónicas del Perú se vienen utilizando sin sustento técnico los perfiles de diente tipo lobo y encía, con diferentes ángulos del

diente, independientemente de la dureza de madera. El diente de lobo es empleado tradicionalmente en los aserraderos de Pucallpa, mientras que el perfil encía, aunque fue introducido hace 15 años es poco común debido a su afilado de sumo cuidado en su garganta plana. La geometría de ambos perfiles se diferencia de manera práctica en el paso y ancho del recalcado según se corte una madera blanda o dura, ignorando las otras características del diente.

En este contexto la experimentación de diferentes formatos de diente en el aserrío de trozas de especies amazónicas, implica la búsqueda de un perfil que solicite menos energía por sus características geométricas idóneas para la dureza de madera mecanizada. Cuando la dificultad del corte se cuantifica como indicadores de gestión, son relevantes en la estructura de costos de la industria del aserrío, que constantemente debe preocuparse en la forma de procesar maderas con una diversidad de durezas típicas de estas especies.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo general

- Obtener madera aserrada de *Calycophyllum spruceanum* (capirona), con una mejor calidad de superficie y menor consumo de energía en el corte con sierra de cinta.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar el efecto de la variación del formato de diente y del espesor de viruta sobre la potencia útil y la rugosidad superficial en tres planos de corte de la madera de capirona.
- Estimar el esfuerzo de corte unitario en el mecanizado de la madera de capirona con sierra de cinta.
- Estimar el coeficiente de utilización de la garganta para la velocidad de avance, altura de corte y formatos de diente evaluados en el mecanizado de la madera de capirona con sierra de cinta.

## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. ESPECIE ESTUDIADA

#### 2.1.1. Descripción general

##### **Familia**

Rubiaceae

##### **Nombre científico**

*Calycophyllum spruceanum* (Benth) Hooker f. ex Schuman

##### **Nombres comerciales**

Sibille (2006b) asigna a la especie *Calycophyllum spruceanum* los siguientes nombres comunes: capirona (Perú), guayabochi (Bolivia), pau mulato (Brasil), guayabete (Colombia), corusicao (Ecuador), araguato (Venezuela), ibiro moroti (Argentina).

##### **Distribución y hábitat**

Encarnación (1983) describe a *C. spruceanum* como una especie inconfundible por su aspecto gigante en el bosque que a veces crece en manchaes llamados “capironales”. Según los resultados de los inventarios forestales disponibles y de acuerdo a las zonas, el volumen bruto estimado de esta especie asciende a 4,5 m<sup>3</sup> por ha (SIBILLE, 2006b).

Chavesta (2005) señala su presencia en los bosques tropicales de América del Sur, principalmente en la Amazonia y Sibille (2006b) la encuentra en los bosques primarios y secundarios de la Amazonía del Perú y Brasil, en las formaciones ecológicas de bosque seco tropical (bs-T), bosque húmedo tropical (bh-T) y bosque muy húmedo tropical (bmh-T), por debajo de los 1.200 msnm. Reynel, Pennington y Pennington (2016) aclaran su distribución en la selva baja y ceja de selva hasta 700 msnm, en bosques primarios.

La Confederación Nacional de la Madera (1994) y la Cámara Nacional Forestal (1999) ubican a esta Rubiaceae en los departamentos de Amazonas, San Martín, Huánuco, Loreto, Madre de Dios y Ucayali. Reynel et al. (2003) indican que *C. spruceanum* es frecuente en bosques secundarios pioneros y tardíos, en suelos mayormente limosos o arenosos, aluviales, fértiles, a veces temporalmente

inundables y en las zonas ribereñas. La Junta Nacional del Acuerdo de Cartagena - JUNAC (1981) agrega que la encuentra distribuida en Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia.

### **Descripción del árbol**

La capirona (pau mulato) es un árbol de 50 a 120 cm de diámetro y 20 a 35 m de alto, con el fuste cilíndrico regular y la copa en el último tercio (FIGURA 1). Corteza externa lisa, color verde, homogénea, lustrosa, dando la impresión de un poste bien pulido, provista de ritidoma papiráceo rojizo que se desprende en placas grandes, corteza interna homogénea, muy delgada de 1 a 2 mm de espesor, color crema verdusco (REYNEL, PENNINGTON y PENNINGTON, 2016). Según el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR (2018) en la ecozona Selva Baja, la distribución por clases diamétricas de *Calycophyllum spruceanum* muestra problemas en la estructura diamétrica de su población natural, observándose que los individuos mayores a 40 cm de DAP están prácticamente ausentes.

### **Silvicultura**

En plantaciones puras de *C. spruceanum* a 5,3 años de edad se obtiene una altura total de 13,37 m, un crecimiento de hasta 12,7 cm en DAP, un incremento medio anual en DAP de 2,4 cm, un incremento medio anual en altura de 2,51 m, un área basal de 10,17 m<sup>2</sup> y un volumen 81,57 m<sup>3</sup> por ha. Las plantaciones más productivas se ubican en la parte más alta de la cuenca del Aguaytia-Perú, con mayores precipitaciones. (UGARTE, 2008).

La capirona posee excelentes cualidades para plantación a campo abierto, en macizos puros o en combinaciones agroforestales. Abunda en bosques aluviales y debido a su fácil regeneración natural es una especie ideal para el manejo de sucesiones secundarias. Puede manejarse en rotaciones cortas de 20 a 30 años para la producción de maderas de dimensiones medianas (CÁMARA NACIONAL FORESTAL, 1999).

Normalmente se planta a 2,5 x 2,5 m o a 3 x 3 m. En los mejores sitios y con un mantenimiento intensivo puede cosecharse a los 15 años después de plantado. Si el mantenimiento no es tan intensivo, una edad más realista en esos sitios sería a los 20 años. Rebrotará vigorosamente después del corte final. En general se debe ralear cada 2 o 3 años, hasta llegar al número final de árboles por hectárea, que está entre 200 y 250. Aunque se poda a sí misma cuando las ramas ya están algo

gruesas, para evitar la formación de nudos grandes es mejor podar a partir del tercer o cuarto año de edad (WIGHTMAN, CORNELIUS y UGARTE-GUERRA., 2006).

FIGURA 1 - ARBOL DE CAPIRONA



FUENTE: Plantar - Consorcio Agroforestal (s.f)

### 2.1.2. Descripción y características tecnológicas de la madera

#### **Características macroscópicas y físico-mecánicas**

JUNAC (1981) indica una albura de color blanco y transición gradual a duramen de color marrón muy pálido amarillento; para la Cámara Nacional Forestal (1999) tiene albura no diferenciada de color blanco con pardo claro, a veces con tonalidad gris. Acevedo y Kikata (1994) y Chavesta (2005) la describen en condición seca al aire con albura de color blanco cremoso y duramen blanco amarillento, con grano recto a ligeramente entrecruzado, textura fina y brillo medio, conforme se aprecia en la FIGURA 2.

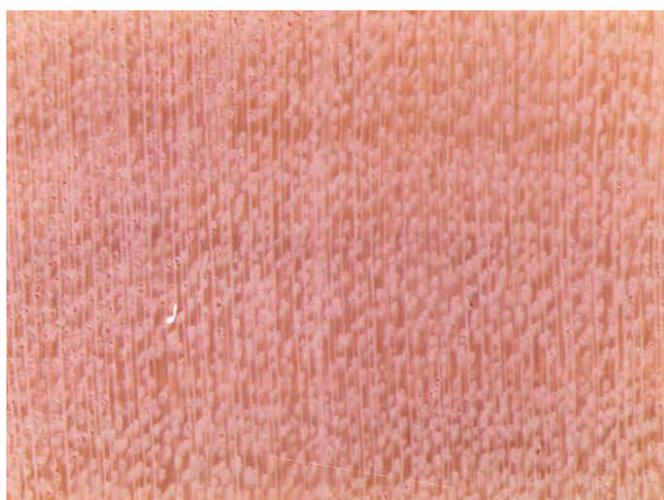
FIGURA 2 - MADERA DE CAPIRONA



Sección Tangencial



Sección Radial



Sección Transversal (30x)

FUENTE: CHAVESTA (2005)

Llúncor, Roeder e Ypushima (2006) destacan en el plano tangencial la excelente calidad del cepillado porque su orientación de fibras es similar a una especie de grano recto, además de su buen comportamiento al filo de la cuchilla por la superposición de las fibras que no favorece la presencia de defectos en grandes magnitudes. Agregan que el torneado con un ángulo de corte de  $0^\circ$  tiende a generar grano astillado debido a que las fibras y vasos son seccionadas por un efecto de palanca y no de corte, pudiendo por ello ser rechazada la pieza de madera. Sibille (2006b) precisa que, dada la pequeñez del diámetro de sus poros,

se evidencia un ahorro notorio en el uso del material de recubrimiento.

Díaz, Pecho de la Cruz y Guarda (s.f) determinan una densidad básica de  $0,64 \text{ g.cm}^{-3}$  para la madera de capirona proveniente de una plantación de ocho años en Tingo María, Perú. Para bosques nativos de la misma especie: Viscarra y Lara (1992) reportan en Bolivia una densidad básica de  $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$  y una dureza lateral de  $979 \text{ kg.cm}^{-2}$  al 30% de contenido de humedad, mientras que según Paula y Costa (2011) en Brasil presentan una densidad básica de  $0,895 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Chavesta (2005) recopila para *C. spruceanum* procedente de bosque natural, las propiedades físico-mecánicas que siguen a continuación.

- Densidad básica :  $0,76 \text{ g.cm}^{-3}$
- Corte paralelo a las fibras :  $87,00 \text{ kg.cm}^{-2}$
- Dureza lateral :  $425,00 \text{ kg.cm}^{-2}$
- Tenacidad :  $2,00 \text{ kg-m}$

Pantigoso (2009) determina para la especie en estudio proveniente de una plantación de nueve años en Ucayali, Perú las propiedades físico-mecánicas que se indican a continuación.

- Densidad básica :  $0,61 \text{ g.cm}^{-3}$
- Corte paralelo a las fibras :  $95,56 \text{ kg.cm}^{-2}$
- Dureza lateral :  $681,31 \text{ kg.cm}^{-2}$
- Tenacidad :  $2,71 \text{ kg-m}$

### **Aserrío, secado y durabilidad**

La Confederación Nacional de la Madera (1994) señala que la capirona a pesar de su elevada densidad no presenta dificultades en el aserrío, aun empleando tecnología tradicional. Sibille (2006b) advierte que al aserrar esta madera se requiere de una supervisión muy cercana que garantice el cambio oportuno de las hojas de corte, debido a que ocasiona alto desgaste del filo. Agrega que los valores de sílice de 0,14% para esta especie son muy bajos y que generalmente una madera se considera abrasiva cuando su contenido de sílice supera el 0,5%.

Es de aserrío moderadamente fácil, lo que se refleja en su elevada productividad. Por defectos en la preparación de las cintas y la dureza de la madera muchas piezas no salen bien calibradas. En madera aserrada de 3 pulgadas alcanza un rendimiento de 69,2% y una productividad de  $43,28 \text{ m}^3$  por turno

(CÁMARA NACIONAL FORESTAL, 1999). Después del aserrío, cuando la especie está en cuartones, deberá protegerse del sol y de la lluvia y apilarse correctamente (SIBILLE, 2006b).

La Cámara Nacional Forestal (1999) califica a la capirona como una madera moderadamente resistente al ataque biológico y de buen secado con un programa suave de 10 días para espesores menores de 30 mm. Sibille (2006b) indica que su secado es regular y requiere de un programa suave de 14 días para evitar el riesgo de agrietamiento y lograr una humedad promedio de 12%.

### 2.1.3. Principales aplicaciones y potencial de la especie

La capirona se puede utilizar en ebanistería, pisos (parquet), puertas, ventanas, molduras, tarugos, construcción naval, estructuras pesadas (vigas, viguetas y columnas), machihembrados, carrocerías, tornería, artículos deportivos (raquetas de tenis y ping pong), mangos de herramientas, artesanía y enseres que tienen contacto con alimentos (cucharones, agitadores y tablas para picar) (SIBILLE, 2006b).

Es usada extensamente para construcción rural (puntales, travesaños) y tiene muy buenas cualidades para la carpintería y moldurado, su demanda para la producción de parquet a nivel nacional es creciente (REYNEL, PENNINGTON y PENNINGTON, 2016). La demanda de esta madera para la fabricación de muebles en el mercado nacional es alta. (WIGHTMAN, CORNELIUS y UGARTE-GUERRA, 2006).

La capirona ha sido incluida en la reforestación con especies nativas dentro del Programa para la gestión ambiental y social de los impactos indirectos del corredor vial interoceánico sur; así como, en el plan de negocio “Aprovechamiento y exportación de productos maderables con valor agregado y certificación FSC” financiado por FONDEBOSQUE en Madre de Dios-Perú (URBAN y ULLILEN, 2011).

De acuerdo a las estadísticas de la Dirección General de Forestal y Fauna (1993), la capirona (pau mulato) se asierra desde 1991. En el anuario 2016 SERFOR (2018) registra para esta especie un volumen aserrado de 4.145,72 m<sup>3</sup> que representó el 1,3 % de la producción total de madera aserrada en el Perú. Sin

embargo, en el 2005 alcanzó su récord de producción con un volumen aserrado de 54.939,66 m<sup>3</sup>, de acuerdo a las estadísticas del INRENA (2006).

## 2.2. MÁQUINA DE SIERRA CINTA VERTICAL

### 2.2.1. Tamaño

Según JUNAC (1989) existen sierras de cinta con volantes desde 1 m hasta 3,3 m de diámetro. El Instituto Forestal (1989) señala que las sierras cintas se fabrican variando los diámetros de los volantes entre 0,70 y 2,40 m y las potencias necesarias, entre 15 y 200 hp. French (1977) aclara que un mayor diámetro de volante proporciona una mejor tracción para la transmisión de la potencia desde el motor a la sierra en el corte y son necesarias para las sierras de calibres más altos.

En los trópicos prácticamente se prefiere la instalación de una sierra principal de cinta de 1,8 m de diámetro o más. Esta dimensión se puede conservar mientras las condiciones sean realmente fáciles, pero tan pronto como el diámetro de las trozas o su densidad aumente, se deben preferir sierras de 2,10 m. En el caso de maderas muy duras con trozas medianas (80 cm) o de maderas duras con trozas mayores, es poco probable que una sierra de menos de 2,4 m permita un aserrío fácil y continuo. Cuando las dimensiones de las sierras de cinta se eligieran con un margen de seguridad suficiente, es posible variar su velocidad de corte en proporciones relativamente grandes mediante el ajuste de la velocidad lineal de la cinta, el paso del diente y el espesor de viruta; por lo tanto, se tiene un cierto margen de maniobra para armonizar el ritmo de funcionamiento de una cinta con los ritmos de otras sierras. (CHARDIN, 1962).

Gonçalves (2000) señala la existencia de modelos de sierras verticales que emplean cintas angostas y anchas. En el primer tipo las máquinas poseen volantes de 0,3 m a 1,0 m de diámetro y generalmente la madera es apoyada sobre una mesa de corte. Las máquinas que utilizan cintas anchas y poseen un riel con carro o un sistema de alimentación de madera hasta el corte, sólo hacen cortes rectos y son usadas para despiezado y tableado.

Gauthier (1986) destaca en las sierras de cinta de Ucayali-Perú la preferencia por los diámetros de volante de 1,50 m con un ancho correspondiente a 7 pulgadas

y un motor de 100 hp. Williston (1989) indica que están más generalizadas las sierras de cinta de limitada potencia que holgadas de potencia, por lo menos donde la troza es probable que sea de gran diámetro y madera dura. Sales (1990) en función del diámetro de los volantes orienta para un régimen de velocidad de corte de 30 a 45 m.s<sup>-1</sup>, con las potencias indicadas en la TABLA 1.

TABLA 1 - POTENCIAS INSTALADAS SEGÚN DIÁMETRO DEL VOLANTE

DIÁMETRO DEL VOLANTE (m)	POTENCIA (hp)
1,50	80,4 – 120,6
1,70	87,1 – 140,7
1,80	120,6 – 167,5
2,10	147,4 – 227,8
2,40	174,2 – 274,7
2,70	214,4 – 328,3
3,00	254,6 – 395,3

FUENTE: SALES (1990)

De acuerdo con Vital (2013) la sierra de cinta vertical destaca por lo siguiente: más adecuada para trozas con diámetro muy diverso, buena para el corte de maderas duras, produce un cordón de aserrín de menor espesor que otros tipos de sierra, corte liso, permite gran producción con relativamente poco consumo de energía, es una máquina cara de mantenimiento muy especializado según el espesor de cinta y de montaje difícil. Agrega que en Brasil la sierra de cinta para el despiece de trozas posee las siguientes características:

- Diámetro de los volantes : 800 a 1.500 mm
- Ancho de la hoja de sierra : 76 a 413 mm
- Motor : 20 a 100 cv
- Rotación del volante : 370 a 570 rpm
- Longitud de la hoja : 5,70 a 10,10 m

### 2.2.2. Material de la cinta sinfín

Según JUNAC (1989) la sierra de cinta para aserrío debe ser manufacturada de un acero que reúna las siguientes características: gran dureza junto con tenacidad y maleabilidad, gran tenacidad frente a los impactos inherentes al corte

aún a bajas temperaturas, resistencia a los esfuerzos de impacto repetidos con tendencia a la fatiga, alta flexibilidad y resistencia a la fatiga, elasticidad y homogeneidad estructural.

Ninin (1986) destaca que los aceros para cintas pueden ser al níquel, al níquel-cromo, al níquel-carbono o al cromo-carbono y que el fleje para sierras de cinta debe ser recto, plano y libre de tensiones para darle buena preparación con relativa facilidad. Dalois (1990) complementa que las hojas de acero deben dar resistencia y elasticidad para soportar las dificultades causadas por el movimiento que las anima.

Los aceros más utilizados para el elemento de corte son: aceros al cromo, aceros rápidos y aceros subcarbureados, que, aunque tienen una respuesta negativa frente a la temperatura provocada por el rozamiento contra la madera, son elementos utilizables en sierras de cinta con unas buenas características de resistencia al impacto, facilidad de afilado y un precio muy asequible (GARCIA et al., 2002).

Vital (2013) considera satisfactoria para una sierra de cinta ancha con espesor superior a 1 mm, la composición química del acero presentada en la TABLA 2. Schrewe (1983) precisa que este tipo de acero, que se utiliza también para la fabricación de sierras circulares, está laminado en frío, templado y revenido.

TABLA 2 - COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL ACERO DE LAS HOJAS DE SIERRA CINTA

ELEMENTO QUÍMICO	COMPOSICIÓN APROXIMADA (%)	
	ACERO TIPO 1	ACERO TIPO 2
Carbono	0,750	0,800
Silicio	0,200	0,250
Manganeso	0,350	0,450
Fósforo	0,030	0,015
Azufre	0,020	0,015
Níquel	2,000	2,600

FUENTE: VITAL (2013)

### 2.2.3. Dimensiones de la cinta sinfín

Schrewe (1983) enfatiza sobre las características técnicas de la máquina que usará una hoja de sierra cinta, dado que, con la sola excepción del diente, todos los factores para dimensionar una cinta dependen específicamente de los volantes de la sierra. Schrewe (1983), JUNAC (1989), SANDVIK (1999), Vignote y Martínez (2006) y Tuset et al. (2007) especifican una sierra cinta con la siguiente información esencial: espesor, ancho, longitud y características técnicas de su dentadura.

Sales (1990) destaca la importancia del dimensionamiento de las hojas al revisar con detalle la distribución de las fuerzas en las proximidades del filo. La fuerza normal a la trayectoria de la herramienta puede ser dirigida de manera diferente dependiendo de la influencia del espesor de viruta, ángulo de ataque y agudeza del filo.

#### **Espesor**

Diversos especialistas coinciden en que el espesor de la cinta no debe exceder  $1/1.000$  del diámetro del volante (INSTITUTO FORESTAL, 1989; JUNAC, 1989; UDDEHOLM, 1993; GONÇALVES, 2000; GARCÍA et al., 2002). SANDVIK (1999) recomienda esta regla empírica para hojas con un espesor inferior a 1,47 mm; Williston (1989) lo hace para espesores de 1,27 mm o menos y Vignote y Martínez (2006) aplican la regla para diámetros menores a 1.200 mm. En la práctica esto ha demostrado buenos resultados y asegura un esfuerzo de flexión inferior a  $200 \text{ N.mm}^{-2}$  (VITAL, 2013).

Schrewe (1983), Ninin (1986) y Sandvik (1999) admiten que el espesor de la cinta no debe ser superior a  $1/1.200$  del diámetro del volante. Según Sandvik (1999) la relación en mención es adecuada para hojas que superan 1,47 mm; Schrewe (1983) la condiciona a diámetros de volante mayores de 1,20 m. García et al (2002) acotan que el espesor esté comprendido entre  $1/1.000$  y  $1/1.250$  y lo más habitual es usar  $1/1.100$  que según Vignote y Martínez (2006) se aplica para diámetros mayores a 1.200 mm.

El diámetro de volante debe ser por lo menos de 1.200 a 1.400 veces el espesor de la cinta cuando la hoja es más gruesa que 1,27 mm. Las volantes que tienen un diámetro demasiado pequeño para el espesor de la cinta estresan excesivamente la hoja causando grietas por fatiga (WILLISTON, 1989).

Schrewe (1983) precisa que el espesor determina la vida útil de la sierra y la precisión del corte. Sandvik (1992) agrega que una hoja delgada aumenta su vida útil dado que está sometida a menores esfuerzos de doblado, pero corre mayor riesgo de rotura. Según JUNAC (1989) espesores delgados significan mayor flexibilidad y por lo tanto menor fatiga, pero al mismo tiempo menor rigidez y menor precisión de corte.

Ninin (1986) señala que el espesor o calibre de la sierra influye considerablemente en la resistencia y capacidad de corte, y tiene una relación directa con el diámetro de los volantes. El Instituto Forestal (1989) considera para el aserrado de trozas espesores de sierra entre 0,8 y 4 mm como máximo.

Los aserraderos de Pucallpa emplean comúnmente cintas de 1,24 mm, 1,47 mm y 1,65 mm de espesor en las volantes de 1,20 m, 1,50 m y 1,80 m de diámetro, respectivamente (OTAROLA, 1991).

### **Ancho**

Ciertos especialistas al igual que Uddeholm (1993) determinan el ancho máximo de cinta como la suma del ancho de volante, altura del diente y 3 a 5 mm adicionales; este ancho límite según Vignote y Martínez (2006) se justifica porque la sierra ofrece mayor resistencia y duración por su anchura, pero presenta el problema de no poderse colocar en la máquina de aserrar.

Williston (1989) sustituye el rango aludido por 6,35 mm. García et al. (2002) sugieren sobredimensionar el ancho en 15 mm para que los dientes de la hoja sobresalgan de las volantes y establecen su umbral de uso para el reafilado en 1/3 de su anchura.

El Instituto Forestal (1989) anota que una sierra más ancha tiene mayor estabilidad durante el proceso de corte y permite mayores velocidades de avance. Advierte que las cintas amplias exigen una mejor preparación, especialmente en el tensionado y afilado.

Para JUNAC (1989) el ancho de la hoja de sierra varía directamente con el diámetro de los volantes; por su parte Williston (1989) precisa anchos y calibres de cinta BWG con sus espesores equivalentes en mm, frecuentemente recomendados y utilizados con éxito para diferentes diámetros de volante que se indican en la TABLA 3.

De acuerdo con JUNAC (1989) para un mismo espesor de cinta, dependiendo del diámetro de volantes, las cintas más anchas son de mayor capacidad de corte, ya que permiten la aplicación de una carga mayor para tensar la cinta y proporcionan una vida útil más larga a la herramienta.

TABLA 3 - ANCHOS Y ESPESORES DE CINTA PARA DIFERENTES DIÁMETROS DE VOLANTE

DIÁMETRO DE VOLANTE (m)	ANCHO DE CINTA (cm)	CALIBRE BWG	ESPELOR DE CINTA (mm)
1,52	12,70 – 22,86	17	1,473
1,68	17,78 – 27,94	16	1,651
1,83	20,32 – 33,02	15	1,829
2,13	25,40 – 35,56	14	2,108
2,44	30,48 – 40,64	13	2,413
2,74	35,56 – 40,64	12	2,769
3,05	35,56 – 45,72	11	3,048

FUENTE: WILLISTON (1989)

### Longitud

García et al (2002) explican que, no obstante, la longitud viene fijada por el diámetro de los volantes y su distancia entre ejes, para asegurar rendimientos óptimos del equipo, dicha longitud debe ser la menor posible, asegurando de esta manera una mejor rigidez de la hoja. Habitualmente está comprendida entre seis y ocho veces el diámetro de los volantes. Según Otarola (1991) para obtener la longitud apropiada, se debe conocer el margen de aprovechamiento, en la mayoría 30 cm, que se consigue con el desplazamiento perpendicular del volante superior.

Sandvik (1992) y Uddeholm (1993) sugieren cortar el fleje al largo máximo que admite la máquina, con lo cual la hoja puede acortarse en caso de deterioro; JUNAC (1989) aclara que es mejor hacerlo a una longitud algo menor, con el fin de permitir el tensado sobre la longitud de la máquina. El Instituto Forestal (1989) estima que una sierra larga se mantiene en funcionamiento por mayor tiempo ya que tiene mayor número de dientes que participan en el proceso de corte, pero es menos estable y pierde su tensión más rápido que una sierra más corta.

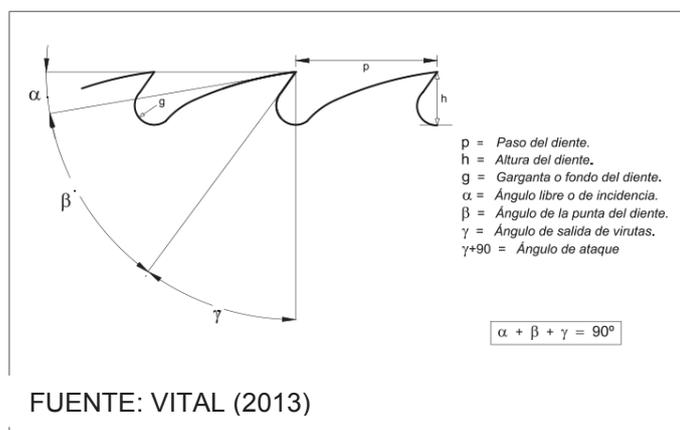
## 2.3. GEOMETRÍA DEL DIENTE

### 2.3.1. Perfil de la dentadura

La dentadura debe cortar la madera por levantamiento de las astillas y evacuarlas (MOLINA y DEL CASTILLO, 2007). Una dentadura de sierra se caracteriza por los siguientes elementos: perfil, paso, altura, capacidad de garganta, traba, ángulos de ataque, libre y de hierro (ANTOINE, 1960; KOCH, 1964; WILLISTON, 1989; DALOIS, 1990; GONÇALVES, 2000; TUSET et al., 2007). En el caso de dientes recalcados o estelitados Ninin (1986), JUNAC (1989), Sales (1990) y Vital (2013) también incluyen los ángulos libres laterales.

Los elementos de un diente de sierra que determinan su forma o geometría, conforme se muestra en la FIGURA 3, deben especificarse de acuerdo con los diferentes factores que influyen durante la operación de corte; en la FIGURA 3 se aprecia que la suma del ángulo de salida de virutas ( $\gamma$ ), ángulo de la punta del diente ( $\beta$ ) y ángulo libre o de incidencia ( $\alpha$ ) totaliza  $90^\circ$  (VITAL, 2013).

FIGURA 3 - ELEMENTOS DEL DIENTE DE UNA HOJA DE SIERRA-CINTA



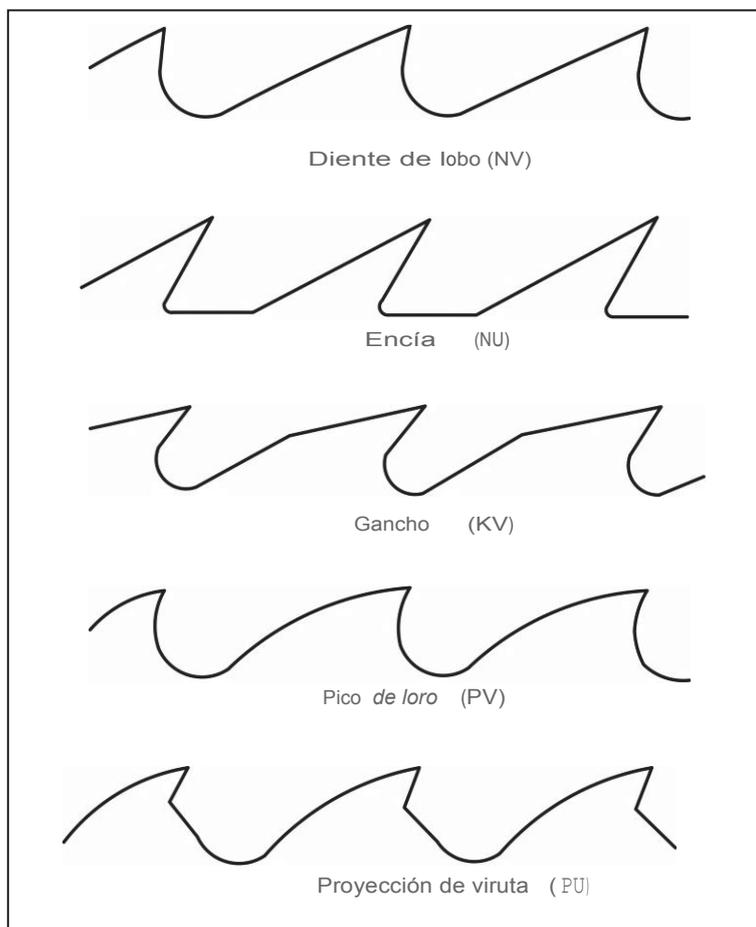
De acuerdo al sistema internacional, el Instituto Forestal (1989) designa cuatro perfiles de dentadura básica para sierras cinta de hasta 400 mm de ancho que son los siguientes: NV (diente de lobo), NU (encía), PV (pico de loro) y PU (astilla proyectada). Gutiérrez y Gutiérrez (1982a), Williston (1989) y Vital (2013) comparten la denominación de los perfiles graficados en la FIGURA 4 como: S (pico de loro), N (diente de lobo), O (diente encía) y lomo trapezoidal (diente gancho). Ninin (1986),

JUNAC (1989), Dalois (1990) y Vital (2013) designan al perfil PU como "proyección de viruta".

Gutiérrez y Gutiérrez (1982a) proponen el diente de lobo para el aserrado de espesores sobre 50 mm, especialmente para maderas duras, por tratarse de un diente que presenta buena resistencia y excelente estabilidad lateral. SANDVIK (1999) acota que este perfil es muy usado para el aserrado de troncos y en el reaserrado, tanto en maderas blandas como duras. García et al. (2002) recomiendan el pico de loro proyectado para maderas tropicales y especies duras por su facilidad de evacuación de residuos.

Según el CITE madera (2012) el diente de lobo es un diente fuerte que puede ser adecuado para maderas extremadamente duras. Tuset et al. (2007) también recomiendan este perfil, en especial para maderas duras teniendo en cuenta su garganta comparativamente escasa. Sin embargo, el Instituto Forestal (1989) estima que dado su perfil presenta menor resistencia y es recomendado para maderas blandas.

FIGURA 4 - PERFILES BÁSICOS DE DIENTES PROPUESTO POR JUNAC (1989)



CITE madera (2012) considera al perfil encía como una forma de diente ideal que en general es adecuado para maderas tanto duras como blandas. Su garganta de base plana y gran área de la misma reduce el riesgo de agrietamiento. Dalois (1990) señala que este perfil con el aumento de la capacidad de la máquina y de las hojas de sierra cinta, fue sustituido gradualmente por el diente pico de loro.

French (1977) indica que los dientes pico de loro americano han dado buenos resultados en el corte de maderas duras tropicales, sus perfiles son tan robustos que su desgaste con el constante afilado es mínimo, aunque García et al. (2002) destacan su uso en maderas blandas y coníferas con velocidades de avance de  $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

De acuerdo con Vignote y Martínez (2006) al diente se le busca dar una forma tal que el volumen de viruta alojable en la garganta sea máximo. Carmo *et al.* (2014) afirman que, en los diversos perfiles de dientes utilizados en Brasil para el aserrío de madera, normalmente sólo varía la altura del diente, y en algunos casos, el ángulo de salida de la viruta.

Vital (2013) menciona como factores para la elección del perfil del diente a los siguientes: tipo de madera, plano de corte, velocidad de corte, velocidad de avance y espesor de la sierra. Schrewe (1983), Ninin y Escobar (1986), Uddeholm (1993) y Sandvik (1999) también consideran un factor esencial a la altura de corte.

### 2.3.2. Ángulos elementales

Los ángulos elementales del diente son importantes para el rendimiento de la sierra de cinta, de allí que deben determinarse adecuadamente porque definen: el poder de penetración de la hoja en la madera, la rigidez del diente y el aguante del corte (MOLINA y DEL CASTILLO, 2007).

Estos ángulos característicos permiten a la herramienta de corte conseguir una mayor eficacia del corte, un menor desgaste en la herramienta y un mejor desalojo de la viruta arrancada de la madera (VIGNOTE Y MARTÍNEZ, 2006).

#### **Ángulo de salida de viruta**

Para algunos autores como Schrewe (1983) el ángulo de salida de viruta es de primordial importancia, por su incidencia sobre la eficiencia de corte y por ende la capacidad productiva de la máquina. Cabe resaltar que este ángulo depende del

soporte de la herramienta, tanto como del tipo de madera a aserrar (MOLINA y DEL CASTILLO, 2007).

Gutiérrez y Gutiérrez (1982a), Ninin (1986), JUNAC (1989) y otros especialistas coinciden en la elección del ángulo de salida de acuerdo al tipo de madera, velocidad de avance, velocidad de corte y forma del diente. Altas velocidades de avance requieren mayores ángulos de salida que velocidades de avance más lentas, así como sierras para cortar maderas blandas precisan mayores ángulos de salida que para cortar maderas más duras (GONÇALVES, 2000).

Según Dalois (1990) el ángulo de salida varía de 12° a 36°. Es obvio que para utilizar estos valores cada aserrador debe determinar sus valores óptimos en función de las características de la máquina. El serpenteo de la cinta es una indicación de que se superó el valor límite. Uddeholm (1993) elige un ángulo de 20° para una velocidad de alimentación de 8 a 30 m.min<sup>-1</sup>. Sandvik (1999) propone para maderas duras ángulos de salida de 15° a 25° en dientes recalcados u hojas estelitadas.

Tuset et al. (2007) recomiendan para maderas duras un rango de 22° a 28° en cintas anchas (más de 50 mm) con recalcado. La Cámara Nacional Forestal (1991) sugiere a los aserraderos de Pucallpa, emplear ángulos de 30° con maderas de densidad media y ángulos de 25° con maderas de densidad alta.

Vital (2013) atribuye la capacidad de corte en las sierras circulares al ángulo de ataque y en las sierras cinta al ángulo de salida de virutas. Agrega que para el despiezado de madera dura generalmente se emplea un ángulo de salida de virutas alrededor de 12° y en el caso de madera más densa este ángulo debe ser menor para aumentar la resistencia del diente.

### **Ángulo libre o de incidencia**

Gonçalves (2000) señala que este ángulo debe ser suficiente para que el lomo del diente no toque la madera después del corte, evitando fricción y generación de calor. Grandes ángulos de incidencia disminuyen la fuerza de avance de la madera, sin embargo, aumenta la tendencia de deterioro del diente, por estar vinculado a pequeños ángulos de hierro. Sales (1990) diferencia el ángulo libre en posterior y lateral.

Schrewe (1983) y Tuset et al. (2007) consideran aceptable para maderas duras un ángulo libre de 8° a 10°. Su valor suele ser bastante estable, alrededor de 10°, debiendo ser un poco mayor en especies blandas pues al ser más elásticas que las

duras, con la compresión se deforman más y después tiende a recuperar más; pudiendo ser de hasta  $15^\circ$  y en especies duras, de apenas  $8^\circ$  (VIGNOTE y MARTINEZ, 2006). De acuerdo con Dalois (1990) el mejor valor para el ángulo libre está comprendido entre  $7^\circ$  y  $12^\circ$ .

La Cámara Nacional Forestal (1991) aconseja el aserrío de maderas de densidad media con un ángulo libre de  $10^\circ$  y en el caso de maderas de densidad alta  $7^\circ$ . Para Vital (2013) este ángulo no debe tener menos de  $5^\circ$ , cuando es nulo o demasiado pequeño, el lomo del diente próximo a la punta ejercerá presión sobre la madera produciendo una fricción anormal, mayor calentamiento de la lámina de corte y mayor resistencia al aserrar.

### **Ángulo de hierro o de afilado**

Williston (1989) precisa que el ángulo de hierro puede variar de  $40^\circ$  a  $60^\circ$ . Uddeholm (1993) agrega que con maderas duras puede aproximarse a los  $50^\circ$ . Ninin (1986) y JUNAC (1989) aclaran que para maderas muy duras no debe ser inferior a  $55^\circ$ . Schrewe (1983) indica que para maderas duras debe ser por lo menos  $48^\circ$ , pero a menudo se usan ángulos de diente entre  $52^\circ$  y  $60^\circ$ .

La Cámara Nacional Forestal (1991) recomienda aserrar maderas de densidad media con  $50^\circ$  y maderas de densidad alta con  $58^\circ$ . Según Gutiérrez y Gutiérrez (1982b) un ángulo de la punta del diente de  $44^\circ$  da los mejores resultados en el recalcado, con un ángulo libre y de salida de  $16^\circ$  y  $30^\circ$ , respectivamente. Con un excesivo ángulo de hierro la velocidad de avance es restringida y la potencia necesaria para el corte aumenta (GONÇALVES, 2000).

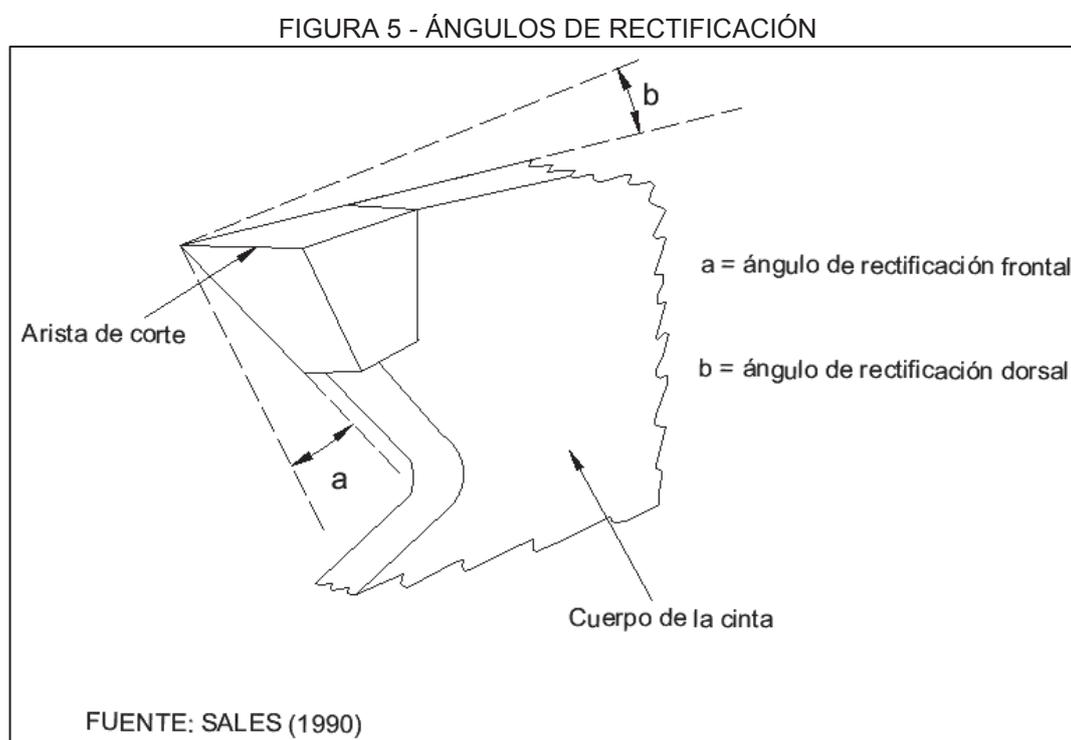
En general debe superar los  $35^\circ$  para asegurar su resistencia y su escaso desgaste. Pero esto sólo se puede aplicar en especies blandas y sin sílice u otra sustancia que pueda ser abrasiva, en el caso de maderas duras debe ser grande, para así ser más resistentes y desgastarse menos. Este ángulo puede llegar a tener hasta  $60^\circ$ , aunque es raro que supere los  $55^\circ$  (VIGNOTE y MARTINEZ, 2006).

### 2.3.3. Ángulos libres laterales o de rectificación

La superficie lateral del diente recalcado no es paralela al plano de la hoja de sierra, pues presenta una inclinación cuyo ángulo es denominado ángulo libre lateral

o de incidencia lateral (VITAL, 2013). Estos ángulos de rectificación se mantienen exactos e invariables tras repetidas afiladas de la sierra y garantizan un rendimiento homogéneo en la sierra (JUNAC, 1989).

Gonçalves (2000) establece el tamaño de la holgura lateral entre cinta y madera según los parámetros de corte, tipo y geometría del diente, por el tipo de guía de la cinta y alineamiento, y por la especie y contenido de humedad. Sales (1990) destaca que los ángulos libres laterales reducen la fricción del cuerpo de la hoja dentro de la ranura de corte, así mismo distingue dos ángulos respecto a un plano perpendicular a la arista de corte (FIGURA 5): uno dorsal (medido del borde de la cara de desahogo) y otro frontal (medido del borde de la cara de corte).



Ninin (1986) y JUNAC (1989) precisan que estos ángulos dependen de la capacidad más o menos elevada de la madera para deformarse elásticamente y entorpecer el paso libre de las puntas de los dientes. Sus valores están comprendidos entre  $3^\circ$  y  $15^\circ$ , correspondiendo a las maderas duras los valores menores. Justifican para las maderas duras los valores bajos para mantener una resistencia suficiente de las esquinas de los dientes.

Según Uddeholm (1993) el ángulo libre lateral ideal para el aserrado de una

mezcla de maderas duras y blandas debe ser de 7° a 10°, lo cual posee la ventaja de que el diente puede reafilarse varias veces. La Cámara Nacional Forestal (1991) aconseja aserrar maderas de densidad alta con ángulos de rectificación frontal y dorsal de 6°.

Schrewe (1983) señala que, en Europa se suele usar dientes recalcados con un ángulo libre de 3° medido en la dirección de avance (frontal) y de 4° medido en la dirección de corte (dorsal), lo que permite un reafilado de hasta 10 veces. Sin embargo, para maderas semi-duras y particularmente aquellas con alto contenido de resina, se usa con gran éxito un diente recalcado con ángulos libres frontal y dorsal de 7° y 11°, respectivamente.

#### 2.3.4. Paso

Gonçalves (2000) recuerda que este parámetro determina el número de dientes que estará actuando en una pieza de madera de una determinada altura. Dalois (1990) advierte que se debe tener al menos tres o cuatro dientes incrustados en la madera para tener una buena continuidad en el esfuerzo.

Ninin y Escobar (1986), Instituto Forestal (1989) y Uddeholm (1993) escogen el paso del diente en función del tipo de madera, velocidad de la cinta, velocidad de avance y altura de corte. Tuset et al. (2007) también consideran para el paso adecuado el perfil del diente, el tipo de traba, el ancho y el espesor de la cinta. Sustentan que el perfil del diente se vincula con el paso por dos detalles: a) por la garganta que debe tener amplitud y forma adecuadas para conseguir una buena salida del aserrín; b) por los ángulos del diente que deben asegurar buen corte y, a la vez, rigidez.

Gonçalves (2000) menciona que, con mayores anchos y espesores, el paso puede ser aumentado manteniendo la rigidez de la sierra y destaca que el paso de una cinta ancha es mayor que de una cinta angosta. Al respecto Koch (1964) explica que, debido al trabajo de las cintas anchas a altas velocidades de corte con grandes alturas de corte, requieren de un paso mayor para contener una gran garganta, a fin de alojar el aserrín producido. Dalois (1990) enfatiza que el paso depende mucho más de la altura promedio de corte que de la naturaleza de la madera.

Según Uddeholm (1993) un paso de 35 a 40 mm para la madera dura y seca

puede ser suficiente. Ninin (1986) propone para las maderas duras un paso de 40 a 50 mm en cintas de 1,47 mm de espesor y 20 cm de ancho. Para Sandvik (1992) el paso mínimo de las hojas recaladas en las máquinas modernas es de 20 mm; Dalois (1990) establece un paso mínimo de 40 mm para los dientes recalados en los perfiles pico de loro o proyección de viruta, con un ángulo de salida de 20° a 36°.

También vale la pena revisar los pasos recomendados por la fábrica Vollmer Werke, de Alemania, para cintas sinfín recaladas y de anchos importantes que se presentan en la TABLA 4 (TUSET et al., 2007).

ANCHO DE CINTA (mm)	ESPESOR DE CINTA (mm)	PASO PARA MADERAS	
		BLANDAS (mm)	DURAS (mm)
100	1,10	40	35
160	1,25	45	40
240	1,80	50	45
310	2,10	60	50
380	2,75	70	50

FUENTE: TUSET et al. (2007)

### 2.3.5. Altura del diente

Tuset et al. (2007) para definir la altura de los dientes en cintas sinfín consideran los siguientes aspectos básicos:

- Para maderas blandas se puede dar mayor altura que para duras
- En cintas recaladas la altura puede ser mayor que en cintas triscadas
- A medida que aumenta el ancho y el espesor, puede aumentarse la altura
- En todos los casos no debe exceder de 12 veces el espesor de la hoja para maderas blandas y 10 veces para maderas duras, aunque según Dalois (1990) varía de 11 a 13 veces.

Ninin (1986) y JUNAC (1989) sostienen que la altura del diente no debe exceder notablemente a un décimo del ancho de la cinta, para que el cuerpo pueda transmitir la potencia y soportar la acción de los dientes.

La resistencia del diente depende de la relación entre la altura y el paso (WILLISTON, 1981; VITAL, 2013). En el caso de maderas duras Vignote y Martínez (2006) sostienen que el espacio debe ser pequeño, pues la filosofía de corte con este tipo de madera, es cortar muy poco a poco, además para que el diente no se rompa su altura debe ser muy pequeña, de la misma forma que el paso.

De acuerdo con el Instituto Forestal (1989), Uddeholm (1993) y Vital (2013) por la práctica la relación más adecuada es una altura equivalente a un tercio del paso para dientes recalcados; que Schrewe (1983) y JUNAC (1989) especifican para maderas duras y semiduras, aunque Tuset et al. (2007) recomiendan 3,5 a 4 veces menor que el paso para maderas duras con cintas de anchos entre 100 y 150 mm. Para pasos mayores de 50 mm Gutiérrez y Gutiérrez (1982a), Williston (1989) y Uddeholm (1993) también aconsejan una altura de un cuarto del paso.

Molina y Del Castillo (2007) generalizan que la altura es igual a la mitad del paso para maderas blandas o un tercio del paso para maderas duras, la cual está limitada al espesor de la hoja que determina la rigidez del diente. Agregan que una dentadura demasiado honda respecto a su espesor vibrará, se desviará y corre el riesgo de grieta.

Ninin (1986) destaca la capacidad de evacuación del aserrín dada por la altura del diente, sin embargo, el diente debe mantener la resistencia suficiente para producir la cantidad de aserrín que la garganta es capaz de evacuar. Al aumentar la altura de los dientes se obtiene mayor área entre ellos y, en consecuencia, más espacio para el almacenamiento de aserrín, lo que permite mayor velocidad de alimentación (VITAL, 2013).

#### 2.3.6. Traba

Sales (1990) denomina traba al exceso de material introducido a ambos lados del cuerpo de la cinta para la holgura lateral y la representa como:  $(\lambda - e) / 2$ , donde  $\lambda$  = longitud del filo o ancho teórico de corte y  $e$  = espesor de la cinta. Schrewe (1983), Ninin (1986) y Williston (1989) destacan su función de permitir el paso libre de la cinta en la madera, evitar que su cuerpo roce contra la madera y se caliente durante el corte. Ninin (1986) advierte que una traba excesiva produce vibraciones, desvíos, rupturas de esquinas de dientes y picaduras.

Dalois (1990) señala que la traba por recalcado es un elemento esencial para el aserrado y su valor depende de: la dureza de la madera, la humedad de la madera, el ancho de la cinta y el espesor de viruta. Estima que la formación de virutas con un espesor superior a 0,5 mm, debe tener una traba un poco más fuerte, debido a que las cintas angostas de sierras principales no pueden retirar virutas gruesas.

Vignote y Martínez (2006) afirman que el sobreancho de corte por recalcado varía con el tipo de madera, en maderas blandas, su elasticidad obliga a prever la recuperación de la madera comprimida y por tanto a aumentar la traba. Agregan que todas las sierras deben ir recaladas salvo para el caso en que el paso sea inferior a 18 mm, en cuyo caso no hay posibilidad física de poder recalcar el diente.

Es fácil comprender que las hojas amplias de la sierra principal pueden necesitar una traba más grande que las hojas de sierra de acabado para pasar libremente en el canal de corte. La amplitud de la traba a cada lado de la hoja se sitúa generalmente entre 0,4 y 1,0 mm, pero se pueden encontrar situaciones extremas. (DALOIS, 1990). Sandvik (1999) orienta el ancho del recalcado para la madera dura con los valores de 0,3 a 0,5 mm en cada lado.

Tuset et al. (2007) recomiendan para el aserrado de maderas duras una proyección del recalcado de 0,30 a 0,40 mm a cada lado de la cinta, mientras que Gutiérrez y Gutiérrez (1982b) y Uddeholm (1993) aceptan una proyección del recalcado de 0,30 a 0,35 mm a cada lado más una cantidad adicional para el rectificado lateral. Antoine (1960) destaca que siempre hay interés por reducir la cantidad de aserrín producido y por lo tanto de emplear la traba más estrecha posible, compatibles con las exigencias de la madera.

Williston (1989) afirma que las maderas duras o congeladas requieren de menos recalcado o triscado que las maderas blandas y coincide con Schrewe (1983) y Ninin (1986) en que el recalcado del diente le deja un ancho cercano al doble del espesor de la sierra. Gutiérrez y Gutiérrez (1982b), JUNAC (1989) y Uddeholm (1993) aconsejan aserrar maderas duras con un recalcado pobre o de punta que afecta sólo un cuarto de la altura del diente.

Otarola (1991) diferencia para las sierras de cinta de 1,47 mm de espesor, empleadas en los aserraderos de la región Ucayali-Perú, los tipos de recalcado que se indican a continuación.

- pequeño (de 2,8 mm de ancho y 3,0 mm de altura): para aserrar maderas duras;
- mediano (de 3,0 mm de ancho y 4,0 mm de altura): para aserrar maderas semiduras;
- grande (de 4,0 - 4,5 mm de ancho y 5,0 mm de altura): para aserrar maderas suaves y silicosas.

### 2.3.7. Área o seno de la garganta

Williston (1981), Uddeholm (1993) y Vital (2013) determinan la garganta por la forma, el paso y la altura del diente. Williston (1989) advierte que cuando el diente es demasiado alto para el paso, los dientes provocarán vibraciones, amplias ranuras de corte y desviaciones en el corte.

Williston (1989) y Sales (1990) proponen un método gráfico para estimar el área o seno de la garganta (**S**) copiando el diente en papel milimetrado y contando las cuadrículas respectivas o utilizando la expresión de simple aproximación para el perfil pico de loro: **S = Paso x Altura del diente/1,75**.

Sandvik (1992) y Uddeholm (1993) indican que el área de la garganta y el radio de la base deben ser tan grandes como el diseño del diente permita, a fin de distribuir la concentración de esfuerzos y reducir el riesgo de grietas en la garganta. Dalois (1990) acota que una garganta suficientemente amplia puede evacuar todas las virutas removidas por el diente y considera en general que su seno (**S**) está dado por la expresión a.

$$S = \frac{\text{Volumen de viruta}}{\text{Espesor de viruta}} \times F \quad (a)$$

Donde F = coeficiente de expansión elegible entre 1,8 y 2,5 para las virutas finas, pero puede ser mucho menor si las virutas son muy gruesas.

El volumen del aserrín producido es de tres a seis veces mayor que el de la madera sólida. Cuando la madera es dura y seca la proporción entre volumen de aserrín y madera puede ser del orden de 3:1. Considerando la compresibilidad del aserrín hasta cerca del 50% de su volumen libre sin ningún problema, se puede asumir que la garganta requiere una capacidad de acarreo de 1,5 a 3 veces el volumen teórico de la viruta. (WILLISTON, 1981; UDDEHOLM, 1993).

Para Gonçalves (2000) la capacidad de la garganta de un diente depende de la relación de varios factores que dificultan los cálculos, como densidad y humedad de la madera cortada, y de la fracción del volumen de la garganta que efectivamente es utilizada para alojar el aserrín. Sales (1990) recuerda que cuando el volumen de la garganta del diente sea insuficiente, seguirá una compresión de aserrín que resulta en un aumento de la fuerza de corte, y una evacuación de una parte del excedente entre la hoja y la madera que puede ser el origen de la desviación de la ranura de corte.

Ninin (1969) estima un valor cercano a tres como coeficiente de utilización de este alojamiento, debido a que el volumen del aserrín es mayor al teórico de la viruta y que todo el volumen del alojamiento no se utiliza, ni se puede utilizar para los fines de transporte. Koch (1964) indica que aproximadamente 3/5 del volumen total de la garganta es ocupado por el aserrín. Cuando la garganta se llena ( $V_{\text{garganta}} < V_{\text{aserrín}}$ ) el diente no corta, produciéndose sólo un frotamiento de la sierra con la madera (VIGNOTE y MARTINEZ, 2006).

## 2.4. CONDICIONES DE MECANIZADO

### 2.4.1. Velocidad de corte o velocidad lineal de la cinta

Corresponde a la distancia recorrida en un segundo por la arista de corte de un diente. Puede calcularse mediante la expresión b (TUSET et al., 2007).

$$V_c = \frac{\pi \times D_v \times n}{60} \quad (b)$$

Donde:  $V_c$  = velocidad de corte ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$D_v$  = diámetro de volantes (m)

$n$  = rotación del volante motriz (rpm)

Gonçalves (2000) menciona que las velocidades de corte usuales en sierras de desdoblado son: para maderas blandas de hasta  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; para maderas duras, entre  $40$  y  $46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  y para maderas extremadamente duras de  $30$  a  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . De acuerdo con Tuset et al. (2007) normalmente para sierras de aserraderos se recomiendan velocidades entre  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (para volantes de  $1,00$  a  $1,20$  m de diámetro) y  $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (para volantes de  $1,80$  a  $2,00$  m).

Ninin (1986) categoriza las velocidades de la cinta en máquinas de 1,80 m de diámetro como se muestra a continuación.

- Alta: 41,7 m.s<sup>-1</sup> para trozas de maderas blandas de hasta más de 1,00 m de diámetro.
- Media: 33,3 m.s<sup>-1</sup> para maderas duras de densidad cercana a 0,8 g.cm<sup>-3</sup> y diámetros de troza comprendidos entre 40 y 60 cm.
- Baja: 25,0 m.s<sup>-1</sup> para maderas muy duras de densidad cercana o mayor a 1 g.cm<sup>-3</sup> y diámetros de troza comprendidos entre 40 y 60 cm.

Sales (1990) recomienda a continuación las velocidades de corte de despiezado de acuerdo al tipo de madera y altura de corte.

- Madera dura y muy abrasiva con gran altura de corte: 25 m.s<sup>-1</sup>
- Madera dura y muy abrasiva con pequeña altura de corte, o moderadamente abrasiva con gran altura de corte: de 25 a 35 m.s<sup>-1</sup>
- Madera de moderada abrasividad con pequeña altura de corte, o poco abrasiva con gran altura de corte: 35 a 45 m.s<sup>-1</sup>
- Madera poco abrasiva con pequeña altura y madera muy poco abrasiva (particularmente coníferas): 45 m.s<sup>-1</sup>.

French (1977) selecciona la velocidad de una sierra con el espaciamiento de los dientes, la capacidad de la garganta para expulsar el aserrín, la potencia disponible y la densidad de la madera. Dalois (1990) incluye como factores principales para su elección la potencia del motor y la velocidad de desafilado, así mismo, sugiere las siguientes velocidades de corte:

- de 25 a 30 m.s<sup>-1</sup> para maderas muy duras o muy abrasivas
- de 30 a 35 m.s<sup>-1</sup> para maderas duras y abrasivas
- de 35 a 40 m.s<sup>-1</sup> para maderas semi-duras
- de 40 a 45 m.s<sup>-1</sup> para maderas blandas

Chardin (1957) opina que un aumento de la velocidad de corte se traduce generalmente en un aumento de la dispersión de las virutas, sobre todo para los espesores medios. A espesores gruesos la dispersión es poco marcada incluso a grandes velocidades para algunas especies, ello es muy marcado para especies particularmente muy fibrosas.

La Cámara Nacional Forestal (1991) recomienda una velocidad de cinta de 25,0 a 33,3 m.s<sup>-1</sup> para las maderas de densidad media, y de 16,7 a 30,0 m.s<sup>-1</sup> para

las maderas de densidad alta. Meléndez (1999) determina una velocidad promedio de corte de  $24,9 \text{ m.s}^{-1}$  en el aserrío de la capirona con sierra cinta en la zona de Pucallpa-Perú.

Gutiérrez y Gutiérrez (1982a) precisan que la velocidad de corte en el caso de sierras cintas, depende en general de lo que se quiere cortar, especialmente referido a las dimensiones de las piezas. Máquinas para aserrado de trozas se caracterizan por una alta velocidad comprendida entre  $41,7$  y  $58,3 \text{ m.s}^{-1}$  con una velocidad de avance de  $67$  a  $137 \text{ m.min}^{-1}$ .

Uddeholm (1993) indica que las hojas de sierra cinta anchas no deberían cortar a más velocidad que  $50 \text{ m.s}^{-1}$ . Pocos fabricantes proveen máquinas que trabajen a una velocidad de corte de hasta  $75 \text{ m.s}^{-1}$  y con posibilidades de variar también la velocidad de corte (SANDVIK, 1999).

Melo et al. (2015) determina la fuerza de corte específica para *Corymbia citriodora*, empleando un inversor de frecuencia para el registro y almacenamiento de los parámetros eléctricos de mecanizado del material con una velocidad de corte y de avance controlada. Cuando disminuye la velocidad del eje al reducir el valor de la frecuencia, el inversor de frecuencia manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina. Estos dispositivos mantienen constante la razón Tensión eléctrica/Frecuencia (V/Hz) entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor, además de su operación a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz), porque disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida (CARMAN, PONOMARYOVA y BELTRÁN, 2013).

#### 2.4.2. Velocidad de avance o velocidad de alimentación

Es la distancia recorrida en un minuto por la madera, mientras es aserrada. En las sierras automáticas modernas se aplican velocidades de avance entre  $60$  y  $100 \text{ m.min}^{-1}$ , aunque se han desarrollado modelos que alcanzan a  $120 \text{ m.min}^{-1}$ . En las sierras con carros automáticos de modelos antiguos, bajan a  $15-30 \text{ m.min}^{-1}$  (TUSET et al., 2007).

Dalois (1990) señala que esta velocidad varía de 10 a 30 m.min<sup>-1</sup> para el avance automático de las pequeñas máquinas de aserrado o para el despiezado de maderas duras con diámetros grandes; en las máquinas muy potentes y modernas puede alcanzar a 100 m.min<sup>-1</sup>. Para Gonçalves (2000) en operaciones de desdoblado, las velocidades de avance están entre 15 y 100 m.min<sup>-1</sup>, dependiendo del modelo de la máquina.

French (1977) manifiesta que, en las sierras de cinta la velocidad de avance se reduce cuando es evidente que la velocidad de corte es reducida. Para Ninijn (1986) la transmisión del carro por cable o pistón debe permitir la obtención de velocidades de avance infinitamente variables desde 0 m.min<sup>-1</sup> hasta unos 70 m.min<sup>-1</sup>. Destaca que en aserraderos de cinta con sierras pequeñas de 1.250 ó 1.400 mm de diámetro de volante y potencias instaladas demasiado bajas asierran maderas densas, con una velocidad de avance de 2 ó 3 m.min<sup>-1</sup>.

Gutiérrez y Gutiérrez (1982a) identifican como factores limitantes de la velocidad de avance a los siguientes: espesor de la madera, tipo de especie, tolerancias exigidas y acabado de la superficie de corte. También refieren que, a mayores espesores y especies de mayor densidad, deben utilizarse velocidades de avance menores. French (1977) sugiere diseñar la velocidad de avance en tal forma que esté balanceada con la potencia de la sierra principal, la densidad de la madera y las alturas de corte que se realizan.

Meléndez (1999) calcula una velocidad promedio de avance de 10,6 m.min<sup>-1</sup> y propone su ajuste en el aserrío de la capirona, de acuerdo a las alturas de corte agrupadas en las categorías que siguen a continuación.

- alturas menores de 30 cm : 20 m.min<sup>-1</sup>
- alturas de 30 a 50 cm : 11 m.min<sup>-1</sup>
- alturas mayores de 50 cm : 4 m.min<sup>-1</sup>

SANDVIK (1999) encuentra en los países escandinavos velocidades de avance de 60 a 80 m/min y en Norteamérica, velocidades de hasta 120 m.min<sup>-1</sup>. Ninin (1986) aconseja elegir las velocidades de avance dentro del rango de 5 a 65 m.min<sup>-1</sup>, aplicando los grupos energéticos de aserrío para una altura de corte cercana a 30 cm, una vez identificado el grupo energético correspondiente a la madera según su dureza.

### 2.4.3. Espesor de viruta o mordida

Corresponde a la distancia recorrida por la madera durante el tiempo que toma un diente para hacer un desplazamiento igual al paso (SALES, 1990). Para Williston (1981) el espesor de viruta es la distancia que avanza la sierra en la madera entre dos dientes sucesivos. Antoine (1960) define esta variable como la cantidad lineal de madera tomada por diente en el sentido del avance de la pieza de madera. Denomina espesor de viruta óptimo a aquel con el cual se remueve la madera con el menor trabajo específico. Agrega que el espesor de viruta es la variable más interesante porque está directamente ligada a la rentabilidad de los aserraderos.

Sales (1990) precisa que el espesor de viruta obtenido por aserrado con la cinta es una función de dos parámetros: el primero depende esencialmente del paso del diente ( $p$ ) y de la velocidad de corte ( $V$ ); el segundo está fijado por la velocidad de avance ( $A$ ). Como el espesor real de viruta ( $\delta$ ) es igual a:  $\delta = \delta' \cos \varphi$  siendo  $\delta' = A \times p/V$  y  $\varphi =$  ángulo de inclinación de la línea de corte que depende de  $V$  y  $A$ . Cuando verifica que el ángulo  $\varphi$  estimado como  $\text{Arc tg } \varphi = A/V$  es muy pequeño (0,3 a 1,2 °) admite que el espesor real de la viruta es prácticamente igual al espesor calculado, por lo que utiliza sistemáticamente el término espesor de viruta sin distinción entre la mordida de la herramienta ( $\delta'$ ) y el espesor real de la viruta ( $\delta$ ).

Chardin (1958) desarrolla el concepto de “espesor de viruta óptimo” relacionado con las acciones laterales inherentes al hecho de que la viruta no puede expandirse en una ranura como en un corte abierto, las cuales, al crecer, afectarían a toda la masa de la viruta con incremento notable de esfuerzos. Sales (1990) introduce este término dentro de la denominada zona de buen corte, recordando que no se puede determinar con precisión sin tener en cuenta el tamaño de las trozas y la resistencia mecánica de la hoja.

Ninin (1986) aplica el espesor de viruta óptimo a aquel que permite el mínimo consumo de energía por unidad de superficie aserrada y que, para una altura de corte dada, satura la capacidad de evacuación de las gargantas con el aserrín resultante. Considera que este óptimo es un valor teórico exacto que varía inversamente con la altura de corte y depende de la capacidad de las gargantas,

pero en la práctica se trabaja con espesores de viruta cercanos al óptimo debido a la variabilidad de la madera entre otros.

El autor en mención cuando clasifica las maderas por grupos energéticos de acuerdo a su dureza, propone espesores de viruta óptimos de 0,25 a 1,40 mm correspondientes a una altura de corte de referencia de 30 cm. Para Gauthier (1986) el espesor de viruta (**EV**) debe obedecer a la regla que sigue:

Madera blanda	EV = 100% espesor de la cinta
Madera semidura	EV = 85% espesor de la cinta
Madera dura	EV = 70% espesor de la cinta

Tuset et al (2007) citando al Instituto Forestal de Chile recomienda cuando la madera tiene una altura de corte igual al ancho de la cinta, que el espesor de viruta como mínimo debe ser:  $\frac{3}{4}$  del espesor de la cinta en maderas blandas y  $\frac{1}{2}$  del espesor de la cinta en maderas duras. De otro lado Vignote y Martínez (2006) especifican la mordida máxima en función del espesor de la sierra (**e**) como sigue a continuación.

Maderas blandas	e
Maderas semiduras	$\frac{3e}{4}$
Maderas duras	$\frac{e}{2}$

Según Molina y Del Castillo (2007) la astilla debe tener entre 0,3 mm (mínimo) y 1,2 mm (máximo). Desde el punto de vista práctico, Gutiérrez y Gutiérrez (1982a) sugieren de acuerdo al tipo de madera y condiciones de humedad, los siguientes espesores:

Madera blanda verde	1,0 – 1,2 mm
Madera blanda seca	0,6 – 0,8 mm
Madera dura	0,2 – 0,4 mm

Chardin (1957) señala de una manera general, que las virutas delgadas (0,2 a 0,3 mm), tienden a fluir entre la hoja y la madera, conforme se incrementa la velocidad. A espesores medios (0,45 a 0,70 mm), la tendencia de las virutas es de alojarse en la garganta, sobre todo a bajas velocidades; este comportamiento varía entre especies. Para espesores gruesos (1,0 a 1,4 mm), el alojamiento de las virutas es elevado, incluso a grandes velocidades sobre todo cuando el ángulo de ataque es alto.

Gauthier (1986) explica que la viruta de aserrín de 0,4 mm generada en las sierras de cinta de la región Ucayali no puede quedarse alojada en la garganta del diente debido a la presión del sobre-carguío que la empuja en el espacio de 0,9 mm que existe entre la cinta y la madera y que equivale a la mitad de la diferencia entre el ancho de la punta del diente y el espesor de la cinta. Meléndez (1999) estima un espesor promedio de viruta de 0,28 mm para una altura promedio de corte de 43,4 cm en el aserrío de la capirona con sierra cinta en la zona de Pucallpa.

#### 2.4.4. Ancho de corte

El Instituto Forestal (1989) diferencia un ancho teórico de corte o longitud del filo dado por el espesor de la cinta más el ancho del recalcado, de un ancho práctico cuyo volumen se transforma en aserrín y considera los siguientes parámetros: espesor de la cinta (calibre), ancho del recalcado y desviación del corte. Indica que el ancho del canal de corte comúnmente varía entre 2,0 y 6,0 mm y depende de factores como: velocidad de avance, dureza de la madera y acondicionamiento de la hoja de sierra.

Gonçalves (2000) precisa que típicamente el ancho de corte para maderas blandas aumenta de 40 a 50% del espesor de la cinta, mientras que para maderas duras aumenta en aproximadamente 25%. De acuerdo con French (1977) para que el corte sea fácil el ancho de corte debería ser aproximadamente 2,2 veces el espesor de la hoja; para maderas densas que se cortan limpiamente, el ancho de corte puede ser de 1,8 a 1,9 veces el espesor de la hoja.

Según Williston (1989) en Europa, donde los calibres de sierra y anchos de corte son más delgados que en Norte América, los fabricantes de sierras recomiendan que el ancho de corte para maderas duras debe exceder el espesor de la cinta de 0,60 a 0,80 mm.

En las sierras de cinta de la región de Ucayali, Gauthier (1986) encuentra un ancho promedio del diente de 3,302 mm (0,130 pulg) para una cinta de calibre 17 (0,058 pulg). Meléndez (1999) determina para la misma región y mismo calibre de cinta un ancho promedio del diente de 2,75 mm en el aserrío de la capirona, estableciendo una equivalencia de 1,8 a 1,9 veces el espesor de la cinta.

#### 2.4.5. Altura de corte

PNUD/FAO (1980) define la altura de corte como la distancia recorrida entre la entrada y salida del diente en la madera. Ninin (1986) admite esta altura igual a la longitud de la viruta formada de acuerdo con la trayectoria de cada diente en la madera. Este factor se refiere a la altura de la cinta que ocupa en la madera durante el proceso de corte, la cual está relacionada directamente con el espacio libre para la refrigeración y evacuación del aserrín durante la rotación (MOLINA y DEL CASTILLO, 2007).

Para French (1977) la altura de corte que una sierra puede realizar depende de la capacidad de la garganta y del tamaño de mordida. Enfatiza que, si la potencia del motor es adecuada, dependerá de la capacidad de las gargantas para extraer el aserrín producido. Según Chardin (1957) la variación de la altura de corte permite sobre todo observar la ocupación progresiva de la garganta del diente por las virutas. Si uno tomara fotografías sucesivas aumentando la altura de corte, se vería la evolución del aserrín como una filmación que se va proyectando poco a poco.

La altura de corte es la variable más ingrata porque ella es muy exigente desde el punto de vista energético y además ella impone a menudo una reducción del espesor de viruta. Así mismo está ligada directamente a la noción de espesor de viruta óptimo dado que el criterio de determinación de este espesor es el volumen útil de la garganta. En el aserrado para grandes alturas de corte, el primer diente no toma sino lo que el último permite (ANTOINE, 1960).

Según Gonçalves (2000) una mayor altura de corte resultará en la elevación de la temperatura del diente y su desgaste. Sales (1990) admite que la altura de la ranura es un parámetro esencial que condiciona directamente las dificultades de aserrado, en cuanto al volumen de aserrín que tendrá que caber en la garganta del diente. No tendrá una influencia directa en la fuerza de corte, siempre que el volumen de la garganta del diente sea suficiente.

Torres (1973) considera alturas de corte comprendidas entre 16 y 31,5 cm, mientras que Williston (1981) lo hace en un rango de 22,8 a 91,4 cm. JUNAC (1989) para la aplicación de espesores de viruta óptimos y velocidades de avance en los países del Grupo Andino, toma como referencia una altura de corte de 30 cm, que puede alcanzar valores cercanos o superiores a 60 cm.

## 2.5. DINAMICA DE CORTE

### 2.5.1. Esfuerzo de corte

Woodson (1979) señala que los aspectos básicos del mecanizado como la formación de virutas, la calidad de la superficie y la duración de la herramienta se pueden entender mejor con el conocimiento de las fuerzas necesarias durante el corte ortogonal. Dalois (1990) denomina fuerza de corte al esfuerzo principal que confiere a cada diente el motor que impulsa la hoja, para cortar la viruta.

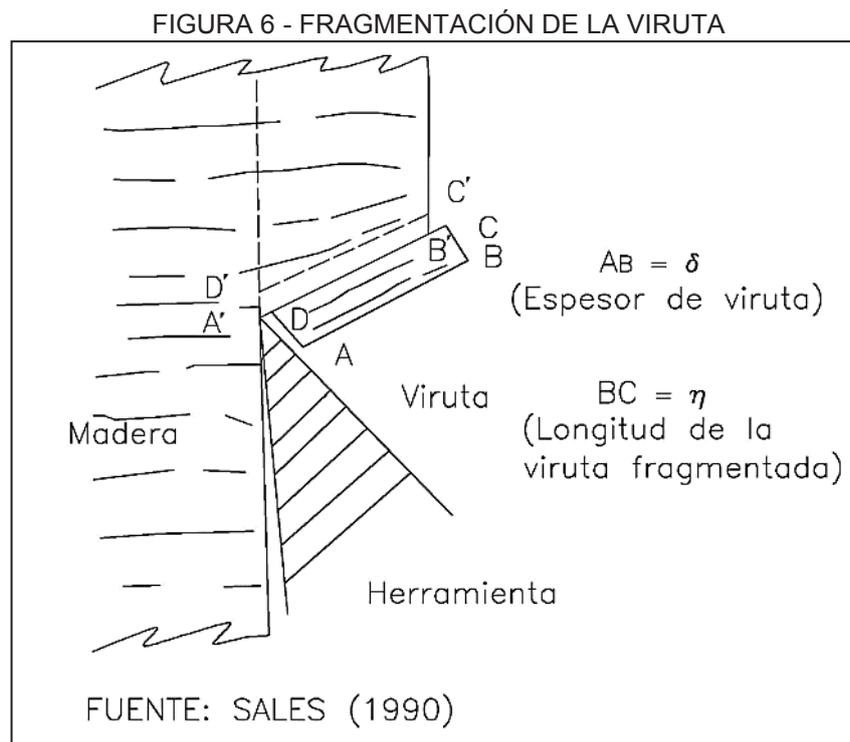
Para García et al. (2002) el esfuerzo de corte (**F**) se puede descomponer en dos fuerzas ortogonales entre sí, una perpendicular a la trayectoria de la herramienta (**F<sub>n</sub>**), y otra tangencial o axial (**F<sub>t</sub>**). Mientras que la fuerza **F<sub>n</sub>** influye sobre el par que debe ejercer el motor, la fuerza **F<sub>t</sub>** es la que caracteriza el avance de la pieza. Según el valor del ángulo de ataque la fuerza puede ser positiva o negativa. Generalmente **F<sub>n</sub>** es mucho menor que **F<sub>t</sub>**, lo cual significa que el esfuerzo de corte puede ser considerado para la mayoría de los casos el valor correspondiente al esfuerzo tangencial **F<sub>t</sub>**.

El esfuerzo que la herramienta debe ejercer para remover una viruta depende de (SALES, 1990):

- la resistencia opuesta por las fibras a las acciones de aplastamiento, flexión, ruptura.
- la resistencia en el plano de corte proporcional a la superficie del plano de ruptura igual a  $\lambda \times \delta \times \text{sen } \varphi$  ( $\lambda$  = ranura,  $\delta$  = espesor) donde  $\varphi$  = ángulo del plano de corte con la trayectoria de la herramienta.
- la resistencia en un plano ortogonal al anterior, proporcional a la superficie  $\delta \times \eta$  donde  $\eta$  representa la longitud de la viruta fragmentada y es función de la geometría del diente, la naturaleza de la madera y el espesor de viruta ( $\delta$ ), así como depende de las acciones recíprocas de la herramienta en la madera (FIGURA 6).
- las fricciones causadas por el contacto madera-herramienta.

Vignote y Martínez (2006) destacan que el esfuerzo de corte es muy complejo, pues depende de muchas variables, tanto del propio diente como de la

madera. En la sierra de cinta el análisis de fuerzas se complica aún más por los siguientes factores: alta velocidad de corte con fuerzas simultáneas de aceleración, almacenamiento de aserrín en el espacio de la garganta, virutas individuales que se deben separar del límite del canal de corte y en el borde del corte, tendencia de la viruta a expandirse conforme es formada y afilado variable del diente con su efecto compartido en la fase de incisión del corte (KOCH, 1964).



La penetración del diente en la madera se realiza por la acción combinada del esfuerzo para vencer la resistencia que opone la madera a ser cortada y el esfuerzo requerido para vencer los rozamientos de la madera sobre la herramienta de corte. La suma de ambos es la fuerza total ejercida por la madera contra la herramienta de corte (GARCÍA et al., 2002).

Sales (1990) descompone el esfuerzo de corte total ( $F_c$ ) de la siguiente manera:  $F_c = F_\phi + F_\psi + \lambda F_p$ , donde

$F_\phi$  = esfuerzo de penetración de la herramienta y fragmentación de la viruta

$F_\psi$  = esfuerzo debido a las presiones laterales

$F_p$  = esfuerzo unitario para un ancho de corte de 1 mm

$\lambda$  = longitud del filo

El autor en mención establece que  $F_{\phi}$  y  $F_{\psi}$  son una función del espesor de viruta y que además  $F_{\phi}$  es proporcional a la longitud del filo. Antoine (1960) expresa el esfuerzo de corte (**F**) como:  $F = a + b + c$ , donde

a = corte de las fibras

b = doble cizallamiento lateral

c = reducción de la viruta en la garganta + evacuación del aserrín

En la práctica, el trabajo necesario para la remoción de una viruta se mide con mayor frecuencia y la fuerza de corte se iguala con la fuerza paralela a la trayectoria de la herramienta y de intensidad constante ( $F_c$ ) que habría efectuado el mismo trabajo y se denomina fuerza de corte. Sin embargo, este parámetro solo refleja muy imperfectamente el trabajo real del diente, cuya acción es mucho más compleja. En las sierras de cinta, la distribución de las fuerzas de corte en un diente permanece casi constante desde la entrada del diente en la madera hasta su salida (SALES, 1990).

#### 2.5.2. Factores de influencia sobre el esfuerzo de corte

De acuerdo con Antoine (1960), el aserrado racional de la mayoría de maderas tropicales debe resultar del estudio de las variaciones de los factores que intervienen en la formación de la viruta; sean el paso, la velocidad de avance y la velocidad de corte por el espesor; la traba por el ancho y la altura de corte por la longitud. Torres (1973) agrega que es evidente la existencia de otros factores que actúan sobre el aserrado, además de las propiedades mecánicas de dureza, cizallamiento y tenacidad.

Koch (1964), Ninin (1983), JUNAC (1989), Gonçalves (2000) y García et al. (2002) diferencian en tres grupos los factores que inciden en el esfuerzo de corte, siendo ellos: relativos a las características de la madera, a las condiciones de trabajo y a la herramienta de corte.

Sales (1990) y García et al. (2002) consideran parámetros dependientes de las condiciones de trabajo a los siguientes: velocidad de corte, velocidad de avance, espesor de viruta, ancho de corte y altura de corte, aunque algunos especialistas no toman en cuenta al ancho o a la altura de corte (PNUD/FAO, 1980; NININ, 1983; JUNAC, 1989).

## Densidad

La densidad y la dureza a menudo se confunden y constituyen un factor único en el aserrado, pues están estrechamente relacionadas. El esfuerzo de corte para una madera muy pesada alcanza a cinco veces el esfuerzo correspondiente al aserrado de una madera liviana (SALES, 1990).

García et al. (2002) sostienen que la dureza está directamente relacionada con la densidad, de manera que las maderas más densas opondrán mayor resistencia a ser cortadas por su mayor dureza, que según Dalois (1990) en las especies de madera tropical varía aproximadamente de 1 a 6.

Sales (1990) afirma que, dentro de la misma especie, el esfuerzo de corte aumenta proporcionalmente a la densidad según la expresión c, pero recordando que se puede cometer un error de  $\pm 30\%$ .

$$F_C = K_F D_{12} \quad (c)$$

Donde:  $F_C$  = esfuerzo de corte en N para un ancho de arista y un espesor de viruta de 1 mm

$D_{12}$  = densidad de la madera al 12%

$K_F$  = factor de proporcionalidad estimado en  $75 \text{ N.m}^3.\text{kg}^{-1}$

Gonçalves (2000) justifica la influencia directa que la densidad ejerce sobre el esfuerzo de corte, por su relación con la resistencia mecánica de la madera y la dificultad de penetración del diente. Explica que algunas especies no siguen la relación simple basada en la densidad debido a las diferencias entre especies en las propiedades físicas, causadas por la presencia de sílice u otros depósitos minerales en las células, contenido de resina, estructura microscópica y tamaño de las fibras.

Woodson (1979) comprueba durante el corte ortogonal 90-90 de 22 especies de maderas duras del sur de USA que la fuerza paralela promedio aumenta al aumentar el espesor de viruta y el peso específico; en cambio las fuerzas normales promedio cambiaron de positivo a negativo para el peso específico por debajo o por encima de 0,50, respectivamente.

## Contenido de humedad

Dalois (1990) generaliza que el esfuerzo de corte aumenta cuando la humedad de la madera disminuye fuertemente; desafortunadamente la influencia de este factor es aún menos sensible cuando la madera es más densa, de manera

que la fuerza de corte en la madera extremadamente dura varía poco con la humedad. Woodson (1979) precisa que en el corte ortogonal 90-90 las fuerzas normales promedio disminuyen con el aumento del contenido de humedad.

Sales (1990) fija un rango entre 10% de humedad y el estado verde para la influencia de este factor. Agrega que, en madera liviana, el esfuerzo de corte entre madera seca al aire y madera saturada llega a duplicarse; mientras que en la madera densa. o muy densa (más de  $1.000 \text{ kg.m}^{-3}$ ) el esfuerzo alcanza una reducción del 10 al 20% entre un estado y otro. De allí su interés en aserrar inmediatamente después de la tala, o recurrir al almacenamiento de trozas en estanques de agua o a la técnica del riego permanente de trozas en el patio.

Koch (1964) opina que la fuerza de corte paralela en corte ortogonal a baja velocidad permanece aproximadamente constante en la madera seca hasta cerca de 8% de humedad y luego disminuye a tal vez  $\frac{1}{4}$  ó  $\frac{1}{2}$  de este valor cuando la madera se acerca a la saturación. Recuerda que cuando se consideran los efectos del contenido de humedad se incluyen las fuerzas de inercia, las propiedades mecánicas y las características de fricción, de modo que, los investigadores que utilizaron bajas velocidades de corte no observaron las mismas reacciones que aquellos que emplearon técnicas de alta velocidad.

También resume que la madera seca es más resistente que la madera húmeda. Una vez que se excede el punto de saturación de las fibras, ningún cambio apreciable puede observarse en las propiedades mecánicas de la madera a temperaturas normales. Entre la condición seca y el punto aproximado de saturación de las fibras, los valores de resistencia incrementan conforme disminuye el contenido de humedad.

García et al. (2002) señalan que por encima del punto de saturación de la pared celular la influencia de la humedad sobre el esfuerzo de corte tangencial se mantiene constante, alcanzándose los valores más desfavorables de dicho esfuerzo entre 5 y 8% de humedad.

### **Temperatura**

Según Sales (1990) la temperatura de la madera entre 20 y 40° C no influye en la fuerza de corte. Solo en el caso de la madera congelada se observa una influencia significativa en el esfuerzo cuyo aumento resulta en un desgaste más rápido de los dientes. Gonçalves (2000) afirma que la variación en la temperatura

de la madera prácticamente no ejerce influencia sobre el esfuerzo de corte y que la verificación experimental aislada de este factor está limitada por las interacciones existentes con otros parámetros.

Koch (1964) refiere que cuando la madera es solicitada a temperaturas en torno de 67° C, ella pierde de 10 a 50% de su resistencia. Resume que las propiedades mecánicas de la madera bajan cuando es calentada. Este efecto es más significativo en madera verde que en madera seca. Cuando las temperaturas son reducidas por debajo del punto de congelación la tendencia persiste, la pieza de madera fría es más resistente que una pieza a una temperatura más alta. Señala que es probable que existan fuertes interacciones entre temperatura de la pieza, contenido de humedad, ángulo de salida y espesor de viruta.

### **Velocidad de corte**

Sales (1990) establece que la influencia de este parámetro es despreciable para espesores de viruta de 0,5 a 1,5 mm, bajo las condiciones habituales de trabajo de las sierras de cinta con velocidades de 5 a 50 m.s<sup>-1</sup>; pero si influye notablemente en el desgaste y en la temperatura de trabajo de los dientes. Dalois (1990) precisa para un espesor de viruta determinado que el valor de la fuerza varía poco en el rango de velocidad aludido.

Koch (1964) explica que no está esclarecida la importancia relativa de la velocidad de corte como un factor aislado que afecta las fuerzas de corte. Puede encontrarse un aumento de la fuerza en la herramienta del orden de 5% con pequeños espesores de viruta y bajas densidades hasta 20% con grandes espesores y altas densidades, en un rango de velocidad de corte de hasta 9.144 m.min<sup>-1</sup>. Una parte significativa de este incremento se debe a la fuerza necesaria para acelerar las virutas. Si se considera el incremento de densidad debido a un aumento del contenido de humedad las fuerzas de aceleración se vuelven aún más importantes.

Gutiérrez y Gutiérrez (1982a) afirman que, aunque la velocidad de corte no tiene incidencia en el esfuerzo de corte, produce un calentamiento del diente que puede ser excesivo, alterando las características mecánicas del material y acelerando su desafilado. Según Gonçalves (2000) este factor actúa de manera indirecta, conforme está relacionada con fenómenos que afectan la fuerza de corte (temperatura y desgaste de la herramienta).

Los factores que parecen alterar la resistencia de la madera al corte cuando aumenta la velocidad de corte, pueden presentarse de la siguiente manera (KOCH, 1964):

- Fuerza de aceleración en las virutas.
- Cambio en la resistencia de la madera conforme se modifica la velocidad de aplicación de la carga.
- Cambio en la resistencia de la madera por variaciones locales de la temperatura en la pieza de madera.
- Alteración en las condiciones de fricción entre la cara de la herramienta y la viruta al variar la velocidad de corte.

Es posible que estos factores actúen conjuntamente, pero cada cual, en su sentido, de modo que el resultado es un cambio mínimo en la resistencia al corte por causa de un cambio en la velocidad (KOCH, 1964; NININ, 1986).

Antoine (1960) precisa que toda variación de la velocidad de corte se traduce primero por una variación proporcional de la potencia absorbida en el corte de las fibras, descartando su influencia en los otros componentes del aserrado. Así mismo constata que para cada espesor de viruta, existe una velocidad de corte límite encima de la cual la potencia aumenta según una ley totalmente diferente.

### **Velocidad de avance**

Según Gonçalves (2000) con bajas velocidades de avance, la fuerza de corte tiende a ser mayor que lo esperado, probablemente debido a la fricción de la arista de corte con la madera, pues los dientes pasan más veces en la zona de corte para retirar la misma cantidad de material, comparado con velocidades de avance mayores. Con altas velocidades de avance el aumento de la fuerza de corte está relacionado con el llenado de la garganta de los dientes y rozamiento del aserrín con la cinta y la madera.

Toda variación de la velocidad de avance se traduce en una variación proporcional de la potencia absorbida por el doble cizallamiento lateral, por la reducción y por la evacuación de la viruta, sin modificar la potencia requerida para el corte de las fibras (ANTOINE, 1960).

### **Espesor de viruta**

Sales (1990) considera que el esfuerzo de corte varía linealmente con el espesor de viruta para espesores entre 0,2 y 2,4 mm, límites que corresponden

bastante bien a los rangos de velocidad de avance utilizados para el aserrado de madera tropical. Atribuye el rápido aumento de la fuerza a partir de un cierto espesor al llenado de la garganta del diente, además de los cambios en el modo de corte. Este esfuerzo da como resultado un aumento en la fricción lateral inducida por la compresión del aserrín en la garganta del diente.

Vignote y Martínez (2006) identifican un mínimo de esfuerzo de corte en espesores comprendidos entre 0,15 y 0,60 mm, espesores menores o mayores necesitan mayores esfuerzos. García et al. (2002) indican que los óptimos no deben fijarse en los extremos del intervalo de 0,02 a 0,50 mm, ya que por debajo de 0,05 mm el desgaste de la herramienta comienza a ser elevado; por encima de 0,4 mm para maderas duras y 0,7 mm para maderas blandas presentan el mismo inconveniente. Agregan que la relación lineal entre esfuerzo de corte y espesor de viruta  $e$  en la dirección 90-90 responde a la expresión:  $F = 100 + 300 e$  siendo  $F$  el esfuerzo de corte por cada cm de ancho de corte.

Lubkin y otros han observado que dada una situación de corte se pueden desarrollar dos tipos de curvas relacionando la fuerza paralela con el espesor de viruta. En el rango de espesores de viruta pequeños la fuerza paralela varía de acuerdo con la curva exponencial  $F_p = \lambda \cdot K \cdot (\delta)^m$ , donde (KOCH, 1964):

$F_p$  = fuerza paralela de corte

$K$  = constante

$\lambda$  = ancho de corte

$\delta$  = espesor de viruta

$m$  = constante entre 1 y 0 (generalmente observada entre 0,25 y 0,67)

Para espesores de viruta mayores es posible ajustar un trecho considerable de esta curva a una función lineal expresada por  $F_p = \lambda (A + B\delta)$  si las constantes  $A$  y  $B$  son seleccionadas adecuadamente. En esta ecuación la constante  $A$  es la fuerza de seccionamiento de fibras que en un término tan simple puede expresar un fenómeno tan complejo. Dalois (1990) opina que la variación de la fuerza que sufre un diente de sierra en función de diferentes condiciones de corte, muestra que es bastante ventajoso retirar virutas gruesas que virutas delgadas sobre todo cuando la madera es dura, la arista del diente es menos aguda y el ángulo de ataque es mayor.

Diversos investigadores establecen que el esfuerzo de corte aumenta con el

espesor de viruta en una relación descrita por una curva sigmoïdal, parabólica en su origen e hiperbólica al final, con una linearidad en su parte intermedia de la forma  $Y = a + b X$ ; donde  $Y$  es el esfuerzo de corte,  $X$  el espesor de viruta,  $a$  la ordenada en el origen y  $b$  el coeficiente angular de la recta (ANTOINE, 1960; NININ, 1969; GARCIA et al., 2002).

Gonçaves (2000) indica que las fuerzas de corte paralela y normal son interdependientes de otros factores además del espesor de viruta, siendo así una relación general y difícil de ser establecida. A partir de la relación de estas fuerzas con el espesor de viruta en la dirección 90–0 estudiada por Franz, con tres especies de madera y tres contenidos de humedad, destaca la dificultad incluida al generalizar el efecto del espesor de viruta como un factor aislado que afecta a las fuerzas de corte.

### **Ancho de corte**

En corte ortogonal, si no se considera la influencia de la resistencia de la madera sobre los bordes laterales del filo de la herramienta, la fuerza de corte paralela aumenta en la misma proporción del aumento del ancho de corte, o sea, si la herramienta es del ancho del filo de la herramienta, entonces las fuerzas de corte son directamente proporcionales al ancho de corte (GONÇALVES, 2000).

Sales (1990) explica que una viruta aserrada al estar atrapada en las paredes laterales del corte no puede deformarse libremente y ejerce una presión sobre las paredes laterales, que genera un aumento en la fricción que se incrementa con el espesor de viruta. Cuanto mayor es el espesor de la viruta, la acción mecánica de las paredes laterales de la ranura de corte se transmite más a la viruta completa. Considera que a partir de cierto espesor de viruta el esfuerzo de corte total  $F_c$  crece mucho más rápido. Para longitudes de filo entre 2 y 6 mm, la fuerza de corte es sustancialmente proporcional a la longitud de la arista.

Koch (1964) precisa que la tendencia de la madera a la expansión paralela al borde del filo produce fricciones laterales adicionales. Antoine (1960) estima que las variaciones del ancho de corte se traducen en variaciones proporcionales de los factores corte de fibras, reducción y evacuación de virutas; solo permanece constante el factor de doble cizallamiento lateral.

### **Ángulo de ataque**

Según García et al (2002) un aumento del ángulo de ataque disminuye el esfuerzo de corte, sin embargo, a partir de los 40° un aumento del primero produce un aumento del esfuerzo por deformación de la arista del diente. Dalois (1990) comparte la opinión de utilizar un ángulo de ataque relativamente elevado para todas las maderas, excepto con sierras cinta de mediana y baja capacidad, la experiencia demuestra que incluso para maderas muy duras puede alcanzar a 30° si el ángulo libre se reduce lo suficiente.

Sales (1990) advierte que cualquier reducción en el ángulo de ataque genera una pérdida de capacidad del diente para cortar las fibras, así como un aplastamiento excesivo de las fibras antes del corte, lo que provoca un aumento de la fuerza de fricción paralela a la trayectoria de la herramienta. Explica que cuando se pasa de un ángulo de ataque de 10° a uno de 22° la fuerza de corte disminuye en 11% para las virutas de 0,2 mm de espesor y 20% para virutas de 0,8 mm, lo cual confirma el interés de cortar virutas gruesas siempre que el material lo permita. La práctica del aserrado de maderas duras con ángulos menores de 25° y de maderas blandas o semi-duras con ángulos de 25° a 35° se deben a factores relacionados indirectamente con la geometría del diente, como la especie y la dimensión de las hojas.

### **Ángulo libre**

García et al (2002) señalan que cuando el ángulo libre es menor a 2° el esfuerzo de corte aumenta por fricción sobre la madera. La práctica recomienda que su límite inferior se sitúe en el entorno de 7°, aunque para maderas blandas, desarrollando aserrados rápidos, se puede alcanzar el valor de 15°. Sales (1990) considera en la práctica que, la influencia de este ángulo en la fuerza de corte es muy secundaria en relación con su influencia en el desgaste.

Gonçalves (2000) también opina que la influencia del ángulo libre es prácticamente despreciable, pero en relación a la influencia del ángulo de salida. Cuando es menor de 2° colabora en el aumento del esfuerzo de corte, causando fricción del diente con la madera. Gutiérrez y Gutiérrez (1982a) puntualizan que sobre los 15°, el esfuerzo de corte crece rápidamente, disminuyendo además la solidez del diente.

### 2.5.3. Resistencia específica de corte

La resistencia específica de corte es el factor que representa a la propiedad de la madera de resistencia al corte. Su determinación es de gran importancia pues permite el cálculo de la fuerza principal de corte o de la potencia de corte necesaria en los procesos de mecanizado de la madera para una determinada tasa de remoción de virutas. Cuando se conoce la resistencia específica de corte se puede optimizar el proceso de mecanizado de la madera con la utilización del máximo rendimiento que el equipo puede ofrecer, o aún se pueden proyectar equipos que ofrezcan con seguridad la potencia exigida por la operación a que se destinan (GONÇALVES, 2000).

La determinación de la resistencia específica de corte es complicada, puesto que depende de muchos factores: especie maderable, humedad de la madera, ángulo de ataque, desafilado del elemento de corte, espesor de viruta, velocidad de corte y avance. Para cada sierra y máquina existe una metodología especial de cálculo de esta resistencia (INSTITUTO FORESTAL, 1989). Sales (1990) aplica el esfuerzo de corte unitario como término equivalente a esta resistencia, cuando en el esfuerzo de corte total considera la influencia de la longitud del filo y del espesor de viruta en el área de rotura causada por un diente.

Gonçalves (2000) explica que, en los experimentos de mecanizado para la determinación de la resistencia específica de corte, la operación de corte es instrumentada mediante un dinamómetro que capta las señales relativas a los esfuerzos solicitados en la herramienta de corte para la remoción de viruta de la madera. De esta forma los valores de fuerza principal de corte son medidos en cada situación de corte ensayada, luego son empleados en la ecuación general de fuerza principal de corte para la determinación de esta resistencia, definiendo a los esfuerzos de corte durante la operación de mecanizado, por la razón entre la fuerza ejercida sobre la herramienta y el área de la sección transversal de la viruta, como sigue:  $F_c = K \times b \times h$ , donde

$F_c$  = fuerza principal de corte (N)

$K$  = resistencia específica de corte ( $N \cdot mm^{-2}$ )

$b$  = ancho de corte o longitud actuante del filo (mm)

$h$  = espesor de viruta (mm)

El autor en mención precisa que la resistencia específica de corte varía para cada especie en una proporción directa con la densidad; también varía en función del contenido de humedad, geometría de la herramienta y dirección de corte; pudiendo despreciarse la velocidad de corte por su poca o casi ninguna influencia sobre la fuerza principal de corte. Concluye a partir de resultados experimentales de resistencia específica de corte para 10 especies de madera mecanizadas en la dirección 90-0 que es posible adoptar un valor de 7% de variación de la constante específica del material como factor de corrección en la fuerza principal de corte por cada 1° de aumento o disminución del ángulo de salida. Vignote y Martínez (2006) señalan que en maderas duras puede llegar a valores de hasta 2.300 kg.cm<sup>-2</sup> (225,4 N.mm<sup>-2</sup>) y en maderas blandas de sólo 450 kg.cm<sup>-2</sup> (44,1 N.mm<sup>-2</sup>); aunque Sales (1990) reporta para *Aucoumea klaineana* esfuerzos de corte unitario de 29 N sobreentendiendo la presión del diente sobre un mm<sup>2</sup>.

#### 2.5.4. Potencia de corte

Tuset et al. (2007) consideran que en una sierra sinfín se requiere potencia para las siguientes acciones: marcha en vacío de la sierra, corte de la madera y avance de la madera. La primera depende del diámetro y el peso de los volantes, de su velocidad de giro, del espesor de la cinta y del tipo de rodamiento. La potencia necesaria para el corte varía con una serie de factores: contenido de humedad de la madera, velocidad lineal de la cinta, altura de corte, paso, ángulos de los dientes, espesor de viruta, ancho de corte, resistencia de la madera a la compresión perpendicular y al corte. La potencia para el avance de la madera depende del tipo y del tamaño del carro.

Daloís (1990) recuerda que en la potencia calculada para el corte se debe contabilizar las diversas fricciones inevitables, que según García et al. (2002) debe ser mayorizada por un coeficiente entre 1,2 y 1,4 relativo a las pérdidas mecánicas, rendimiento del motor, etc. Ninin (1986) calcula la energía útil para el corte deduciendo la energía para mantener el giro de la energía consumida.

Dalois (1990) opina que cuando se conoce la fuerza de corte necesaria para una especie dada con una dentadura y un espesor de viruta determinado, es fácil calcular la potencia del motor que acciona la máquina. Vignote y Martínez (2006)

indican que la potencia para efectuar el corte de una madera depende fundamentalmente de la dureza de la madera y del volumen de madera que deba cortar en la unidad de tiempo.

La potencia requerida para el corte  $P_c$  (W) puede determinarse mediante las expresiones v, w, x, y.

$$P_c = K \times b \times H \times A = F \times V \text{ (INSTITUTO FORESTAL, 1989)} \quad (v)$$

$$P_c = \frac{F \times H \times V}{p} \text{ (DALOIS, 1990; GARCIA et al., 2002)} \quad (w)$$

$$P_c = K \times S \times A \text{ (VIGNOTE y MARTINEZ, 2006)} \quad (x)$$

$$P_c (cv) = \frac{K1 \times b \times h^{1-z} \times V}{75} \text{ (GONÇALVES, 2000)} \quad (y)$$

Donde:  $K$  = resistencia específica de corte ( $N \cdot cm^{-2}$ )  
 $K1$  = constante específica del material  
 $b$  = ancho de corte (cm)  
 $H$  = altura de corte (cm)  
 $A$  = velocidad de avance ( $m \cdot s^{-1}$ )  
 $F$  = fuerza principal de corte (N)  
 $V$  = velocidad de corte ( $m \cdot s^{-1}$ )  
 $p$  = paso de diente (cm)  
 $S$  = superficie presionada por el diente =  $b \times H$  ( $cm^2$ )  
 $h$  = espesor de viruta (cm)  
 $1-Z$  = coeficiente adimensional

Gonçalves (2000) afirma que los valores de fuerza y potencia de corte necesitan ser medidos experimentalmente, con el fin de determinar la resistencia al corte de cada especie de madera, para condiciones prefijadas de humedad, dirección de las fibras y geometría de la herramienta. La fuerza principal de corte calculada con los valores  $K1$  y  $1-Z$  se emplea en la determinación de la potencia necesaria en los procesos de mecanizado de la madera.

Sales (1990) destaca que el trabajo  $W$  requerido para el corte es proporcionado por la fuerza  $F_c$  paralela a la trayectoria de la herramienta ( $W = F_c \times H$ , donde  $H$  = altura de la ranura de corte). Ninin (1986) señala que el amperaje

medido en determinadas condiciones de corte permite calcular la potencia en vatios aplicando la fórmula de electricidad de la expresión z.

$$P = V \times I \times N \times \eta \quad (z)$$

Donde: P = potencia (W)  
 V = tensión eléctrica (V)  
 I = intensidad de corriente (A)  
 N = número de fases  
 $\eta$  = rendimiento eléctrico del motor

La insuficiencia de energía se puede superar mediante la reducción de la velocidad de corte o aumentando el paso. Cuando no se cumplen las condiciones de rigidez y potencia, el aserrado por remoción de viruta es imposible; la cinta trabaja ya sea por arrancado de fibras en madera muy tierna o mediante el raspado en madera muy dura. En las especies de dureza media, ambas acciones ocurren a menudo simultáneamente (DALOIS, 1990).

#### 2.5.5. Condiciones óptimas de corte y requerimientos energéticos

Chardin (1958) y Sales (1990) constatan que en la remoción de viruta con un diente de sierra en un tipo de madera se obtiene un corte limpio, sólo dentro de ciertos límites de espesor de viruta y de características de la herramienta. Los límites de la denominada zona de buen corte se establecen por el espesor de viruta y el ángulo de ataque. El diagrama de la FIGURA 7 permite definir condiciones óptimas de trabajo dentro del área delimitada por las regiones que se indican a continuación.

Región A: la herramienta rechaza el corte o trabaja raspando

Región B: la herramienta trabaja aplastando o triturando la madera

Región C: la herramienta arranca la madera por debajo del plano de corte

Región D: el filo de la herramienta se deteriora rápidamente

Sales (1990) afirma que la zona de buen corte para las maderas tropicales se define por un ángulo de ataque de 25° a 35° y por un espesor de viruta ( $\delta$ ) de 0,5 a 1,5 mm, excluyendo las maderas blandas y muy duras. Generaliza que, en un aserradero tropical, el diámetro de los troncos varíe de 1 a 3 y la fuerza unitaria

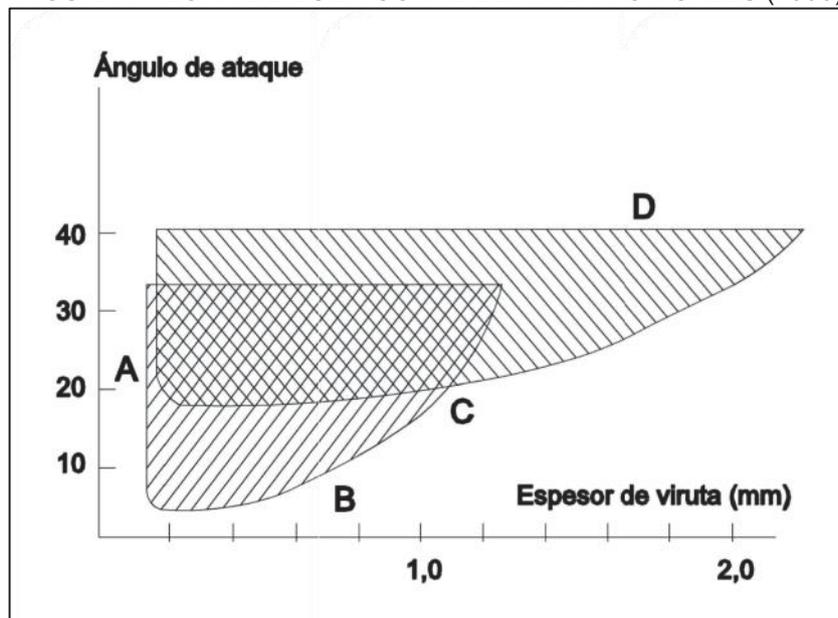
de corte de 1 a 5, por lo tanto, las dificultades de corte pueden variar en una proporción extrema de 1 a 15. Para facilitar el trabajo de la sierra y reducir la serie de dificultades propone agrupar los troncos de acuerdo con la densidad de la madera y el diámetro promedio de las trozas, con el fin de asignar a cada grupo una hoja que se adapte mejor al trabajo requerido.

- **Grupo 1:** madera ligera, madera semipesada (menos de  $700 \text{ kg.m}^{-3}$ ) de diámetro medio.
- **Grupo 2:** maderas semipesadas de gran diámetro, madera pesada y madera sílicea.

Continúa explicando que la fuerza máxima que puede soportar la hoja es una función del número de dientes y del esfuerzo unitario por diente. Dentro de los rangos definidos con el espesor de la cinta ( $e$ ) que siguen a continuación, el espesor óptimo de viruta es una función del tamaño de la troza, la especie y el material utilizado.

- Grupo 1:  $\delta = 0,7e$  a  $1,5e$
- Grupo 2:  $\delta = 0,4e$  a  $0,8e$ .

FIGURA 7 - ZONA DE BUEN CORTE DEFINIDA POR SALES (1990)



Ninin (1969) sostiene que la resistencia de la madera al corte está íntimamente relacionada con su dureza, resistencia al cizallamiento longitudinal y tenacidad, pero principalmente con su dureza y consecuentemente con su

densidad. Destaca que el conocimiento de las influencias de las tres propiedades mecánicas aludidas proporciona una orientación general, en cuanto a las exigencias energéticas para el aserrado de numerosas especies tropicales; con un riesgo de error, probablemente menor que en el caso de una clasificación por masa específica.

Ninin (1986) recuerda que cuando la madera está seca, sus requisitos energéticos y su capacidad de desgaste de los filos son mayores. Clasifica a las especies en seis grupos de requisitos energéticos para el aserrío, utilizando la clave basada en la densidad seca al aire (12% de contenido de humedad) y la dureza de lados Janka que se indica en la TABLA 5. El autor en mención sugiere los elementos geométricos de las dentaduras para los seis grupos de requisitos energéticos establecidos, caracterizando cuatro tipos básicos de cintas:

1. Cinta de 1,25 mm de espesor y 15 cm de ancho para máquinas de 1.400 mm de diámetro de volantes, aunque pueden ser utilizadas también en algunas máquinas de 1.250 mm.
2. Cintas de 1,47 mm de espesor y 18 a 20 cm de ancho para máquinas de 1.500 mm y 1.600 mm de diámetro de volantes.
3. Cintas de 1,65 mm de espesor y 20 cm de ancho para máquinas de 1.800 mm de diámetro de volantes.
4. Cintas de 1,65 mm de espesor y 24 cm o más de ancho para máquinas de 1.800 mm de diámetro de volantes.

TABLA 5 - CLAVE PARA LA ASIGNACIÓN DE GRUPOS ENERGÉTICOS		
GRUPO	DENSIDAD	DUREZA
ENERGETICO	g.cm <sup>-3</sup>	kg.cm <sup>-2</sup>
I	0,20 – 0,50	150 – 300
II	0,50 – 0,60	300 – 500
III	0,60 – 0,70	500 – 700
IV	0,70 – 0,85	700 – 900
V	0,85 – 1,00	900 – 1300
VI	≥ 1,00	1300 – 1800

FUENTE: NININ (1986)

En los cuadros del ANEXO 1 JUNAC (1989) y Ninin (1986) especifican para cada tipo de cinta los elementos de la dentadura: paso (mm), altura del diente (mm),

ángulo de ataque, ángulo de hierro, ángulo libre, traba (mm), ángulo de rectificación frontal y ángulo de rectificación lateral; así mismo demuestran la relación existente entre los requisitos energéticos y los elementos geométricos de las dentaduras de perfil pico de loro. También incluyen velocidades de la cinta en valores aproximados para una potencia instalada holgada o limitada a aproximadamente el 50% de lo recomendado.

Los autores en mención tomando como referencia una altura de corte de 30 cm consideran para cada grupo energético los siguientes parámetros inherentes a las condiciones de corte:

- Espesores de viruta óptimos en mm
- Velocidades de la cinta en m/min, recomendables en función de la potencia instalada
- Velocidades de alimentación en m/min, cercanas a las máximas aceptables

## 2.6. RUGOSIDAD SUPERFICIAL

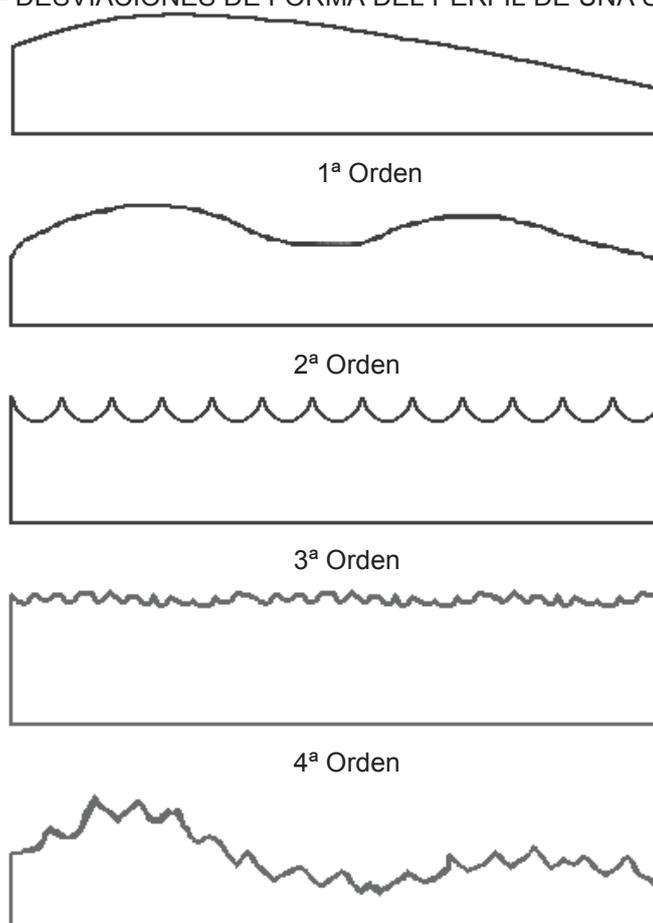
### 2.6.1. Generalidades

La rugosidad o textura primaria puede ser definida como una característica asociada a las irregularidades en la superficie de un material dado, ocasionadas por el proceso de fabricación utilizado. Está formada por surcos o marcas dejadas por la herramienta durante el proceso de fabricación y se encuentra superpuesta a una ondulación o textura secundaria, producida por deficiencias en los movimientos de la máquina, deformación por el tratamiento térmico, o tensiones residuales de soldadura, forja o fundición (GONZALEZ, 1998).

De acuerdo con Deutches Institut Für Normung - DIN (1982) se distinguen diferentes desviaciones de formación agrupadas en seis órdenes relativas a las irregularidades en una superficie, de las cuales en la FIGURA 8 sólo están representadas las desviaciones de 1ª a 4ª orden y la superposición de estas desviaciones; las desviaciones de 5ª y 6ª orden no son representables en forma gráfica y se relacionan con la estructura del material.

Uno de los principales indicadores de la calidad superficial de la madera corresponde a la rugosidad, ya que esta puede ser descrita como las anomalías producidas en la parte exterior de la madera durante el procesamiento con elementos cortantes (PEZOA, 2006).

FIGURA 8 - DESVIACIONES DE FORMA DEL PERFIL DE UNA SUPERFICIE



Superposición de desviaciones de 1ª a 4ª Orden

FUENTE: Adaptado de DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN (1982)

El mecanizado de la madera, con sierras, cuchillas o lijas provoca defectos en mayor o menor medida en la superficie de la madera. La primera máquina en procesar la madera es la sierra de cinta o circular, la cual produce un corte basto en la superficie que se traduce en marcas de dientes cada 3 o 4 mm correspondiente a la mordida programada y una marca de diente más pronunciada cada 10 cm debido a un diente desajustado de los demás (VIGNOTE et al., 2014).

Braga (2011) opina que la superficie mecanizada de la madera posee cinco tipos diferentes de desviaciones que se generan en función de causas bien

específicas dentro del proceso de elaboración de la superficie y que se caracterizan por sus formas geométricas. Aguilera y Vega (2004) afirman que la calidad superficial inapropiada se presenta en dos extremos: una calidad notoriamente deficiente con levantamientos de fibras y ondulaciones pronunciadas, y otra demasiado buena con una superficie muy pulida y ondulaciones imperceptibles.

Según Bet (1999) al examinar una superficie completa o una de sus superficies parciales, las desviaciones que se puedan comprobar en toda su extensión se denominan desviaciones de primer orden. Las desviaciones de segundo orden se denominan ondulaciones y pueden repetirse periódicamente. Las desviaciones de tercer orden son las rayas o surcos de las marcas de avance de la herramienta, que sumadas a las desviaciones de 4ª y 5ª orden componen la rugosidad de la superficie. Las desviaciones de 6ª orden no se incluyen en las mediciones usuales de rugosidad. La suma de las desviaciones de 1ª orden (forma), de 2ª orden (ondulación) y de 3ª a 5ª órdenes (rugosidad) forma el perfil gráficamente representable y sobre el cual se hacen las consideraciones relativas a la metrología de superficie.

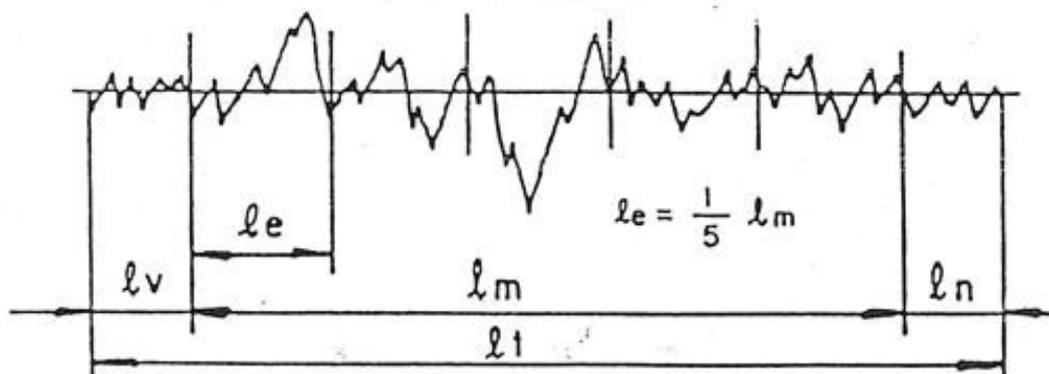
Es sabido que los rugosímetros son equipos que pueden detectar perfiles lineales en superficies de materiales al medir las variaciones verticales mediante el desplazamiento horizontal de una aguja de palpamiento que entra en los intersticios de la madera, permitiendo conseguir una representación gráfica de la superficie analizada. Los parámetros de rugosidad representan una forma de expresión matemática entre la variación vertical de las superficies, expresada por los picos y valles y el desplazamiento horizontal del palpador (SORAGI, 2009).

El análisis de la rugosidad dispone de dos sistemas de referencia: el sistema "E" o de envolvente y el sistema "M" o de la línea media, siendo este último el de mayor interés por emplearse mundialmente. En el sistema "M" se establece una referencia llamada Línea Media que se define como la línea del perfil de rugosidad con la misma forma de un perfil geométrico, dispuesta paralelamente a la dirección general, dentro del curso de medición, de modo que la suma de las áreas superiores a esta línea, sea exactamente igual a la suma de las áreas inferiores a ella (GONZALEZ, 1998).

La longitud total de palpamiento (**lt**) se define como la suma de los siguientes recorridos: distancia inicial del trecho palpado (**lv**), longitud de medición (**lm**) y

distancia final del trecho palpado ( $l_n$ ), donde la longitud de medición es el trecho que será procesado por el rugosímetro para calcular el valor del parámetro seleccionado. En la FIGURA 9 se aprecia que la longitud de muestreo ( $l_e$ ) es la quinta parte de la longitud de medición (GONZALEZ, 1998).

FIGURA 9 - RECORRIDO DE PALPAMIENTO PARA LA MEDICION DE RUGOSIDAD



FUENTE: GONZALEZ (1998)

Braga (2011) en la FIGURA 9 considera que:  $l_e$  (cut-off) representa la longitud estipulada de la superficie utilizada como referencia para identificar las irregularidades obtenidas,  $l_m$  representa la suma de las longitudes de muestreo de la evaluación y  $l_t$  representa el desplazamiento total del palpador durante la medición de la rugosidad que contiene  $l_m$  junto con  $l_v$  (distancia para alcanzar la velocidad de medición) y  $l_n$  (distancia para reducir la velocidad de medición). Además, sugiere seleccionar los valores de cut-off propuestos por el fabricante Taylor Hobson para cada valor de rugosidad que sigue a continuación.

<b>Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>LONGITUD MÍNIMA DE MUESTREO</b>
De 0,1 hasta 1,0	0,25
Mayor que 1,0 hasta 10,0	0,80
Mayor que 10,0 hasta 20,0	2,50
Mayor que 20,0	8,00

Para Soragi (2009) los parámetros que normalmente se utilizan en las evaluaciones de rugosidad son:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  y  $S_m$ . El parámetro de rugosidad  **$R_a$**  se basa en la medición de la textura de una superficie por medio del recurso de

la línea. Es sabido que cuanto más pequeño es el valor de este parámetro menor es la rugosidad del material.

El parámetro **Ra** conocido como rugosidad media es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil de rugosidad en relación a la línea media. El parámetro **Rz** (DIN, ISO, ANSI) denominado altura media del perfil corresponde al valor medio de la suma de los cinco picos más altos a los valles más profundos del perfil dentro de cada longitud de muestreo (MITUTOYO, s.f).

El parámetro más común en rugosidad superficial es **Ra** ya que éste es un valor simple que revelará la calidad de la pieza de la cual dependerá su destino (AYSEL Y DOGU, 1997; VEGA Y AGUILERA, 2005; SORAGI, 2009); aunque otros investigadores prefieren el parámetro **Rz** (AGUILERA Y VEGA, 2004; PEZOA, 2006; AGUILERA Y MUÑOZ, 2011), o consideran comunes tanto a **Ra** como a **Rz** (MAGOSS, 2008; BRAGA, 2011).

#### 2.6.2. Factores que afectan la rugosidad superficial de la madera

En la industria maderera, la rugosidad de superficie depende en gran medida de varios factores, entre los cuales destacan la estructura anatómica, el contenido de humedad, los defectos de la madera de ciertos árboles, el desbastado con material abrasivo, la forma geométrica de las piezas, la velocidad de corte y el afilado de los dientes o de las cuchillas (AYSEL Y DOGU, 1997).

La rugosidad superficial de los productos de madera depende de una serie de factores relacionados con la estructura y propiedades anatómicas de la madera, las condiciones de mecanizado y los parámetros de corte utilizados (LAINA et al., 2017). En relación con la rugosidad, Vega y Aguilera (2005) verifican que el incremento del espesor de viruta degrada la calidad de la superficie resultante.

Vignote et al. (2014) identifican dentro de las características de la madera, a los siguientes factores: grano o tamaño de las células, homogeneidad de la madera, fragilidad del espesor de la pared celular. Explican que maderas irregulares como las coníferas, en donde la madera de otoño es claramente más dura que la de primavera, provoca roturas por cizallamiento en la madera situada entre ambas. De forma similar ocurre en las maderas de vasos visibles y dentro de estas es mayor las irregularidades, cuando los vasos están agrupados.

Según Magoss (2008) la rugosidad de la superficie puede relacionarse con propiedades de la madera y condiciones de mecanizado. Entre las características de la madera se destacan especie de madera, densidad, contenido de humedad y estructura anatómica (número específico y distribución del diámetro interior de traqueidas y vasos). Los factores más importantes en el proceso de mecanizado son la velocidad de corte, el grado de desgaste del filo, los ángulos de ataque y la magnitud de la vibración del banco de la máquina.

Laina et al. (2017) afirman que los procesos de mecanizado y las especies son los factores que afectan significativamente la rugosidad de la superficie, en contraposición a la dirección del grano (plano de sección y ángulo de palpamiento de la aguja), que sólo se mostró significativo en algunos subgrupos

Braga (2011) evidencia para las rotaciones de 3600 y 4000 rpm, respectivamente, que los parámetros de rugosidad Ra y Rz en la madera de *Coffea arabica* no diferían entre sí y presentaron las mejores calidades de superficie mecanizada, pues proporcionaron menores valores en los parámetros evaluados. También observó que menores velocidades de avance y mayores velocidades de corte proporcionan superficies con menores valores de rugosidad y consecuentemente de mejor calidad.

### 3. MATERIAL Y METODOS

#### 3.1. SELECCIÓN DE LA ESPECIE

La especie *Calycophyllum spruceanum* (capirona, pau mulato) fue seleccionada teniendo en cuenta los criterios de: abundancia en bosques secundarios y potencial de uso en plantaciones a campo abierto, adecuada conformación del fuste para el aserrío, alta demanda para la fabricación de muebles y preferencia para la producción de parquet en el mercado nacional; además de las cualidades de su madera según la literatura consultada. La especie utilizada fue colectada en el departamento de Ucayali-Perú, en una plantación experimental de 20 años instalada en Curimaná a partir de la regeneración natural, con un distanciamiento de 3 x 5 m sobre una extensión de 2 ha, la cual careció de tratamientos silviculturales.

#### 3.2. COLECCIÓN DE MATERIAL

##### 3.2.1. Selección de árboles y obtención de trozas

Se tumbaron seis árboles de capirona, distribuidos sobre una plantación de 0,47 ha comprendida entre las UTM 486708, 486822, 486821 y 486748 Este y 9071015, 9071075, 9071057 y 9070965 Norte; a partir de los cuales se obtuvieron 18 trozas de tres niveles de altura por árbol, una correspondiente al nivel basal y otra intermedia de 3,10 m de longitud, y la tercera correspondiente al nivel apical de 2,45 m de longitud (FIGURA 10).

Los árboles fueron seleccionados considerando un DAP mínimo de 25 cm y una altura comercial mínima de 15 m, además de las características visuales de fuste cilíndrico y poca incidencia de ramas. El DAP mínimo de 25 cm se determinó sin tener en cuenta la proporción de madera juvenil y adulta, pero considerando una reducción del diámetro de la base a la copa del árbol a razón de 1 cm/m, con el fin de estimar a una altura de 6,30 m un diámetro mínimo de 20 cm que permita el escuadrado de las trozas a bloques de 15 x 15 cm. Las características de los árboles colectados se muestran en la TABLA 6.

Entre las trozas del nivel intermedio y apical se extrajo una rodaja de 50 mm de espesor para la medición del espesor de corteza y del diámetro a 6,3 m. Las trozas despuntadas a una longitud de 3,10 m y 2,45 m fueron selladas con pintura en sus extremos, con el fin de prevenir el desarrollo de rajaduras luego del despuntado de los bloques más largos a una longitud de 3,00 m.

FIGURA 10 - DISTRIBUCIÓN DE TROZAS DE CAPIRONA PARA SU ESCUADRADO

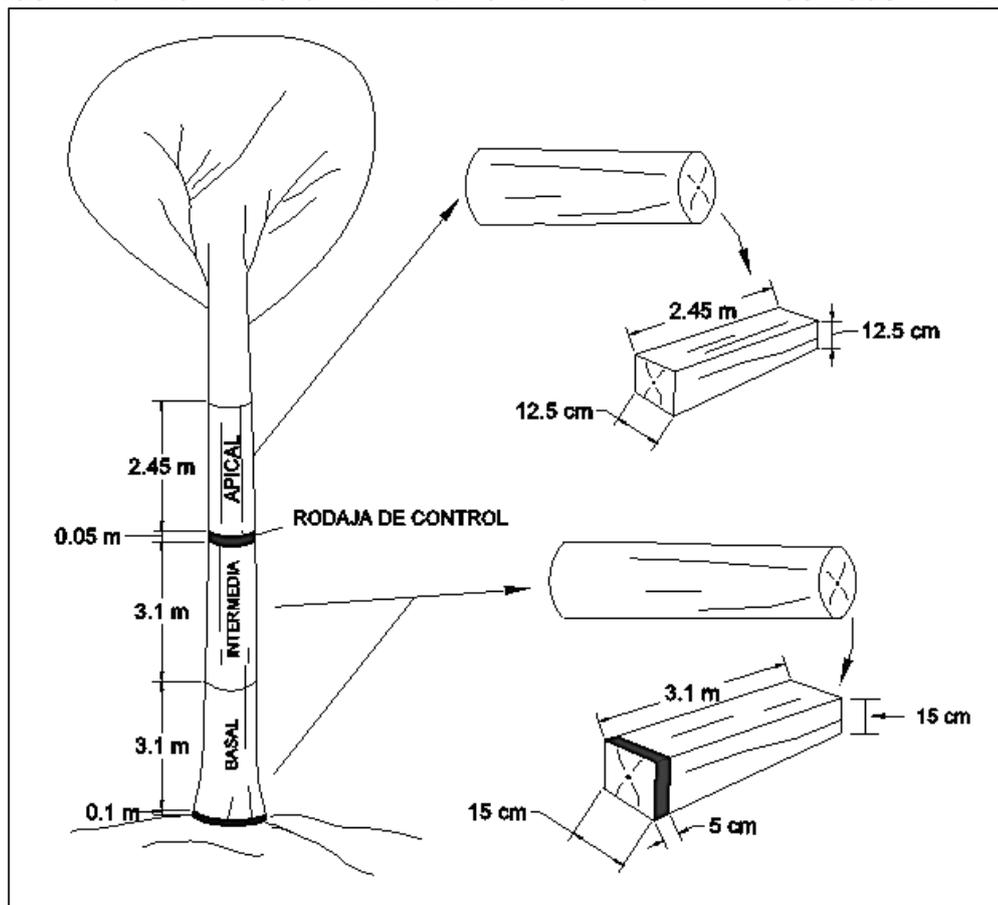


TABLA 6 - CARACTERÍSTICAS DE LOS ARBOLES COLECTADOS

ARBOL N°	ESPESOR DE CORTEZA (mm)	DIAMETRO (cm)		ALTURA COMERCIAL (m)	AHUSAMIENTO (cm/m)
		1,3 m	6,3 m		
1	1,58	25,20	21,50	17,50	0,74
2	1,27	25,00	21,00	19,00	0,80
3	1,64	29,00	25,00	18,50	0,80
4	1,50	25,20	20,50	18,00	0,94
5	1,61	29,70	24,50	18,80	1,04
6	1,62	29,50	24,00	19,50	1,10
Promedio	1,54	27,30	22,80	18,60	0,90
CV (%)	9,08	8,62	8,65	3,87	16,17

### 3.2.2. Preparación y transporte de bloques

De acuerdo a la longitud disponible en cada troza, se obtuvieron 12 bloques de 150 x 150 x 3.100 mm para el ensayo de corte y seis bloques de 125 x 125 x 2.450 mm para el control de variables (FIGURA 11). Durante el escuadrado de las trozas en Pucallpa se descartaron las cantoneras procurando el centrado de la médula en todos los bloques.

Luego de revisar los bloques en sus lados, buscando uniformidad en sus dimensiones para disponer de piezas homogéneas libres de defectos visibles, se procedió a la codificación de 18 bloques en el extremo correspondiente al diámetro mayor de la troza utilizada, con el fin de mantener identificada la base de los bloques para su transporte a la ciudad de Lima.

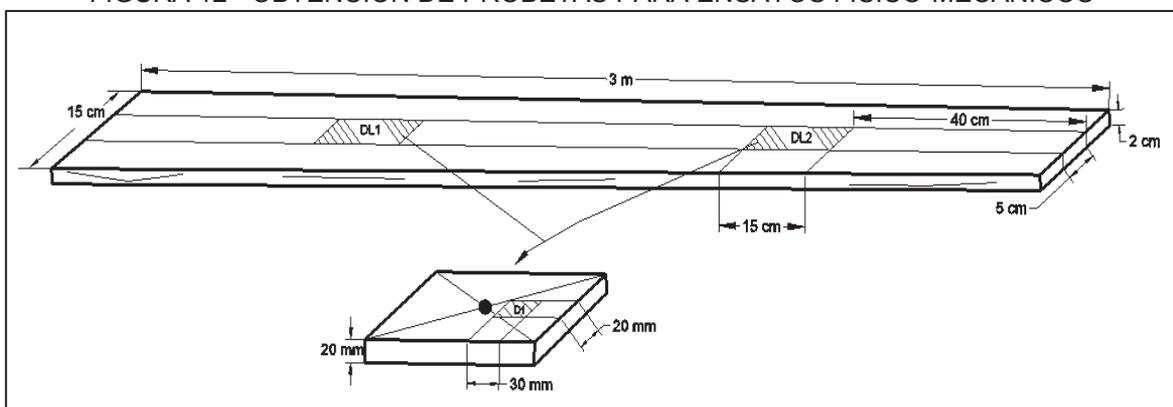
### 3.2.3. Colección de muestras para caracterización de bloques

Antes del ensayo de corte se extrajo una muestra de 50 x 150 x 150 mm de cada bloque de 3100 mm de longitud, despuntando a escuadra el extremo correspondiente a la base del bloque codificada con los colores amarillo y blanco, conforme se muestra en la FIGURA 11. Las 12 muestras colectadas para la caracterización anatómica por bloque se destinaron a la obtención de un cubo de 50 mm de lado para la determinación del grano, así como de láminas histológicas de sección transversal y material anatómico disociado para la medición de fibras y vasos procedentes de una zona intermedia entre la corteza y la médula. El material histológico se obtuvo con un espesor de 25  $\mu\text{m}$ , fijando en el micrótopo de deslizamiento un pequeño cubo de 10 mm de lado.

Después de la obtención de seis tablas de 20 mm de espesor por bloque se recolectó una muestra de aserrín para determinar su contenido de sílice. Así mismo se cortaron dos probetas de 20 x 50 x 150 mm a 40 cm de los extremos y a 5 cm del canto de cada tabla obtenida por bloque, con el fin de coleccionar material para la determinación de la dureza lateral, contenido de humedad y densidad de cada tabla recién aserrada (FIGURA 12).

FIGURA 11 - BLOQUES OBTENIDOS DE LAS TROZAS DE *Calycophyllum spruceanum*

FIGURA 12 - OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS FÍSICO-MECÁNICOS



### 3.3. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE TABLEADO

El tableado de los bloques se efectuó en la *Empresa Gestión Maderera SAC* (GEMASAC) ubicada en Huachipa, a 14 km al este de Lima-Perú, empleando una sierra de cinta vertical *SCHIFFER* con las siguientes características básicas:

- Diámetro de volante : 1.100 mm
- Ancho de volante : 110 mm
- Potencia del motor : 40 cv (29,4 Kw)
- Rotación del eje motriz : 1.780 rpm
- Rotación de la volante : 276 rpm (medida con tacómetro)
- Diámetro de la polea motriz : 80 mm
- Diámetro de la polea conducida: 420 mm
- Número de fajas de transmisión : 5
- Sistema de alimentación : por rodillo vertical acanalado

Cabe destacar que la rotación de la volante determinada a partir de la lectura tacométrica de la velocidad lineal de la cinta, no alcanzó la rotación teórica de acuerdo a la relación de transmisión entre las poleas motora y conducida, debido al patinamiento de la rueda de contacto del tacómetro sobre la cinta engrasada y de ésta sobre las volantes de la máquina. En estas condiciones se obtuvo para la cinta sin cortar una velocidad lineal promedio de  $953 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , en base al registro de 40 lecturas tacométricas.

### 3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA HOJA DE SIERRA CINTA

#### 3.4.1. Especificación de dimensiones de la cinta sinfín

Se seleccionaron dos hojas de sierra cinta *BAND MASTER* Modelo Premium de  $127 \times 1,1 \text{ mm}$ , preparadas con una longitud de  $7,38 \text{ m}$  y dos formatos de diente con un paso de  $38 \text{ mm}$  para ambos formatos. Con un vernier digital *MITUTOYO CD – 6” CSX – B* de  $0,01 \text{ mm}$  de precisión se revisó el ancho y espesor de cinta, así como el paso del diente informados por el taller de afilado de *GEMASAC*.

#### 3.4.2. Identificación de perfiles de diente evaluados

Se evaluaron los formatos de diente tipos lobo (*dente mareado*) y encía (*dente-reto*) presentados en la FIGURA 13, los cuales son considerados entre los perfiles básicos propuestos por JUNAC (1989). El perfil encía está menos difundido en Pucallpa que el tipo lobo, debido a su garganta plana que requiere un afilado de sumo cuidado.

FIGURA 13 - PERFILES DE DIENTE EVALUADOS



### 3.4.3. Determinación de la geometría del diente

Por cada cinta sinfín utilizada se traspasó a un papel milimetrado la imagen del perfil de seis dientes consecutivos seleccionados al azar, con el fin de estimar el seno de la garganta mediante el método gráfico propuesto por Williston (1989) y Sales (1990). En los perfiles de diente copiados a escala natural se determinaron las distancias y ángulos elementales especificados en la TABLA 7. En las cintas seleccionadas se verificó el ancho del recalcado medido con 0,01 mm de precisión cada 20 dientes a partir del diente 10; así mismo se controló la traba izquierda y derecha de 30 dientes con un medidor de traba *HELIOS* de 0,05 mm de precisión, evaluando subgrupos de cinco dientes consecutivos, distribuidos cada 27 dientes.

TABLA 7 - CARACTERÍSTICAS GEOMETRICAS DE LOS FORMATOS DE DIENTE EMPLEADOS

CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICA	FORMATO DE DIENTE	
	LOBO	ENCIA
Paso del diente (mm)	38,00	38,00
Altura del diente (mm)	11,50	11,00
Seno de la garganta (mm <sup>2</sup> )	278,30	272,40
Radio de la garganta (mm)	3,96	4,07
Ancho del recalcado (mm)	2,71	2,63
Traba derecha (mm)	0,79	0,77
Traba izquierda (mm)	0,83	0,77
Traba grupal (mm)	0,81	0,77
Angulo de salida de virutas (grados)	26	21
Angulo de la punta del diente (grados)	44	47
Angulo de incidencia (grados)	20	22
Angulo de rectificación frontal (grados)	11	10

En la TABLA 7 se aprecia un solo paso y características diferenciadas para ambos formatos de diente, en la cual el diente tipo lobo trabaja con una traba asimétrica de 0,04 mm entre su lado derecho e izquierdo. En los ANEXOS 2 y 3 se presenta los valores de la evaluación realizada a la traba en una muestra de 30 dientes con los perfiles tipo lobo y tipo encía, respectivamente.

### 3.5. REALIZACION DEL ENSAYO DE CORTE CON SIERRA CINTA

#### 3.5.1. Selección de velocidades de avance

Antes de iniciar el ensayo de corte se tablearon tres bloques de 2,45 m de longitud con el fin de marcar tres velocidades de avance en la perilla del regulador del rodillo de alimentación: baja ( $8,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ), media ( $16,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) y alta ( $22,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Así mismo se realizó el entrenamiento del operador de la sierra de cinta y personal de apoyo para los ensayos de corte a efectuarse durante el tableado de los 12 bloques.

#### 3.5.2. Distribución de velocidades de avance en los bloques

Para el tableado de los bloques con ambos perfiles de diente se plantearon cortes cada 20 mm, considerando tres secuencias aleatorias de las seis posibles para la distribución sistemática de la velocidad de avance (baja, media y alta) cada dos cortes consecutivos. Las secuencias elegidas fueron baja-media-alta, alta-media-baja y media-alta-baja, quedando descartadas por el azar alta-baja-media, baja-alta-media y media-baja-alta. De esta manera la velocidad de avance para el tableado de los bloques quedó distribuida por árbol, en forma aleatoria, de acuerdo a la secuencia mostrada en la TABLA 8 para ambos perfiles de diente.

TABLA 8 - DISTRIBUCION DE LAS VELOCIDADES DE AVANCE BAJA, MEDIA Y ALTA PARA EL TABLEADO DE BLOQUES

PERFIL DE DIENTE	NUMERO DE ÁRBOL	BLOQUE	VELOCIDAD DE AVANCE ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) SEGÚN N° DE CORTE					
			1	2	3	4	5	6
			Lobo (dente mareado)	1 3 5	A y B A y B A y B	8,4 22,2 16,2	8,4 22,2 16,2	16,2 16,2 22,2
Encía (dente reto)	2 4 6	A y B A y B A y B	8,4 22,2 16,2	8,4 22,2 16,2	16,2 16,2 22,2	16,2 16,2 22,2	22,2 8,4 8,4	22,2 8,4 8,4

Donde: A corresponde a la troza basal y B corresponde a la troza intermedia

### 3.5.3. Tableado de bloques con sierra cinta

Se seleccionaron los árboles 1, 3 y 5 para probar el perfil de diente tipo lobo, mientras que para el diente tipo encía se utilizaron los árboles 2, 4 y 6. Se emplearon dos bloques de 150 x 150 x 3000 mm por árbol uno basal y otro intermedio, lo cual determinó una muestra de seis bloques para cada perfil de diente.

Con cada perfil de diente se realizaron seis cortes de 150 mm de altura en cada bloque (FIGURA 14), empleando una velocidad de corte para tres velocidades de avance preseleccionadas. Previo al tableado de bloques se conectó al motor eléctrico un analizador digital de potencia tipo pinza, *LUTRON* Modelo: PC-6011SD con una precisión de 0,001 kW. El analizador de potencia conectado conforme el diagrama de la FIGURA 15, efectuó lecturas cada dos segundos para registrar las siguientes variables por línea de corte: intensidad de corriente (A), tensión eléctrica (V) y potencia activa (kW). La potencia reactiva fue compensada por un banco de condensadores.

FIGURA 14 - TABLEADO DE LOS BLOQUES

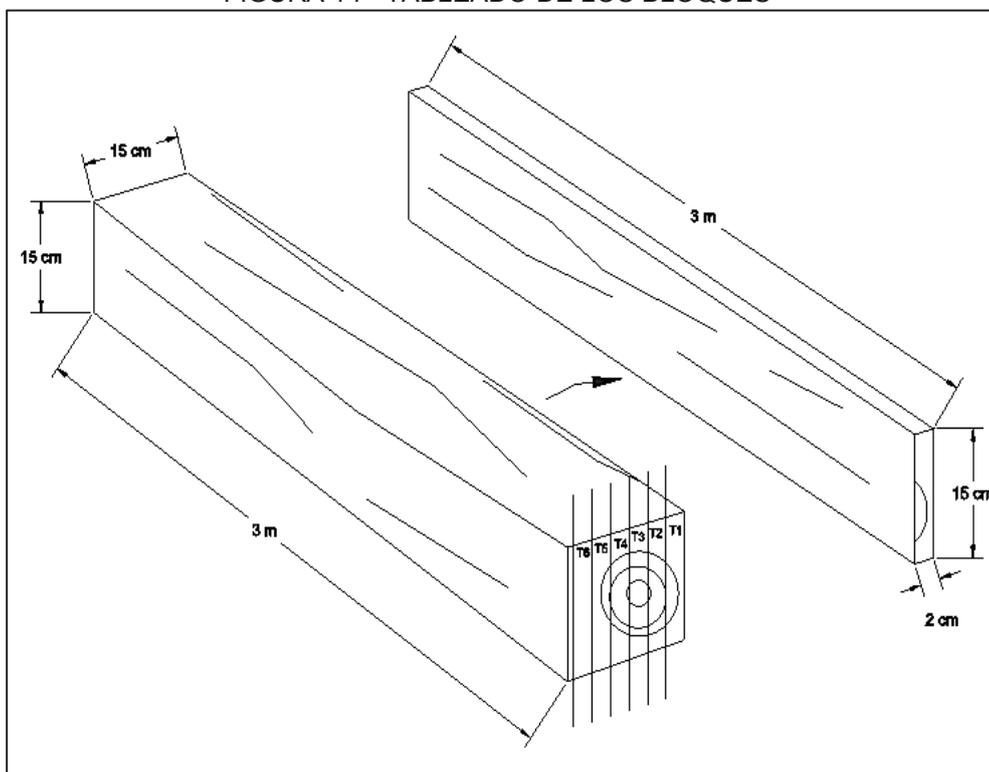
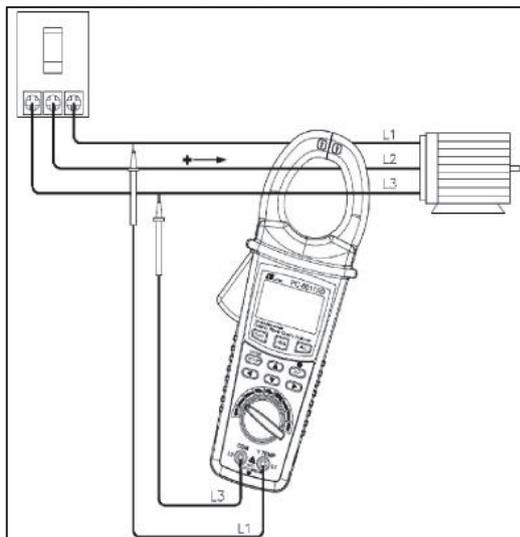


FIGURA 15 - CONEXIÓN DEL ANALIZADOR DIGITAL DE POTENCIA TIPO PINZA



FUENTE: CLAMP POWER ANALYZER OPERATION MANUAL (s.f)

Se siguió la recomendación de Trejo et al. (2007) de evaluar la confiabilidad de la toma de datos referentes al consumo de potencia mediante mediciones de la intensidad de corriente consumida para mantener el giro de las volantes en vacío a diversas horas del día, para lo cual se registraron 1.679 lecturas de intensidad de corriente observándose un consumo promedio de 25,22 A con un coeficiente de variación de 2,75% que sugiere un patrón de dispersión muy bajo. Esta evaluación permitió tener la certeza de que el consumo de potencia activa en la planta de la empresa *GEMASAC* se mantuvo estable durante el día que se realizaron los ensayos de corte.

Durante el tableado de cada bloque empleando un tacómetro digital *MITUTOYO PH 200LC* con precisión  $0,1 \text{ m.min}^{-1}$  se registró la velocidad de corte (en  $\text{m.min}^{-1}$ ) cada tres cortes, con el fin de evaluar su variación debido a la carencia de un inversor de frecuencia. Así mismo se verificaron las velocidades de avance establecidas en el ensayo, controlando el tiempo transcurrido en cada línea de corte, desde el contacto de la cinta con el bloque hasta su salida del mismo.

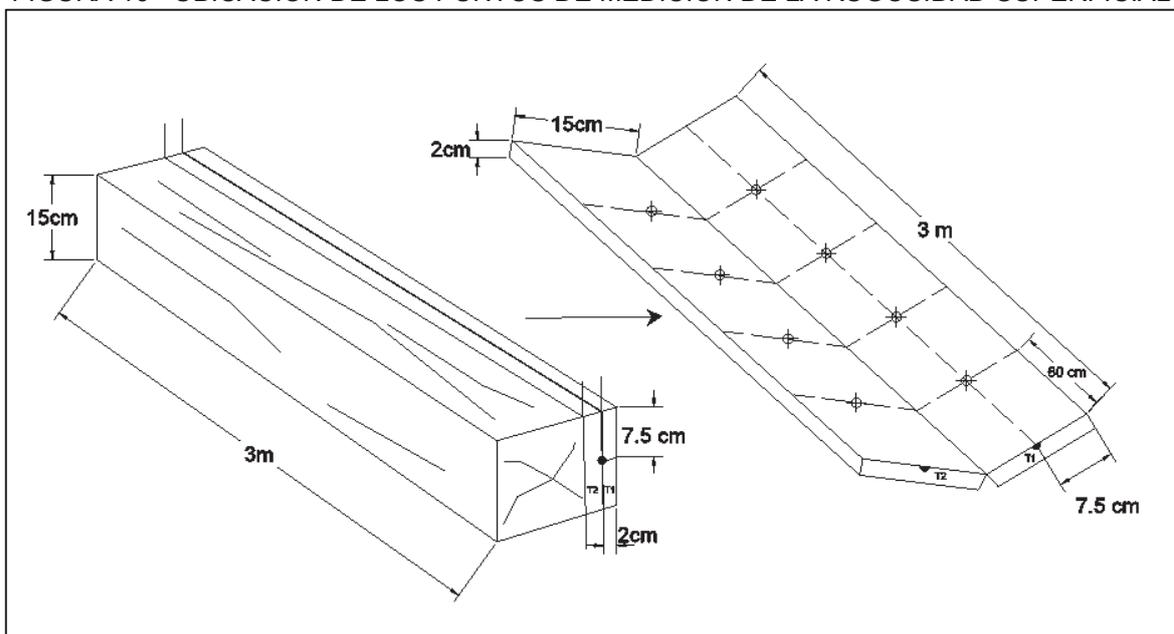
Finalizado el ensayo de corte con cada perfil de diente se efectuaron muescas de aproximadamente 5 mm a 16 tablas de 3.000 mm de longitud correspondientes a cortes alternados del tres al 33, con el fin de medir el ancho de corte con 0,01 mm de precisión. Así mismo se descargó el registro de datos almacenados en EXCEL, de la tarjeta micro SD del analizador de potencia tipo

pinza a una laptop, a partir del cual se identificaron las lecturas de potencia para el giro en vacío y potencia total consumida en cada línea de corte.

### 3.6. MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Se marcaron cuatro puntos para la medición de la rugosidad al lado derecho e izquierdo de cada línea de corte evaluada, los cuales se distribuyeron cada 60 cm a 7,5 cm de uno de los bordes de la superficie aserrada verde, conforme se aprecia en la FIGURA 16. De acuerdo con Magoss (2008) y Braga (2011) se evaluaron los parámetros de rugosidad  $R_a$  (rugosidad media) y  $R_z$  (altura media del perfil), cuya medición se hizo mediante un rugosímetro digital de palpador inductivo de aguja MITUTOYO SJ-201P con precisión de 0,01 a 0,1  $\mu\text{m}$ , caracterizado por un radio de la punta de 5  $\mu\text{m}$  y una longitud de medición equivalente a cinco longitudes de muestreo de 2,5 mm (MITUTOYO, s.f).

FIGURA 16 - UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL



Mediante 10 mediciones preliminares de  $R_a$  en la superficie aserrada de las tablas obtenidas se estimó un promedio de  $R_a$  de 19,18  $\mu\text{m}$ , el cual sirvió de referencia para seleccionar la longitud de muestreo de 2,5 mm de acuerdo a la propuesta de Taylor Hobson (BRAGA, 2011). Luego se realizaron ocho lecturas de

Ra y Rz, cuatro al lado derecho y cuatro al lado izquierdo de cada línea de corte, con el fin de comparar la calidad de la superficie generada por el diente evaluado.

### 3.7. CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA DE CAPIRONA

#### 3.7.1. Determinación de la dureza lateral, contenido de humedad y densidad

Considerando una adaptación de la norma NTP 251.015 de INACAL (2014) mediante la reducción en el espesor de la probeta y número de penetraciones se determinó la dureza lateral *Janka* correspondiente a cada corte de 20 mm efectuado en el bloque, utilizando para este ensayo las 12 probetas de 20 x 50 x 150 mm obtenidas por bloque según 3.2.3.

Una vez efectuada la penetración de la semi-esfera en el centro de la cara evaluada por cada probeta de dureza se cortó una probeta de 20 x 20 x 30 mm a 10 mm del punto de penetración, con el fin de determinar su contenido de humedad y densidad básica según ISO (2014) en las normas ISO/FDIS 13061 parte 1 y 2, respectivamente. Los ensayos físico-mecánicos aludidos se realizaron en el Laboratorio de Ensayos Tecnológicos de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

#### 3.7.2. Determinación del contenido de sílice

Se determinó el valor de cenizas de aserrín obtenido por bloque de acuerdo con la norma TAPPI T-211 om-02; así mismo se determinó según TAPPI T-245 cm-07 el contenido de sílice correspondiente a cada bloque tableado.

#### 3.7.3. Biometría de vasos y fibras

Por cada bloque evaluado se determinó el grano colocando una cuchilla en la sección transversal de un cubo de madera de 50 mm de lado, siguiendo la dirección de los radios y golpeando suavemente para verificar el grado de dificultad que ofrece la madera al corte longitudinal, observando la dirección seguida por los elementos leñosos al separarse de manera espontánea.

Así mismo se prepararon láminas histológicas con dos secciones

transversales de madera y tejido macerado conforme a Dadswell (1972) de 25 vasos y 25 fibras por bloque, con el fin de realizar mediciones de número de poros por mm<sup>2</sup>, diámetro y longitud de vasos, así como espesor, longitud y diámetro de fibras, de acuerdo al procedimiento de la *International Association of Wood Anatomists* - IAWA (1989). La biometría de los elementos estructurales aludidos se evaluó con el programa de análisis de imágenes *Leica Application* utilizando un microscopio Leica DM 750 con una cámara Leica ICC50W.

#### 3.7.4. Estimación de la fracción y porción de pared de fibra

Los parámetros anatómicos de espesor, diámetro de fibras, fracción de pared de fibra, así como número de poros por mm<sup>2</sup>, diámetro de vasos y porción de pared de fibra disponible por mm<sup>2</sup>, sin tener en cuenta la porción de células parenquimáticas fueron evaluados sobre el tejido de xilema. Se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Melo et al (2015) que siguen a continuación:

$$FPF = \frac{2E_p}{D_f} \times 100 \quad (1)$$

$$PPF = \left( 1 - \frac{N_p \times \pi D_v^2}{4} \right) \times FPF \quad (2)$$

Donde FPF = fracción de pared de fibra (%)

PPF = porción de pared de fibra (%)

E<sub>p</sub> = espesor de pared

D<sub>f</sub> = diámetro de fibra

N<sub>p</sub> = número de poros por mm<sup>2</sup>

D<sub>v</sub> = diámetro medio de los elementos del vaso (mm)

### 3.8. PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos obtenidos durante el tableado de los bloques se digitaron y tabularon en la hoja electrónica de *EXCEL* para facilitar el cálculo por cada línea de corte de los siguientes parámetros:

a) Velocidad de avance ( $V_a$ )

Se determinó en base a la longitud del bloque, aplicando la ecuación 3.

$$V_a = \frac{L_b}{T_c} \quad (3)$$

Donde  $V_a$  = velocidad de avance ( $m \cdot min^{-1}$ )

$L_m$  = longitud del bloque (m)

$T_c$  = tiempo por línea de corte (min)

## b) Espesor de viruta (EV)

Se estimó mediante la ecuación 4 (GARCIA et al., 2002) y luego tomando como referencia los límites prácticos de Chardin (1957) y Gutiérrez y Gutiérrez (1982a) se adoptó una clasificación de tres categorías de espesor de viruta que se aprecian en la TABLA 9.

$$EV = \frac{p \times V_a}{V_c \times 60} \quad (4)$$

Donde EV = espesor de viruta (mm)

$p$  = paso del diente (mm)

$V_a$  = velocidad de avance ( $m \cdot min^{-1}$ )

$V_c$  = velocidad de corte ( $m \cdot s^{-1}$ )

TABLA 9 - CLASIFICACIÓN DEL ESPESOR DE VIRUTA POR TIPO DE ACABADO

CATEGORÍA DE ESPESOR DE VIRUTA	RANGO (mm)	ACABADO DE SUPERFICIE
• Delgado	De 0,20 a 0,49	Suave
• Mediano	De 0,50 a 0,79	Semi-áspero
• Grueso	De 0,80 a 1,20	Áspero

FUENTE; ADAPTADO DE CHARDIN (1957) Y GUTIÉRREZ Y GUTIÉRREZ (1982a)

c) Potencia útil ( $P_u$ )

Se determinó aplicando la ecuación 5 (NININ, 1986).

$$P_u = P_c - P_g \quad (5)$$

Donde  $P_u$  = potencia útil para el corte (W)  
 $P_c$  = potencia consumida (W)  
 $P_g$  = potencia para mantener el giro (W)

d) Esfuerzo de corte unitario ( $F_u$ )

Se estimó a partir del esfuerzo de corte por diente, de acuerdo a las categorías de espesor de viruta establecidas por tres velocidades de avance y una velocidad promedio de corte; adoptando para ello la especificación de Sales (1990) del esfuerzo de corte reducido a un diente de un milímetro de ancho por un milímetro de espesor de viruta. El esfuerzo de corte por diente correspondiente a cada línea de corte se obtuvo mediante la ecuación 6.

$$f = \frac{P_u \times p}{V_c \times H_c} \quad (6)$$

Donde  $f$  = esfuerzo de corte por diente (N)  
 $P_u$  = potencia útil (W)  
 $p$  = paso (mm)  
 $V_c$  = velocidad de corte ( $m \cdot s^{-1}$ )  
 $H_c$  = altura de corte (mm)

e) Coeficiente de utilización de la garganta ( $\mu$ )

Se calculó en base al promedio del área de la garganta de seis dientes por cada perfil evaluado, aplicando la ecuación 7 propuesta por Ninin (1969).

$$\mu = \frac{S}{H_c \times EV} \quad (7)$$

Donde  $\mu$  = coeficiente de utilización de la garganta  
 $S$  = seno o área de la garganta ( $\text{mm}^2$ )  
 $H_c$  = altura de corte (mm)  
 $EV$  = espesor de viruta (mm)

f) Energía específica de corte ( $E_s$ )

Se estimó por diente, empleando las ecuaciones 8 y 9.

$$TRV = 1000V_c \times EV \times AC \quad (8)$$

$$E_s = \frac{P_u \times p}{H_c \times TRV} \quad (9)$$

Donde  $TRV$  = tasa de remoción de viruta ( $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $E_s$  = energía específica de corte ( $\text{W} \cdot \text{mm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $V_c$  = velocidad de corte ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $EV$  = espesor de viruta (mm)  
 $AC$  = ancho de corte (mm)  
 $P_u$  = potencia útil (W)  
 $p$  = paso del diente (mm)  
 $H_c$  = altura de corte (mm)

Adicionalmente se calculó la potencia útil por superficie de corte considerando la productividad de la sierra en  $\text{m}^2$  de superficie aserrada por minuto, según recomienda Page citado por Tuset et al, (2007). Se aplicaron las ecuaciones 10, 11 y 12.

$$P_{Un} = \frac{P_u}{EV \times Ar} \quad (10)$$

$$P = \frac{SA}{T_c} \quad (11)$$

$$P_{usc} = \frac{P_{Un}}{P} \quad (12)$$

- Donde
- PUn = potencia unitaria (kW)
  - P = productividad de la sierra ( $m^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )
  - Pusc = potencia útil por superficie de corte ( $\text{kW} \cdot m^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )
  - Pu = potencia útil (kW)
  - EV = espesor de viruta (mm)
  - Ar = ancho de recalcado (mm)
  - SA = superficie aserrada ( $m^2$ )
  - Tc = tempo de corte (min)

### 3.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La estadística descriptiva de los parámetros en estudio se efectuó utilizando las funciones estadísticas de EXCEL mediante la cual se estimó su promedio, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación e intervalo de confianza. El tableado de los bloques de capirona se evaluó siguiendo el diseño que se indica a continuación.

- Perfiles de diente evaluados: lobo y encía
- Espesores de viruta evaluados: delgado, mediano y grueso
- Niveles de altura del fuste evaluados: basal e intermedio
- N° de bloques de madera por perfil de diente: 06
- N° total de bloques de madera: 12
- N° de cortes por bloque de madera: 06
- N° de cortes por perfil de diente: 36
- N° total de cortes: 72

Se determinó el coeficiente de correlación entre dureza lateral y densidad básica, empleando los valores obtenidos para cada una de las tablas generadas por las 72 líneas de corte. Luego de comprobar la significación del coeficiente de correlación se estimó la respectiva ecuación de regresión lineal. Aplicando una matriz de correlación múltiple se exploró el grado de asociación de la densidad básica y dureza lateral promedio por bloque de madera con las características estructurales: diámetro de vasos, número de poros por  $\text{mm}^2$ , longitud de vasos,

espesor de pared celular, longitud de fibras, fracción de pared de fibra y porción de pared de fibra, determinadas para cada bloque tableado de capirona.

Mediante la matriz planteada se logró disponer de las correlaciones de mayor significación como referencia para futuras investigaciones, teniendo en cuenta que según Calzada (1982) es aventurado calificar el valor de  $r$  con un pequeño tamaño de muestra ( $n = 12$ ), por lo que no amerita un análisis más profundo.

Se evaluó la influencia del formato de diente y del espesor de viruta en la potencia útil y en la rugosidad superficial de la madera aserrada, correspondiente a dos niveles de altura en el fuste comercial de la especie capirona proveniente de plantaciones, para lo cual se analizaron los datos de potencia útil y de rugosidad superficial con el paquete estadístico R versión 3.2.5, de acuerdo a las siguientes hipótesis:

- Hp 1: Los efectos del perfil de diente en la potencia útil y en la rugosidad superficial no difieren significativamente.
- Hp 2: Los efectos del espesor de viruta en la potencia útil y en la rugosidad superficial no difieren significativamente.
- Hp 3: Los efectos del nivel de altura del fuste comercial en la potencia útil y en la rugosidad superficial no difieren significativamente.
- Hp 4: Los efectos de interacción perfil de diente- nivel de altura del fuste comercial en la potencia útil y en la rugosidad superficial no difieren significativamente.
- Hp 5: Los efectos de interacción perfil de diente-espesor de viruta en la potencia útil y en la rugosidad superficial no difieren significativamente.
- Hp 6: Los efectos de interacción espesor de viruta - nivel de altura del fuste comercial en la potencia útil y en la rugosidad superficial no difieren significativamente.
- Hp 7: Los efectos de interacción perfil de diente-espesor de viruta - nivel de altura del fuste comercial en la potencia útil y en la rugosidad superficial no difieren significativamente.

Una vez verificada la homocedasticidad y la normalidad de los datos mediante las pruebas de Goldfeld-Quandt y Shapiro-Wilk se efectuó el ANOVA para la potencia útil y la rugosidad superficial, con un nivel de confianza del 95%, aplicando un diseño completo al azar en arreglo factorial  $2A \times 2B \times 3C$ , con seis

repeticiones, en el cual se consideró como factor A el perfil de diente, como factor B el nivel de altura del fuste comercial y como factor C el espesor de viruta.

En el caso del parámetro de rugosidad  $R_a$  fue necesaria su transformación a raíz cuadrada para cumplir el supuesto de homocedasticidad. Cuando el ANOVA resultó significativo ( $p$  valor  $< 0,05$ ) se efectuó la prueba de Tukey para la comparación de medias.

También se estableció una matriz de correlación múltiple entre espesor de viruta,  $R_a$ ,  $R_z$ , densidad básica, dureza lateral y potencia útil, considerando dos muestras de 36 datos correspondientes a las variables aludidas, una para el formato tipo lobo y otra para el tipo encía. Para tal efecto se hallaron las correlaciones respectivas dentro de cada formato de diente, planteando las siguientes hipótesis:

- $H_0$ : No existe correlación entre las variables de la matriz planteada ( $r = 0$ )
- $H_1$ : Existe correlación entre las variables de la matriz planteada ( $r \neq 0$ )

Se elaboraron modelos de regresión lineal a partir de las correlaciones más significativas de  $R_a$  y  $R_z$  con espesor de viruta y potencia útil.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* INHERENTES A SU CORTE

En la TABLA 10 se presenta los valores promedio, coeficiente de variación (CV), así como los valores mínimo y máximo para las características de la madera de *Calycophyllum spruceanum*, que ejercen alguna influencia en su proceso de corte independientemente del formato de diente utilizado, verificándose que los bloques de capirona fueron tableados húmedos, con una densidad verde de 0,96 g.cm<sup>-3</sup> a un contenido de humedad de 47,8%. La densidad verde en mención, aunque no alcanza el valor de 1,06 g.cm<sup>-3</sup> obtenido por Meléndez (1999) para la capirona de bosque natural es el primer indicador de su dificultad para el corte, que se complementa con la densidad básica, dureza lateral y grano.

El contenido de humedad aludido supera ligeramente al valor de 46,4% determinado por Meléndez (1999) con un coeficiente de variación de 20%, el cual es previsible en un bosque natural con árboles de diversas edades. Sin embargo, en una plantación de 20 años la variación de la humedad se reduce por el similar requerimiento de agua de los árboles. La influencia de la humedad sobre la potencia de corte se mantiene constante, teniendo en cuenta que según Koch (1964) una vez superado el PSF ningún cambio apreciable puede observarse en la resistencia mecánica de la madera.

TABLA 10 - CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* RELATIVAS A SU PROCESO DE CORTE

Característica	Promedio	CV (%)	Valor Mínimo	Valor Máximo
Contenido de humedad (%)	47,81	7,08	45,89	49,72
Densidad verde (g.cm <sup>-3</sup> )	0,96	3,10	0,94	0,98
Densidad básica (g.cm <sup>-3</sup> )	0,64	2,71	0,63	0,65
Dureza lateral (kg.cm <sup>-2</sup> )	708,52	4,23	691,55	725,50
Contenido de sílice (%)	0,20	61,22	0,13	0,27
Grano	Ligeramente entrecruzado			

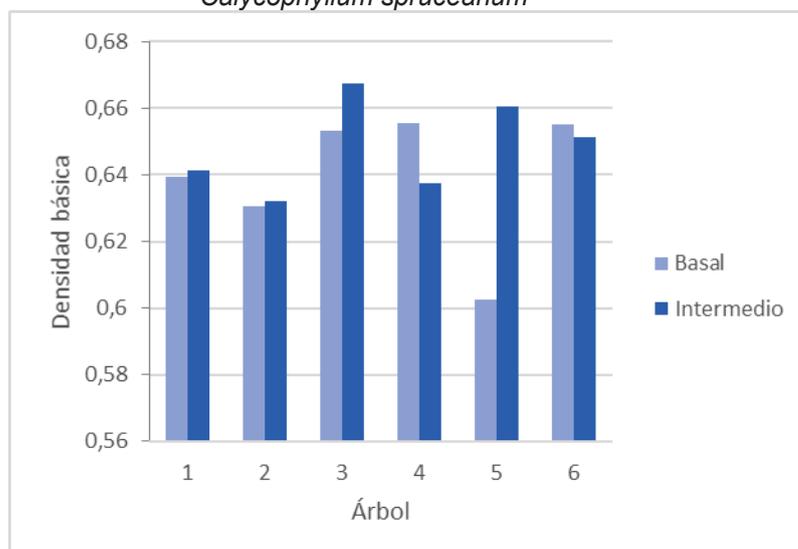
En relación al grano de la capirona ligeramente entrecruzado también es reportado por Acevedo y Kikata (1994) y Chavesta (2005), aunque Sibille (2006b) califica al grano de esta madera como recto. De acuerdo a la consideración del CITE madera (2012) de que las maderas de grano entrecruzado presentan dificultades para el corte, se puede esperar una leve dificultad durante el tableado de los bloques de capirona que repercute de manera similar en el consumo de potencia con cada bloque.

Según la escala utilizada por Tortorelli (2009) que considera un rango de densidad de 0,551 a 0,750 g.cm<sup>-3</sup> y una dureza lateral superior a 600 kg.cm<sup>-2</sup>, la capirona se caracteriza por su madera semipesada y dura, además de su bajo contenido de sílice que destaca claramente sobre las otras características en estudio por su alto coeficiente de variación, influenciado posiblemente por las diferencias en el contenido de sílice entre los bloques basales e intermedios, sobre todo en el árbol 6. En el ANEXO 4 se resumen las características inherentes al corte de cada bloque tableado, cuyos valores individuales ayudan a comprender los coeficientes de variación obtenidos.

La FIGURA 17 permite comprender el bajo coeficiente de variación de la densidad básica mostrada en la TABLA 10, la cual varía levemente de un árbol a otro, mostrando una tendencia promedio de aumento del nivel basal al intermedio que se aprecia mejor en el árbol 5 y se invierte en los árboles 4 y 6. La densidad básica determinada en este estudio es inferior a los valores de 0,76 y 0,895 g.cm<sup>-3</sup> reportados, respectivamente, por Chavesta (2005) y Paula y Costa (2011), la cual puede atribuirse a la menor edad de la madera de la plantación de 20 años en relación a la procedente de un bosque natural.

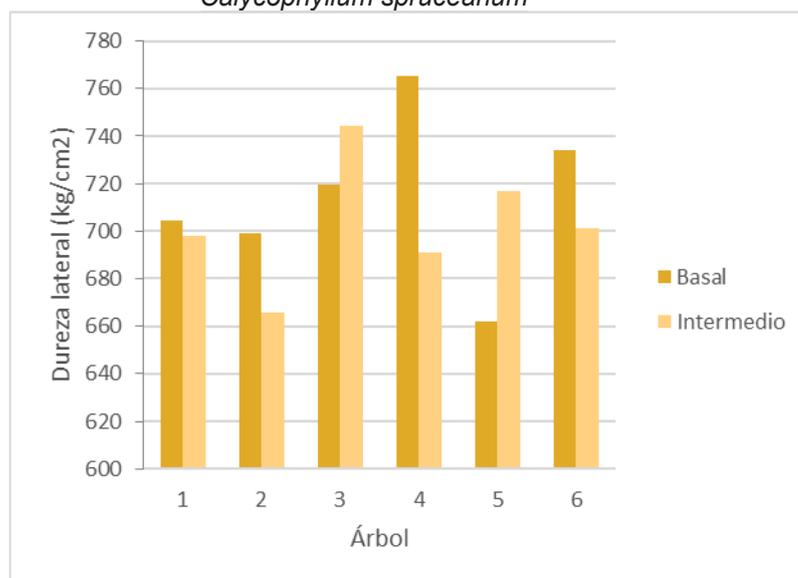
También se puede apreciar que la densidad básica determinada supera a la reportada por Pantigoso (2009) para una plantación de nueve años en una formación de bosque húmedo tropical (San Alejandro), aunque coincide con la obtenida por Díaz, Pecho de la Cruz y Guarda (s.f) para una plantación de ocho años en una formación de bosque muy húmedo premontano sub tropical (Tingo María); lo cual sugiere una aparente disminución de la densidad básica con la edad, posiblemente debido a la madera juvenil formada bajo diferentes calidades de sitio determinadas por las formaciones ecológicas de ambas localidades.

FIGURA 17 - DENSIDAD BASICA POR NIVEL DE ALTURA DEL FUSTE EN SEIS ÁRBOLES DE *Calycophyllum spruceanum*



En la FIGURA 18 se manifiesta la poca variabilidad de la dureza lateral *Janka* de un árbol a otro con una tendencia promedio a disminuir del nivel basal al intermedio, observándose una diferencia más pronunciada en el árbol 4. Sin embargo, en los árboles 3 y 5 la tendencia se invierte, experimentando un comportamiento similar al de la densidad básica.

FIGURA 18 - DUREZA LATERAL POR NIVEL DE ALTURA DEL FUSTE EN SEIS ÁRBOLES DE *Calycophyllum spruceanum*



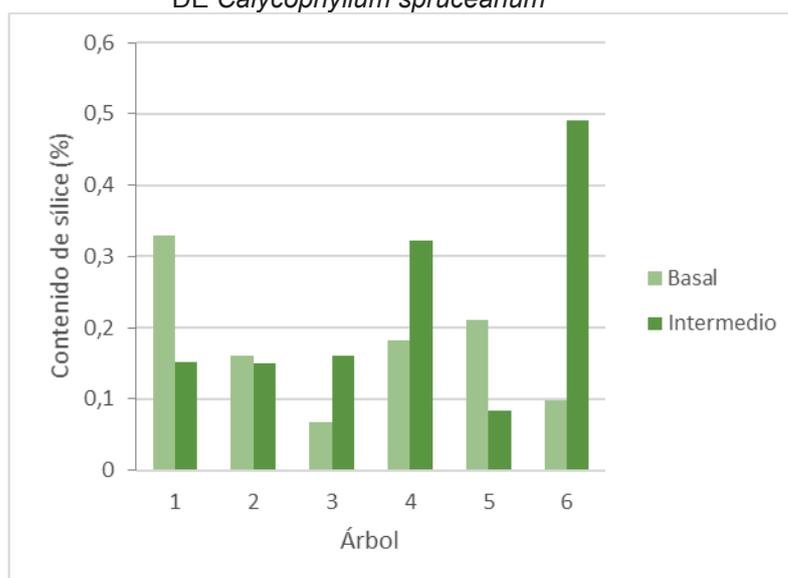
De otro lado la dureza lateral presentada en la TABLA 10 supera en 283  $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  a la reportada por Chavesta (2005) para un bosque natural y en tan solo 27

kg.cm<sup>-2</sup> a la obtenida por Pantigoso (2009) para una plantación de nueve años; aunque debe destacarse que la dureza de 425 kg.cm<sup>-2</sup> no corresponde a un bosque natural maduro ni a su densidad básica, sobre todo respecto a la dureza de 979 kg.cm<sup>-2</sup> reportada por Viscarra y Lara (1992) para un bosque natural en Bolivia.

En la FIGURA 19 se observa que el contenido de sílice varía ampliamente entre árboles y en promedio tiende a incrementar con el nivel de altura del fuste; aunque en los árboles 1, 2 y 5 disminuye del nivel basal al intermedio destacando el árbol 1, tendencia similar a la encontrada por Moreno (1994) para las maderas de *Poulsenia armata* y *Scheweilera ovalifolia*, la cual explica por la diferencia de edad a diferentes niveles del fuste. Evidentemente ambas tendencias descritas repercuten en el coeficiente de variación de 61,22%.

En cuanto al contenido de sílice en los bloques de capirona, aunque es superior al valor reportado por Sibille (2006b); por ser menor a 0,5%, de acuerdo con Molina y Del Castillo (2007) no causa una abrasión significativa en los elementos de corte, por lo tanto, la madera de capirona puede considerarse poco abrasiva incluso con su contenido máximo de 0,27% de sílice. Este bajo contenido de sílice permite tener la certeza de que el desafilado del diente que afecta a la potencia de corte, sólo estuvo en función de la dureza de la madera verde.

FIGURA 19 - CONTENIDO DE SÍLICE POR NIVEL DE ALTURA DEL FUSTE EN SEIS ÁRBOLES DE *Calycophyllum spruceanum*



Además de acuerdo al registro de variables medidas por Meléndez (1999) para el estudio de los parámetros de corte en 12 trozas de capirona se pudo establecer en el ANEXO 5 un metraje de corte de 29,27 a 121,62 m<sup>2</sup> de superficie aserrada antes de un cambio de cinta, que comparado con el metraje efectuado de 16,20 m<sup>2</sup> por cada tipo de diente empleado en el presente estudio, se puede afirmar que la dureza de la capirona no afectó al filo de los dientes hasta el corte 36 en que finaliza el tableado de bloques con cada perfil.

Las diferencias en densidad básica, dureza lateral y contenido de sílice de la capirona son un indicio de que los árboles evaluados no han alcanzado su madurez fisiológica y por ende manifiestan variaciones del cambium modificadas por los cambios relativos al crecimiento. Estas modificaciones en las características de la madera entre árboles coetáneos según Arroyo (1983) se atribuye a las condiciones del sitio y la variabilidad del clima, además de las diferencias hereditarias.

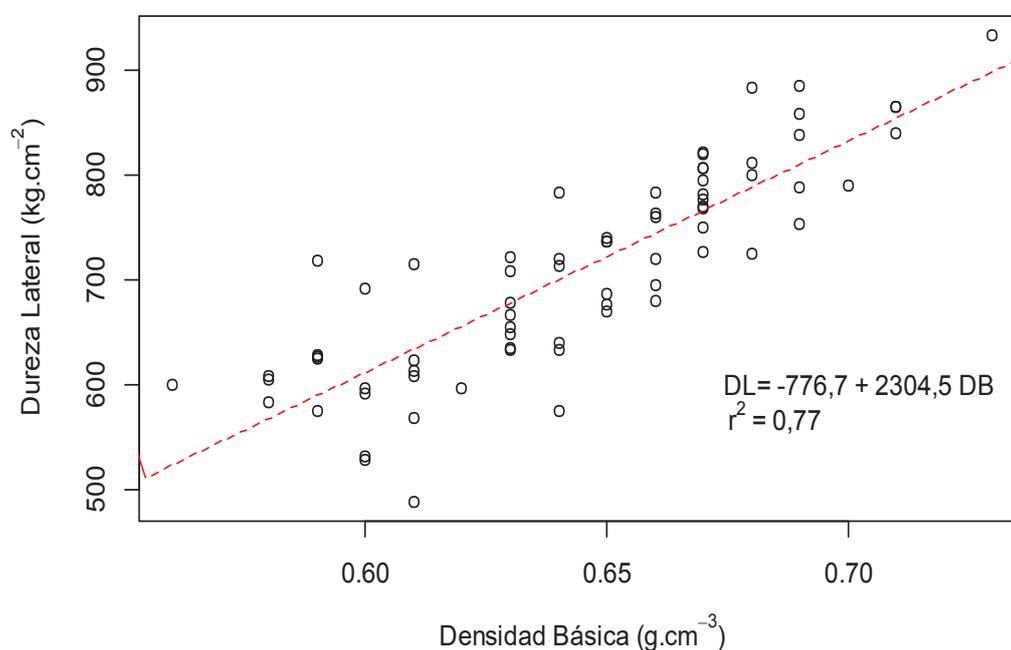
En la TABLA 11 se muestra la variación de la densidad básica en la sección transversal de la madera de capirona, verificándose que en nueve de los 12 bloques se cumple la tendencia del aumento de densidad de la zona medular (corte 3 y 4) a la zona periférica (corte 1 y 6). En los bloques 4B, 5A y 5B la tendencia aludida no se manifiesta claramente dando la impresión de ser inversa. Melo et al., (2015) destacan la presencia de madera débil y más liviana muy próxima a la médula y de una madera más densa y resistente cerca de la corteza, cuando explican la variación de la fuerza específica de corte en la madera de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson.

Analizando el coeficiente de determinación de la regresión lineal ilustrada en la FIGURA 20 se puede corroborar que el grado de correlación de la densidad básica (DB) con la dureza lateral (DL) es muy alto ( $r = 0,88$ ), de acuerdo a la escala de calificación propuesta por Calzada (1982) en el ANEXO 6. Así mismo el análisis de regresión demuestra que la densidad básica se relaciona 77% con la variación de la dureza lateral, el coeficiente angular señala que por cada 0,01 g.cm<sup>-3</sup> de aumento en la densidad básica se registra un aumento aproximado de 23 kg.cm<sup>-2</sup> en la dureza lateral. Además de la densidad básica también influye el plano de corte longitudinal, cuando la dureza lateral tiende a incrementar al cambiar del plano tangencial (cortes 1 y 6) al intermedio (cortes 2 y 5) y del intermedio al radial (cortes 3 y 4), durante el tableado de la capirona.

TABLA 11 - DISTRIBUCION DE LA DENSIDAD BASICA EN LOS CORTES DE TABLEADO PARA 12 MÓDULOS DE *Calycophyllum spruceanum*

PERFIL DE DIENTE	NÚMERO DE BLOQUE	DENSIDAD BASICA (g.cm <sup>-3</sup> ) SEGÚN N° DE CORTE					
		1	2	3	4	5	6
Lobo (dente mareado)	1A	0,70	0,67	0,63	0,58	0,59	0,67
	1B	0,67	0,68	0,59	0,59	0,65	0,68
	3A	0,66	0,60	0,60	0,73	0,68	0,65
	3B	0,67	0,71	0,65	0,60	0,71	0,66
	5A	0,64	0,59	0,66	0,60	0,56	0,58
	5B	0,65	0,62	0,71	0,69	0,63	0,65
Encía (dente reto)	2A	0,67	0,67	0,61	0,58	0,61	0,64
	2B	0,67	0,63	0,61	0,60	0,63	0,66
	4A	0,67	0,63	0,63	0,69	0,64	0,67
	4B	0,63	0,59	0,64	0,63	0,64	0,69
	6A	0,69	0,65	0,61	0,64	0,66	0,69
	6B	0,68	0,66	0,61	0,61	0,67	0,67

FIGURA 20 - VARIACION DE LA DUREZA LATERAL RESPECTO A LA DENSIDAD BASICA DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*



Sales (1990), García et al. (2002), Vignote y Martínez (2006) coinciden en la estrecha relación de la densidad básica con la dureza lateral, que Cristóvão *et al.* (2012) consideran cuando estudian la fuerza de corte principal en las maderas de *Swartzia madagascariensis* y *Pseudolachnostylis maprounaefolia*, utilizando la

densidad de la madera como un indicador importante de rigidez de la madera, resistencia y dureza, por su ventaja de medirla rápidamente y sin grandes gastos.

#### 4.2. ELEMENTOS ESTRUCTURALES MICROSCOPICOS EN LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

La TABLA 12 resume los valores de los parámetros de caracterización de la microestructura anatómica encontrada en los bloques de capirona, observándose una reducida variabilidad en los elementos anatómicos medidos, sobre todo en las fibras, las cuales destacan por su coeficiente de variación ligeramente inferior al de los vasos. Esta aparente uniformidad de dimensiones es inherente a una plantación y conlleva a suponer la homogeneidad del tejido xilemático esperado entre árboles de la misma edad en proceso de crecimiento longitudinal y transversal. En el ANEXO 7 se aprecia la tendencia de incremento en tamaño de los elementos anatómicos, especialmente de las fibras, con el aumento de altura en el árbol hasta 3,20 m, cuando se explora la anatomía cuantitativa de cada bloque tableado.

De acuerdo a los criterios cuantitativos para elementos anatómicos empleados por Sibille (2006a), por las dimensiones de sus elementos leñosos la capirona de una plantación de 20 años se califica como una madera de poros pequeños, moderadamente numerosos, de elementos vasculares medianos, de pared de fibra delgada y fibras largas; aunque esta autora (2006b) considera que la capirona de bosque natural se diferencia por sus fibras muy largas de pared gruesa. Respecto al diámetro de vasos y número de poros por  $\text{mm}^2$  superan a los valores de bosque natural de  $58 \mu\text{m}$  y 24 poros obtenidos por Chavesta (2005), lo cual explica la menor cantidad de leño en la madera de plantación debido al requerimiento de estos árboles de un tejido conductor más desarrollado para el transporte de agua y sales minerales durante su crecimiento. Así mismo la longitud de vasos no alcanza el rango de  $615$  a  $1.190 \mu\text{m}$  reportado por Sibille (2006b).

El menor tamaño de las fibras intermedias entre la zona periférica y medular en los árboles de capirona de 20 años, comparado con las fibras de  $6 \mu\text{m}$  de pared celular y  $2.150 \mu\text{m}$  de longitud en la capirona de bosque natural (SIBILLE, 2006b), puede considerarse una evidencia de la presencia de fibras tiernas generadas por un cambium juvenil propio de árboles en proceso de crecimiento que han priorizado

el desarrollo de sus elementos vasculares para la conducción de minerales en solución y savia en el tronco.

En relación a la fracción y porción de pared de fibra, la TABLA 12 permite verificar que alrededor del 50% de la fibra es pared celular, la cual se distribuye en aproximadamente 43% de la madera, porcentajes menores a los obtenidos por Melo et al. (2015) para una madera de 7 años de edad con una densidad ligeramente más baja.

TABLA 12 - PARAMETROS ANATOMICOS DETERMINADOS EN LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

Parámetro	Promedio	CV (%)	Valor Mínimo	Valor Máximo
Diámetro de vasos ( $\mu\text{m}$ )	68,63	9,48	64,94	72,31
Número de poros/ $\text{mm}^2$	35,94	9,97	33,92	37,97
Longitud de vasos ( $\mu\text{m}$ )	543,58	9,90	513,13	574,03
Diámetro de lumen de fibras ( $\mu\text{m}$ )	8,82	6,43	8,50	9,14
Espesor de pared celular ( $\mu\text{m}$ )	4,29	7,45	4,11	4,47
Longitud de fibras ( $\mu\text{m}$ )	1730,16	5,39	1677,36	1782,97
Fracción de pared de fibra (%)	49,30	5,32	47,81	50,78
Porción de pared de fibra (%)	42,75	5,98	41,30	44,19

CV = Coeficiente de variación

La TABLA 13 muestra la correlación de la mayoría de parámetros anatómicos con la densidad básica y la dureza lateral, en la cual el número de poros por  $\text{mm}^2$  alcanza a explicar alrededor del 37% de la variación de la densidad básica y de la dureza lateral en una relación directamente proporcional, que concuerda con el aumento en la cantidad de pared celular cuando disminuyen los espacios vacíos por el mayor número de poros en la sección transversal, constituyendo una madera más compacta.

Además del aporte del número de poros es evidente la variación de la densidad básica y dureza lateral obtenida con los parámetros restantes, especialmente con el espesor de pared celular asociado al diámetro de vasos o a la longitud de fibras. En ese sentido la fracción y porción de pared de fibra pueden aportar una explicación de la influencia de los parámetros relacionados con la estructura de la madera que se manifiesta en su densidad básica y dureza lateral, según el grado de masificación de las fibras.

TABLA 13 - MATRIZ DE CORRELACION MULTIPLE ENTRE DUREZA LATERAL, DENSIDAD BASICA Y PARAMETROS ANATOMICOS DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

Característica	Diámetro de Vasos (µm)	Número de Poros/mm <sup>2</sup>	Longitud de Vasos (µm)	Longitud de Fibras (µm)	Espesor de pared celular (µm)	Fracción de Pared de Fibra (%)	Porción de Pared de Fibra (%)	Densidad Básica (g.cm <sup>-3</sup> )	Dureza Lateral (kg.cm <sup>-2</sup> )
Diámetro de Vasos (µm)	1,00								
Número de Poros/mm <sup>2</sup>	-0,45 n.s	1,00							
Longitud de Vasos (µm)	0,63*	0,11 n.s	1,00						
Longitud de Fibras (µm)	0,41 n.s	-0,07 n.s	0,67*	1,00					
Espesor de pared celular (µm)	0,40 n.s	-0,13 n.s	0,58*	0,74**	1,00				
Fracción de Pared de Fibra (%)	0,13 n.s	-0,31 n.s	0,24 n.s	0,49 n.s	0,78**	1,00			
Porción de Pared de Fibra (%)	-0,24 n.s	-0,30 n.s	-0,10 n.s	0,28 n.s	0,55*	0,91***	1,00		
Densidad Básica (g.cm <sup>-3</sup> )	0,01 n.s	0,62*	0,24 n.s	0,05 n.s	0,11 n.s	-0,13 n.s	-0,25 n.s	1,00	
Dureza Lateral (kg.cm <sup>-2</sup> )	-0,18 n.s	0,61*	0,03 n.s	-0,14 n.s	-0,33 n.s	-0,44 n.s	-0,44 n.s	0,85***	1,00

Significación: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 n.s. No significativo

Aunque la TABLA 13 muestra poco aporte de la longitud de fibras a la dureza lateral en forma inversa, debido a la presencia de fibras pequeñas de paredes delgadas y poca longitud se puede esperar una reducción del lumen además de un mayor contenido de fibras entrelazadas entre sus extremos, generando en la madera una aglomeración de la pared celular en tramos más cortos, con el consiguiente incremento de su dureza lateral y resistencia al corte.

En relación a la estructura anatómica de la madera que determina su densidad y explica la tendencia encontrada, Sales (1990) admite su influencia en los comportamientos mecánicos en flexión, compresión, corte, y reconoce el carácter limitante de la densidad de la especie para correlacionar con la fuerza de corte.

Cuando en la TABLA 14 se explora simultáneamente los parámetros de la fibra buscando su correspondencia con la densidad básica y dureza lateral en cada bloque de capirona, se puede visualizar que ambas características son más afectadas por la fracción y porción de pared de fibra, y en menor grado por el espesor de pared, exceptuando el bloque 4A. Esta situación permite afirmar que la fracción y porción de pared de fibra son cuantificadores de microestructura bastante simples, pero de gran utilidad para explicar la densidad y dureza de la madera.

TABLA 14 - PARAMETROS ANATOMICOS DE *Calycophyllum spruceanum* INHERENTES A SU DENSIDAD Y DUREZA LATERAL

MÓDULO N°	ESPEJOR DE PARED CELULAR (µm)	FRACCION DE PARED DE FIBRA (%)	PORCION DE PARED DE FIBRA (%)	DENSIDAD BASICA	DUREZA LATERAL (Kg.cm <sup>-2</sup> )
1A	4,16	47,68	41,58	0,64	704,31
1B	4,57	49,71	42,25	0,64	698,03
2A	4,37	50,09	42,87	0,63	699,16
2B	4,63	50,24	42,28	0,63	665,79
3A	3,96	46,66	41,78	0,65	719,51
3B	4,55	50,23	43,55	0,67	744,26
4A	3,67	43,66	37,83	0,66	765,52
4B	4,35	52,34	45,80	0,64	691,22
5A	3,98	49,88	45,39	0,60	662,23
5B	4,76	53,65	47,32	0,66	716,79
6A	4,13	49,87	42,12	0,66	734,04
6B	4,33	47,56	40,17	0,65	701,43
PROMEDIO	4,29	49,30	42,75	0,64	708,52

También cabe destacar en la TABLA 14 que en los cinco primeros bloques de capirona el espesor de pared conjuntamente con la fracción y porción de pared de fibra tiende a incrementar en el fuste comercial del nivel basal al intermedio, debido al aumento progresivo en el tamaño de sus fibras y demás elementos anatómicos, sobre todo para desarrollar suficiente resistencia de acuerdo a su crecimiento en altura. En relación al bloque 4A, las características asociadas a la pared más delgada y dureza más alta constituyen una muestra de la distorsión en la correlación obtenida entre el espesor de pared y las propiedades aludidas. En menor medida algo similar se manifiesta en el bloque 2B caracterizado por una pared celular gruesa y dureza relativamente baja.

#### 4.3. CONDICIONES DE CORTE PARA LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

La TABLA 15 muestra el promedio con su coeficiente de variación (CV), así como los valores mínimo y máximo para los parámetros de corte evaluados durante el tableado de los bloques de *C. spruceanum* con una altura de corte de 15 cm, utilizando los formatos de diente lobo y encía con tres niveles de velocidad de avance (baja, media y alta) que generaron tres niveles de espesor de viruta (delgado, mediano y grueso).

En la TABLA 15 se destaca la velocidad de corte por su mayor variabilidad, mostrando una fluctuación de 14,9 a 16,6 m.s<sup>-1</sup> con un promedio de 15,7 m.s<sup>-1</sup> equivalente al 45% de la velocidad propuesta por Garcia *et al.* (2002) para maderas duras. Así mismo la menor variabilidad corresponde a la velocidad de avance alta que determinó el espesor de viruta clasificado como grueso con un rango de variación de 0,88 a 0,90 mm. La diferencia de densidad y dureza lateral de cada bloque entre la médula y corteza, asociada a su estructura anatómica explica en parte la poca variación en la velocidad de avance, cuando esta reduce el tiempo de contacto del bloque con la sierra para generar un mayor espesor de viruta.

La fluctuación en la velocidad de corte puede considerarse despreciable de acuerdo con lo sostenido por Dalois (1990) y Sales (1990) que el esfuerzo de corte varía poco en el rango de velocidad de corte comprendida entre 5 y 50 m.s<sup>-1</sup> para

espesores de viruta de 0,5 a 1,5 mm. También se aprecia que el rango de 10 a 30 m.min<sup>-1</sup> recomendado para maderas duras por Dalois (1990) y García *et al.* (2002) incluye las velocidades de avance utilizadas, excepto la velocidad baja que escapa ligeramente del rango.

Aunque el espesor de viruta no fue medido directamente, su determinación siguiendo la práctica de los investigadores consultados en la literatura, de variar la velocidad de avance manteniendo constante el paso y la velocidad de corte, permitió clasificar al espesor promedio de viruta de acuerdo a las velocidades de avance promedio de 8,8, 16,1 y 22,3 m.min<sup>-1</sup> en tres categorías respectivamente: delgado (0,35 mm), mediano (0,65 mm) y grueso (0,90 mm), situándose entre los valores óptimos de 0,3 a 1,5 mm propuestos por Garcia *et al.* (2002) para maderas duras.

TABLA 15 - PARAMETROS DE CORTE PARA LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

Parámetro	Promedio	CV (%)	Valor Mínimo	Valor Máximo
Velocidad de corte (m.s <sup>-1</sup> )	15,74	13,14	14,91	16,56
Velocidad de avance (m.min <sup>-1</sup> )				
• Baja	8,76	10,09	8,41	9,11
• Media	16,09	6,17	15,69	16,49
• Alta	22,32	3,78	21,99	22,66
Espesor de viruta (mm)				
• Delgado	0,35	10,09	0,34	0,37
• Mediano	0,65	6,17	0,63	0,66
• Grueso	0,90	3,78	0,88	0,91
Ancho de corte (mm)				
• Perfil lobo	2,91	5,85	2,83	2,99
• Perfil encía	2,70	5,66	2,62	2,77

De acuerdo a la zona de buen corte para maderas tropicales definida por Sales (1990) el espesor delgado no alcanza al límite inferior de 0,5 mm que Dalois (1990) prefiere para el aserrado de maderas duras por el menor desgaste de los dientes. Sin embargo, este espesor supera en 0,07 mm al valor estimado por Meléndez (1999) en el aserrío de la Capirona con sierra cinta, así como en 0,02 mm al valor obtenido por Carmo *et al.* (2014) en el aserrío de una madera de alta densidad como *Dipteryx odorata*. De otro lado, los espesores de viruta mediano y grueso están fuera del rango de 0,15 a 0,6 mm fijado por Vignote y Martínez (2006) para una mejor economía energética.

Respecto al ancho de corte el perfil lobo genera una ranura que supera en 8% a la del perfil encía, utilizando un ancho del recalcado mayor en 3% al del diente encía, conforme se aprecia en la TABLA 7. De acuerdo a los grupos energéticos del ANEXO 1 propuestos por Ninín (1986), los parámetros de corte obtenidos se aproximan mejor a las condiciones de trabajo del grupo energético V que del grupo IV con la cinta 1\*\*, aunque la madera estudiada pertenece por su dureza a este último grupo.

#### 4.4. GEOMETRIA DE LOS FORMATOS DE DIENTE PARA EL CORTE DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

En la TABLA 16 se compara los valores referenciales de la literatura revisada para las maderas duras con los valores de las características geométricas mostradas en la TABLA 7 para cintas sinfín de 1,1 mm de espesor, estableciendo una escala de calificación con tres niveles de idoneidad para los formatos de diente utilizados en el tableado de capirona.

TABLA 16 - EVALUACION DE LA GEOMETRIA DE LOS FORMATOS DE DIENTE EMPLEADOS PARA EL CORTE DE *Calycophyllum spruceanum*

CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICA	FUENTE CONSULTADA	VALOR SUGERIDO	FORMATO DE DIENTE	
			LOBO	ENCIA
Paso del diente (mm)	Uddeholm (1993)	35 - 40	38,0 (AD)	38,0 (AD)
Altura del diente (mm)	Tuset et al. (2007)	10,8	11,5 (PA)	11 (AD)
Seno de la garganta (mm <sup>2</sup> )	Meléndez (2003)	293	278,3 (IN)	272,4 (IN)
Ancho del recalcado (mm)	Meléndez (2003)	2,75	2,71 (PA)	2,63 (IN)
Traba grupal (mm)	Sandvik (1999)	0,3 - 0,5	0,81 (IN)	0,77 (IN)
Angulo de salida de virutas (grados)	Sandvik (1999)	15 - 25	26 (IN)	21 (AD)
Angulo de la punta del diente (grados)	Uddeholm (1993)	50	44 (IN)	47 (PA)
Angulo de incidencia (grados)	Tuset et al. (2007)	8 - 10	20 (IN)	22 (IN)
Angulo de rectificación frontal (grados)	JUNAC (1989)	6 - 7	11 (IN)	10 (IN)

Calificación: (AD) = adecuado (PA) = parcialmente adecuado (IN) = inadecuado

Cuando la madera estudiada se ubica en el grupo energético IV de acuerdo a su dureza (NININ, 1986), se puede verificar que los formatos de diente estudiados no corresponden a la geometría especificada para la cinta 1 en el ANEXO 1, debido a que la cinta aludida se emplea en máquinas de mayor diámetro de volante al utilizado, diseñadas con un sistema de alimentación que no permitía regular la velocidad de avance según los requerimientos del presente estudio para alturas de corte menores a 30 cm.

En términos generales la TABLA 16 permite detectar rápidamente la calidad geométrica de los formatos de diente más apropiadas para el corte de *C. spruceanum* según los autores consultados, observándose que la altura del diente y el ángulo de salida del diente tipo encía se aproxima más que el tipo lobo a las características idóneas para el aserrío de acuerdo a la dureza de la madera en estudio, con excepción del ancho del recalcado que se considera reducido, mientras que en el diente de lobo es inferior en 0,04 mm al ancho del diente utilizado por Meléndez (2003) en el aserrío de la misma especie, pero con una sierra cinta de 1,47 mm de espesor.

Respecto a la traba (proyección del recalcado) a cada lado de la cinta que varía de 0,77 a 0,81 mm para los perfiles encía y lobo, respectivamente, puede verificarse que, aunque duplica los límites establecidos para este tipo de madera (JUNAC, 1989; SANDVIK, 1999; TUSET et al., 2007) no logra un ancho de recalcado aceptable, posiblemente debido al menor espesor de las cintas empleadas en el presente estudio.

Adicionalmente, la TABLA 7 permite diferenciar el formato tipo lobo del tipo encía por su menor radio de garganta y traba ligeramente asimétrica a la izquierda, la cual puede interferir en el esfuerzo de corte magnificando el ancho de corte, ante la menor frecuencia de dientes simétricos en la cinta. Los ANEXOS 2 y 3 permiten establecer la presencia del 20 al 30% de dientes simétricos en las cintas troqueladas con los perfiles tipo encía y lobo, respectivamente, que se utilizaron en el tableado de la capirona.

Cabe mencionar que ambos formatos de diente además de su elevado ángulo de rectificación y seno reducido, por la forma inherente al perfil lobo o encía se caracterizan por un exagerado ángulo de incidencia. Así mismo, el mayor radio de la garganta en el perfil encía es consecuencia de su menor ángulo de salida y planicidad

en el fondo de la garganta. En los perfiles evaluados el seno de la garganta se reduce ligeramente debido a la disminución en la altura del diente entre 1,5 y 2,0 mm respecto al perfil evaluado por Meléndez (2003).

#### 4.5. VARIACION DE LA POTENCIA DE CORTE Y DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

##### 4.5.1. Efecto de las variables estudiadas sobre la potencia útil de corte

La TABLA 17 resume el análisis de variancia de la potencia útil consumida en el corte de la madera de *C. spruceanum*, cuando se trabaja con dos perfiles de diente y tres espesores de viruta, observándose que el perfil de diente y el espesor de viruta influyen significativamente en la potencia útil de corte al nivel de 0,1% de probabilidad; así como también se revela una interacción entre perfil de diente y espesor de viruta que se visualiza mejor en la FIGURA 21.

TABLA 17 - ANALISIS DE VARIANCIA DE LA POTENCIA ÚTIL DE CORTE PARA LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA

Fuente de variación	F	p-valor
Factor A: perfil de diente	20,9853	2,39x10 <sup>-5***</sup>
Factor B: nivel de altura del fuste comercial	9,9097	0,0025**
Factor C: espesor de viruta	262,8019	2,2x10 <sup>-16***</sup>
Interacción: A x B	0,0004	0,9851 <sup>n.s.</sup>
Interacción: B x C	1,1939	0,3101 <sup>n.s.</sup>
Interacción: A x C	10,2640	0,0001***
Interacción: A x B x C	0,4021	0,6707 <sup>n.s.</sup>

<sup>n.s.</sup> No significativo al nivel de 5,0% de probabilidad ( $p > 0,05$ )

\*\* significativo al nivel de 1% de probabilidad ( $0,001 \leq p < 0,01$ )

\*\*\* significativo al nivel de 0,1% de probabilidad ( $0 \leq p < 0,001$ )

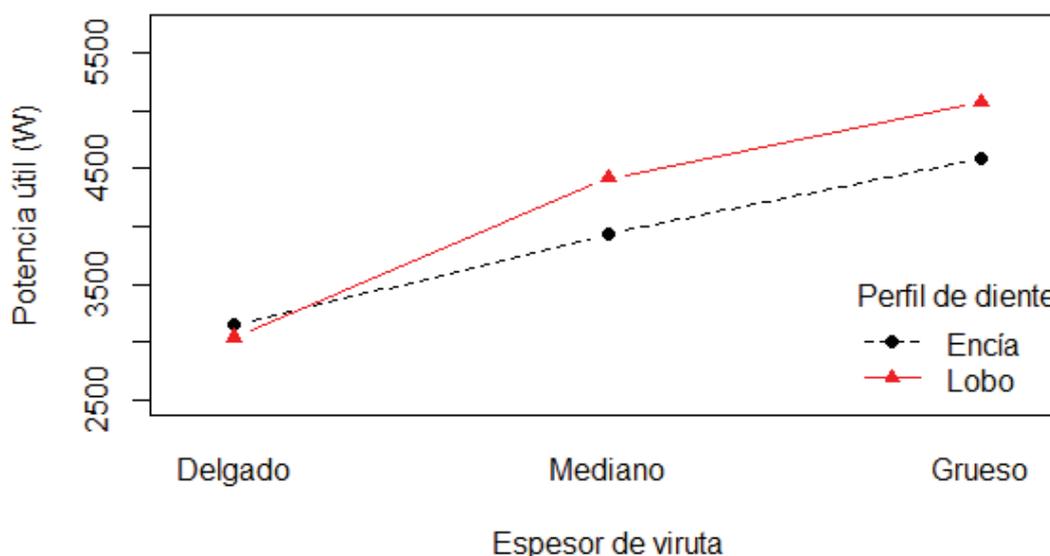
Aunque en la TABLA 17 se presenta la influencia significativa del nivel de altura del fuste comercial sobre la potencia de corte a un menor nivel de probabilidad, este factor no interactúa con el perfil de diente ni con el espesor de viruta, por lo que tampoco revela una interacción con ambos factores. El efecto del

nivel de altura del fuste a manera de bloque no es suficiente para interactuar con el perfil de diente y el espesor de viruta en la potencia de corte.

En la FIGURA 21 el cambio de tendencia en los promedios de potencia útil al pasar de espesor delgado a mediano manifiesta el efecto de interacción entre perfil de diente y espesor de viruta, debido a su incremento promedio en diferente proporción para cada perfil evaluado. Este efecto que es conspicuo en el corte de virutas delgadas y muy evidente en los espesores mayores, permite confirmar la influencia del espesor de viruta en la potencia útil de corte según el perfil de diente diferenciado por su radio de garganta y ángulo de salida de virutas.

La tendencia mostrada en la FIGURA 21 constata el efecto del espesor de viruta y la geometría del diente estudiado por diversos especialistas para explicar la formación de viruta y los esfuerzos resultantes de la interacción maderaherramienta (CHARDIN, 1958; ANTOINE, 1960; KOCH, 1964; SALES, 1990).

FIGURA 21 - INTERACCION DEL PERFIL DE DIENTE CON EL ESPESOR DE VIRUTA PARA LA POTENCIA ÚTIL DE CORTE EN LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*



La TABLA 18 presenta la comparación de los promedios de potencia útil de corte con su coeficiente de variación, correspondientes a los perfiles de diente y espesores de viruta evaluados. Esta tabla muestra que la potencia útil de corte para el espesor de viruta delgado no difirió significativamente con el perfil de diente ni con el nivel de altura del fuste comercial, denotando que los valores de potencia obtenidos con los formatos diente de lobo y encía en los niveles basal e intermedio

fueron similares. En cambio, para los espesores de viruta mediano y grueso la potencia de corte registra una diferencia más pronunciada con el perfil de diente que con el nivel de altura del fuste comercial.

El comportamiento encontrado para el aumento de la potencia útil a partir de un cierto espesor de viruta removido con una geometría de diente, se puede explicar mejor con las experiencias de Chardin (1958) y Antoine (1960) cuando prueban que el efecto favorable de los ángulos de salida más elevados, se manifiesta progresivamente en la potencia de corte conforme aumenta el espesor de viruta. Sales (1990) atribuye este efecto a la acción mecánica de las paredes laterales de la ranura de corte que se transmite más a la viruta completa cuando aumenta su espesor y el aumento en la fricción lateral inducida por la compresión del aserrín en la garganta del diente debido a su saturación.

TABLA 18 - VALORES MEDIOS DE POTENCIA ÚTIL DE CORTE PARA LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA

Perfil de diente	Fuste comercial	Potencia útil de corte (W) por espesor de viruta			Promedio general
		Delgado	Mediano	Grueso	
Lobo	Basal	3135,88 f (11,45)	4491,27 c (7,26)	5198,38 a (6,64)	4275,18 (21,94)
	Intermedio	2942,97 f (5,61)	4342,82 cd (6,56)	4947,22 ab (6,05)	4077,67 (21,99)
Promedio general		3039,43 (9,37)	4417,05 (6,84)	5072,82 (6,60)	4176,42 (21,79)
Encía	Basal	3214,62 f (11,45)	3958,15 de (6,97)	4792,10 bc (2,89)	3988,29 (17,86)
	Intermedio	3092,07 f (0,90)	3901,72 e (4,40)	4385,57 c (3,74)	3793,12 (14,87)
Promedio general		3153,34 (8,15)	3929,93 (5,63)	4588,83 (5,60)	3890,71 (16,48)

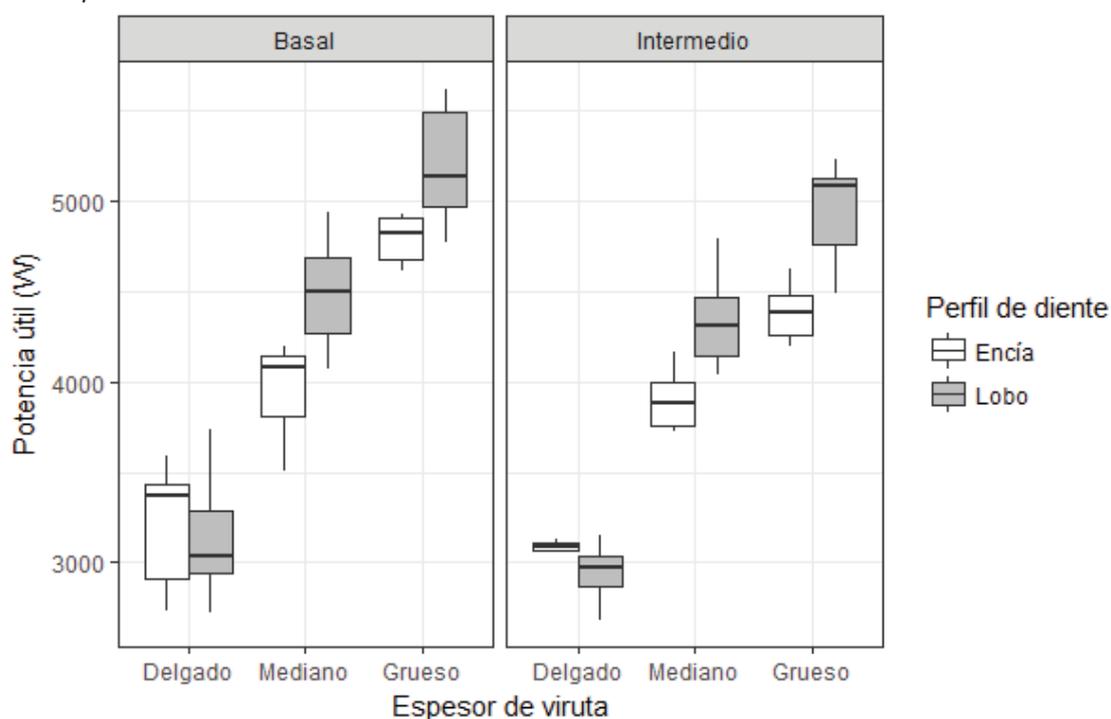
Donde: Promedios seguidos por la misma letra minúscula no difieren estadísticamente entre sí por la prueba de Tukey al 5% de probabilidad. \*Valores entre paréntesis son los coeficientes de variación (%) de los promedios.

Analizando la FIGURA 22, se verifica respecto al perfil de diente encía que el empleo del diente de lobo, independientemente de su ancho de recalcado, genera un aumento apreciable en la potencia útil durante el tableado de la especie *C. spruceanum*, cuando se cortan espesores de viruta medianos y gruesos; mientras que con virutas delgadas la potencia decrece muy poco. En la misma figura también destaca la tendencia de la potencia útil a disminuir del nivel basal al intermedio, independientemente del espesor de viruta y del formato de diente

empleado, causada posiblemente por el predominio de elementos anatómicos más pequeños que determinan la mayor dureza de la madera en el nivel basal.

El incremento de la potencia útil por el cambio de formato de diente tipo encía a lobo, corresponde a una variación especial de la potencia de corte, teniendo en cuenta que el efecto favorable de su ángulo de salida de  $26^\circ$  en la potencia útil se disipa en el corte de una madera dura con dientes recalcados asimétricamente en un 70%, conforme se deduce del ANEXO 2.

FIGURA 22 - POTENCIA ÚTIL PROMEDIO PARA EL CORTE DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPEORES DE VIRUTA



Se puede admitir que el mecanismo de fragmentación de la viruta en el diente de lobo se manifiesta energéticamente, al disiparse el efecto favorable del ángulo de salida para su incisión, poniendo en evidencia la acción de la curvatura reducida por su menor radio de garganta para frenar el deslizamiento de la viruta de la cara de corte hacia el fondo de la garganta, forzando su deterioro por flexión y rápido seccionamiento en partículas de aserrín. En el diente encía la planicidad de su garganta induce al mayor deslizamiento de la viruta, favoreciendo su aplastamiento sucesivo antes de su lenta fragmentación. El comportamiento antes descrito se sustenta en la explicación de Sales (1990) de que la curvatura de la

garganta del diente, más o menos pronunciada, induce al fraccionamiento de la viruta en pequeñas partículas de aserrín.

En términos de ahorro energético, la ventaja del diente encía durante el corte se esclarece en la TABLA 19 cuando la potencia útil se reduce a un diente para remover un volumen de viruta, abstrayendo el efecto de la diferente longitud de filo en ambos perfiles y la variabilidad del espesor en las virutas clasificadas, además de la heterogeneidad y anisotropía de la madera.

La TABLA 19 evidencia la gran ventaja del diente encía sobre el diente lobo con la viruta delgada y gruesa cuando la potencia de corte se calcula en función de la productividad de la sierra expresada en m<sup>2</sup> de superficie de madera aserrada por minuto. Esta ventaja, en términos de energía específica de corte se restringe a la viruta gruesa con un ahorro energético de 3,8 %, que en el caso de la viruta mediana y delgada decrece hasta niveles de desperdicio de 0,7 a 3,0 %. Se corrobora que el diente encía con las virutas gruesas economiza una potencia de 0,059 kW.m<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup> de superficie aserrada que en una hora de trabajo efectivo representa un ahorro de 3,54 kW.m<sup>-2</sup>.

TABLA 19 - ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE PARA TRES CATEGORIAS DE ESPESOR DE VIRUTA Y DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

CATEGORIA DE ESPESOR DE VIRUTA	POTENCIA ÚTIL POR SUPERFICIE DE CORTE (kW.m <sup>-2</sup> .min <sup>-1</sup> )		VENTAJA DEL DIENTE ENCÍA (%)	TASA DE VIRUTA REMOVIDA POR DIENTE (mm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )		ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE (W.mm <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> )		VENTAJA DEL DIENTE ENCÍA (%)
	Diente Lobo	Diente Encía		Diente Lobo	Diente Encía	Diente Lobo	Diente Encía	
	Delgado	2,647		2,413	8,8	15481	15597	
Mediano	0,995	1,011	-1,6	30380	26836	0,0368	0,0371	-0,7
Grueso	0,632	0,573	9,4	40869	38428	0,0314	0,0303	3,8

Revisando la generación de aserrín por las líneas de corte de 0,001215 m<sup>3</sup> y 0,001310 m<sup>3</sup> efectuadas en el presente estudio con los perfiles de diente encía y lobo, respectivamente, se establece respecto al diente lobo que la remoción de un m<sup>3</sup> de aserrín con el diente encía ocasiona un ahorro de potencia de 89 kW en el caso de virutas gruesas, así como un desperdicio de 260 kW con las virutas delgadas. Este desperdicio no puede justificarse técnica ni económicamente con la ventaja del diente encía sobre el tipo lobo de 8,8% en la potencia consumida por m<sup>2</sup> de superficie aserrada, porque implicaría un desgaste prematuro del filo que obliga a cambios de cinta más seguidos y por ende un mayor consumo de cinta.

#### 4.5.2. Efecto de las variables estudiadas sobre la rugosidad superficial

La TABLA 20 presenta el análisis de variancia de los parámetros de rugosidad Ra y Rz, para la madera de *C. spruceanum*, cuando se trabaja con dos perfiles de diente y tres espesores de viruta. En esta tabla se observa la influencia altamente significativa del espesor de viruta en el parámetro Ra comparada con la influencia significativa de los factores perfil de diente y nivel de altura del fuste comercial, sin interacción alguna entre ellos, la cual se aprecia mejor en la FIGURA 23 revisando para cada perfil de diente la línea de promedios de Ra casi paralela hasta el espesor de viruta mediano, a partir del cual se vuelve divergente.

Así mismo la brecha observada para el espesor de viruta grueso puede explicarse comparando los volúmenes de la garganta de los perfiles lobo (278,30 mm<sup>2</sup> x 1,1 mm) y encía (272,40 mm<sup>2</sup> x 1,1 mm) con los volúmenes de viruta generada en cada velocidad de avance. De este modo se nota que el perfil lobo en las tres velocidades acarrea más viruta que el tipo encía, siendo muy crítica cuando la velocidad alta sobresatura de virutas gruesas la capacidad de su garganta en 120%; lo cual provoca una mayor interferencia del aserrín en la formación de la viruta que con el perfil encía, generando una mayor rugosidad Ra.

En cambio, el diente encía con su garganta sobresaturada de virutas gruesas en 119% disminuye la rugosidad Ra por una interferencia similar. En el caso de las virutas medianas y delgadas la rugosidad Ra es ligeramente menor en comparación con el diente de lobo y corresponde a la utilización de casi 86 y 46% de la capacidad de su garganta, respectivamente. Con el perfil lobo la rugosidad Ra para las virutas medianas y delgadas sigue superando a la del perfil encía, por el hecho que su garganta utiliza más del 86 y 46% de la capacidad, respectivamente.

Tampoco se verifica una interacción del nivel de altura del fuste comercial con el perfil de diente o con el espesor de viruta, ni entre estos dos últimos factores; permitiendo asumir que Ra es un parámetro poco sensible al cambio de algún factor, debido a que en su determinación se excluye a la profundidad de los valles localizados en la longitud de muestreo de la superficie mecanizada.

TABLA 20 - ANALISIS DE VARIANCIA DE LOS PARAMETROS Ra Y Rz PARA LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPEORES DE VIRUTA

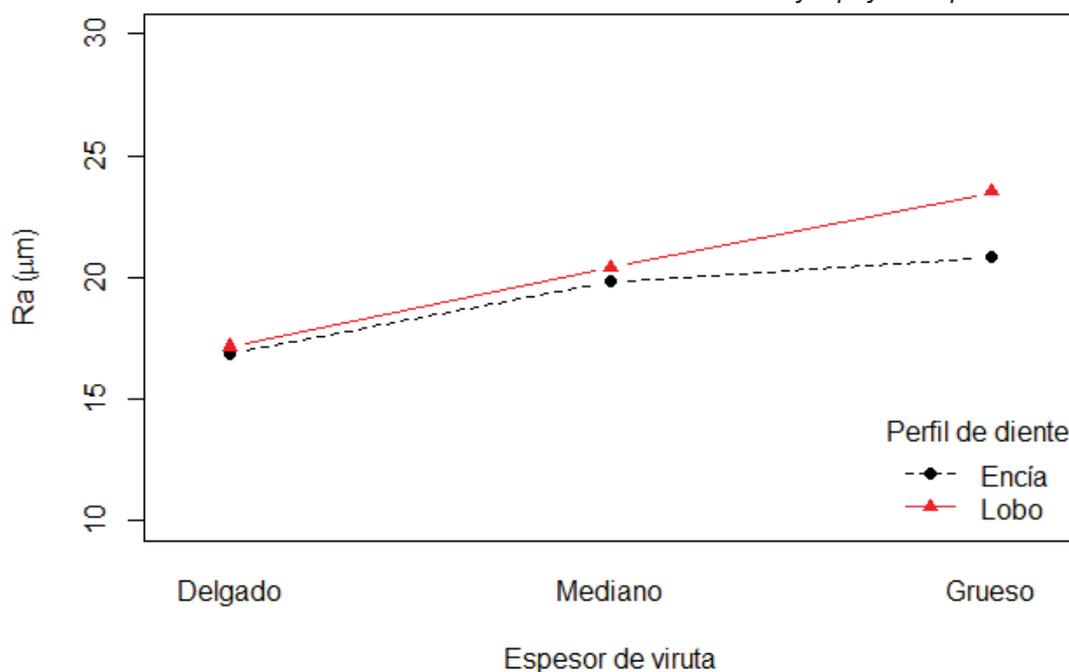
Parámetro	Fuente de variación	F	p-valor
Ra	Factor A: perfil de diente	5,2885	0,02496 *
	Factor B: nivel de altura del fuste comercial	6,4708	0,01356 *
	Factor C: espesor de viruta	35,4947	6,721x10 <sup>-11</sup> ***
	Interacción: A x B	0,5009	0,48183 <sup>n.s.</sup>
	Interacción: B x C	0,7984	0,45475 <sup>n.s.</sup>
	Interacción: A x C	2,0093	0,14301 <sup>n.s.</sup>
	Interacción: A x B x C	0,0682	0,93410 <sup>n.s.</sup>
Rz	Factor A: perfil de diente	1,4809	0,22840 <sup>n.s.</sup>
	Factor B: nivel de altura del fuste comercial	5,3156	0,02461 *
	Factor C: espesor de viruta	31,1744	5,207e <sup>-10</sup> ***
	Interacción: A x B	0,1823	0,67090 <sup>n.s.</sup>
	Interacción: B x C	0,6966	0,50227 <sup>n.s.</sup>
	Interacción: A x C	3,0123	0,05667 <sup>n.s.</sup>
	Interacción: A x B x C	0,1101	0,89588 <sup>n.s.</sup>

<sup>n.s.</sup> No significativo al nivel de 5,0% de probabilidad ( $p > 0,05$ )

\* significativo al nivel de 5% de probabilidad ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

\*\*\* significativo al nivel de 0,1% de probabilidad ( $0 \leq p < 0,001$ )

FIGURA 23 - INTERACCION DEL PERFIL DE DIENTE CON EL ESPESOR DE VIRUTA PARA EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Ra EN LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*

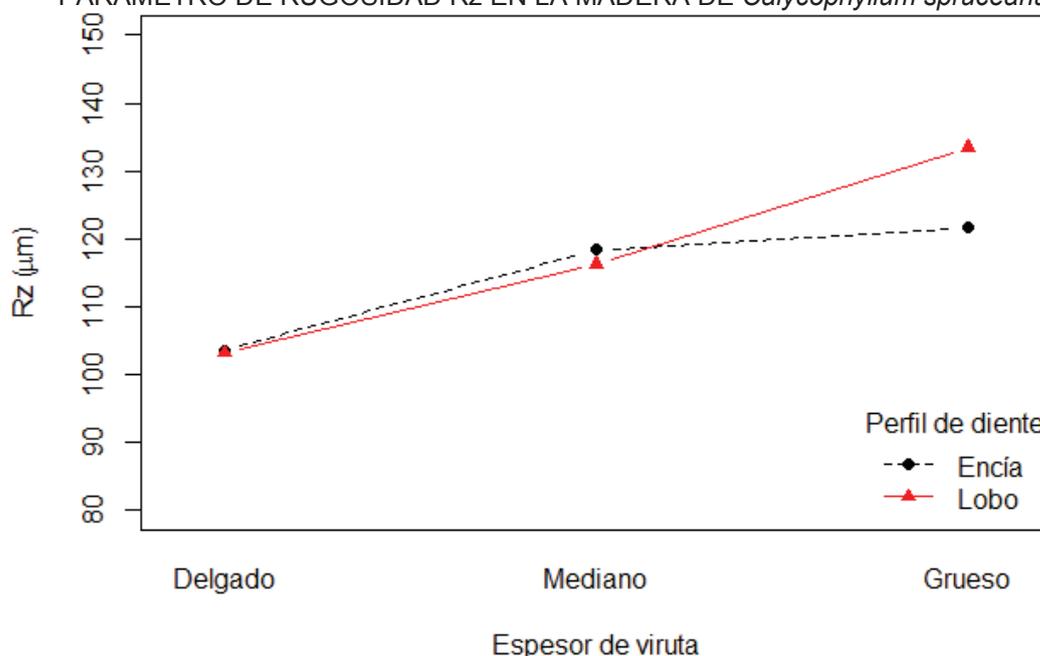


En el caso del parámetro Rz la TABLA 20 revela la influencia más significativa del espesor de viruta que del nivel de altura del fuste comercial; así mismo en la FIGURA 24 se visualiza una ligera interacción entre perfil de diente y

espesor de viruta, por el cambio de tendencia en los promedios de Rz al pasar de espesor mediano a grueso con diferente aumento promedio de un perfil a otro.

No obstante, el perfil de diente fue el único factor no significativo para Rz, la interacción detectada permite confirmar la influencia del espesor de viruta en el deterioro de la calidad superficial caracterizada por el parámetro Rz, el cual es muy sensible a la profundidad de los valles dejados por el mecanizado de los elementos anatómicos de mayor diámetro.

FIGURA 24 - INTERACCION DEL PERFIL DE DIENTE CON EL ESPESOR DE VIRUTA PARA EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Rz EN LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum*



La explicación del comportamiento mostrado en la FIGURA 24 se sustenta en el número de estructura definido por Magoss (2008) para cuantificar la contribución de los valles a la rugosidad resultante, cuya profundidad depende del diámetro del lumen de los diferentes elementos anatómicos cortados durante el proceso de mecanizado, tratando la posición local de los vasos en el plano de corte como una variable de probabilidad. La variación radial y longitudinal de la estructura anatómica en el fuste contribuye al comportamiento descrito.

Las TABLAS 21 y 22 muestran la comparación de los promedios de rugosidad Ra y Rz, respectivamente, con sus coeficientes de variación correspondientes a los perfiles de diente y espesores de viruta evaluados. En la TABLA 21 se revela que el parámetro Ra correspondiente a los espesores de viruta

evaluados no difirió significativamente con el perfil de diente, ni en el nivel basal ni intermedio; denotando un margen estrecho entre los valores de rugosidad en el nivel basal e intermedio, que prácticamente son similares.

TABLA 21 - VALORES MEDIOS DEL PARAMETRO Ra PARA LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA

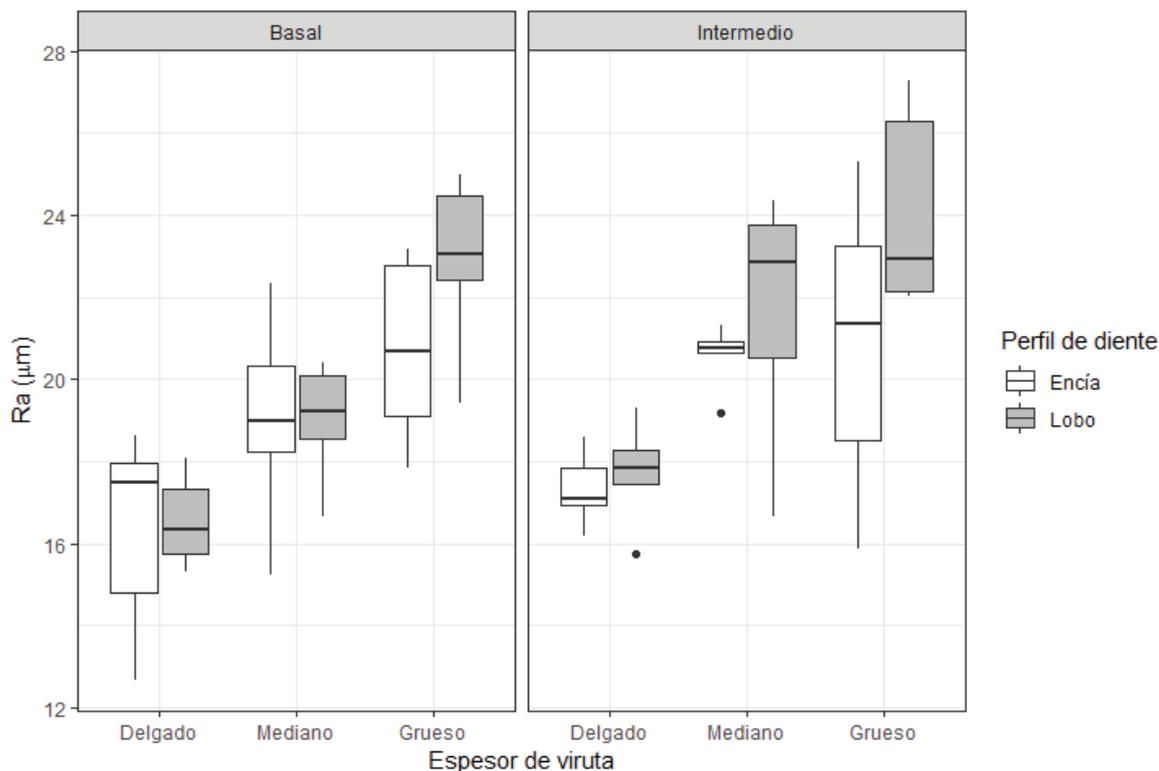
Perfil de diente	Fuste comercial	Parámetro Ra ( $\mu\text{m}$ ) por espesor de viruta			Promedio general
		Delgado	Mediano	Grueso	
Lobo	Basal	16,55 ef (6,63)	19,05 bcdef (7,34)	22,94 ab (8,86)	19,51 (15,75)
	Intermedio	17,75 cdef (6,68)	21,76 abc (13,57)	24,07 a (10,42)	21,19 (16,39)
Promedio general		17,15 (7,32)	20,40 (12,83)	23,50 (9,60)	20,35 (16,42)
Encía	Basal	16,38 f (14,86)	19,06 bcdef (12,71)	20,74 abcd (10,89)	18,73 (15,46)
	Intermedio	17,32 def (5,02)	20,60 abcde (3,60)	20,90 abcd (17,09)	19,60 (13,42)
Promedio general		16,85 (10,74)	19,83 (9,52)	20,82 (13,69)	19,16 (14,41)

Donde: Promedios seguidos por la misma letra minúscula no difieren estadísticamente entre sí por la prueba de Tukey al 5% de probabilidad. \*Valores entre paréntesis son los coeficientes de variación (%) de los promedios.

Dentro de cada perfil, la rugosidad en el nivel intermedio supera ligeramente al nivel basal del fuste comercial, con lo cual se detecta que el tamaño de fibras y demás elementos anatómicos aumenta gradualmente del nivel basal al intermedio, siguiendo la tendencia descrita en el ítem 4.2. Esta rugosidad diferenciada entre los niveles basal e intermedio se explica con las teorías de Magoss (2008) y Vignote et al. (2014) de que el diámetro de los vasos, fibras y otros lúmenes celulares determinan la profundidad de la irregularidad en la superficie mecanizada.

En la FIGURA 25, se verifica que el empleo del diente tipo lobo en comparación al encía, independientemente del nivel de altura del fuste, degrada la calidad superficial caracterizada por Ra durante el tableado de la especie *C. spruceanum*, cuando el espesor de viruta aumenta; excepto en el corte de virutas delgadas en el nivel basal en que la tendencia de la rugosidad se invierte, registrando una ligera disminución en Ra, posiblemente por el predominio en la madera del nivel basal de elementos anatómicos de menor tamaño al habitual.

FIGURA 25 - PARAMETRO Ra PROMEDIO PARA EL CORTE DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA



La tendencia general del diente tipo lobo a generar una mayor rugosidad Ra que el tipo encía parece estar asociada a la saturación de su garganta con aserrín que interfiere en la formación y arrancamiento de la viruta con la consiguiente degradación de la superficie aserrada. En ambos perfiles esta degradación se debe al aumento de la velocidad de avance que regula el espesor de viruta reduciendo el tiempo y la capacidad de la garganta para evacuar el aserrín sin desbordarlo, así como a la dificultad del corte por la variación de la dureza lateral según el plano de corte en el tableado de la capirona, sea tangencial, intermedio o radial.

En la TABLA 22 se aprecia que el parámetro Rz correspondiente a los espesores de viruta evaluados no difirió significativamente con el perfil de diente, ni en el nivel basal ni intermedio, mostrando una marcada diferencia respecto a las comparaciones de Ra en el nivel basal e intermedio, con excepción de la similitud de rugosidad obtenida para el espesor de viruta grueso con el perfil encía. De manera similar al comportamiento del parámetro Ra, se verifica que el nivel intermedio mantuvo la tendencia de superar en la rugosidad Rz al nivel basal, independientemente del perfil de diente, excepto en el corte de virutas gruesas con el diente encía.

TABLA 22 - VALORES MEDIOS DEL PARAMETRO Rz PARA LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA

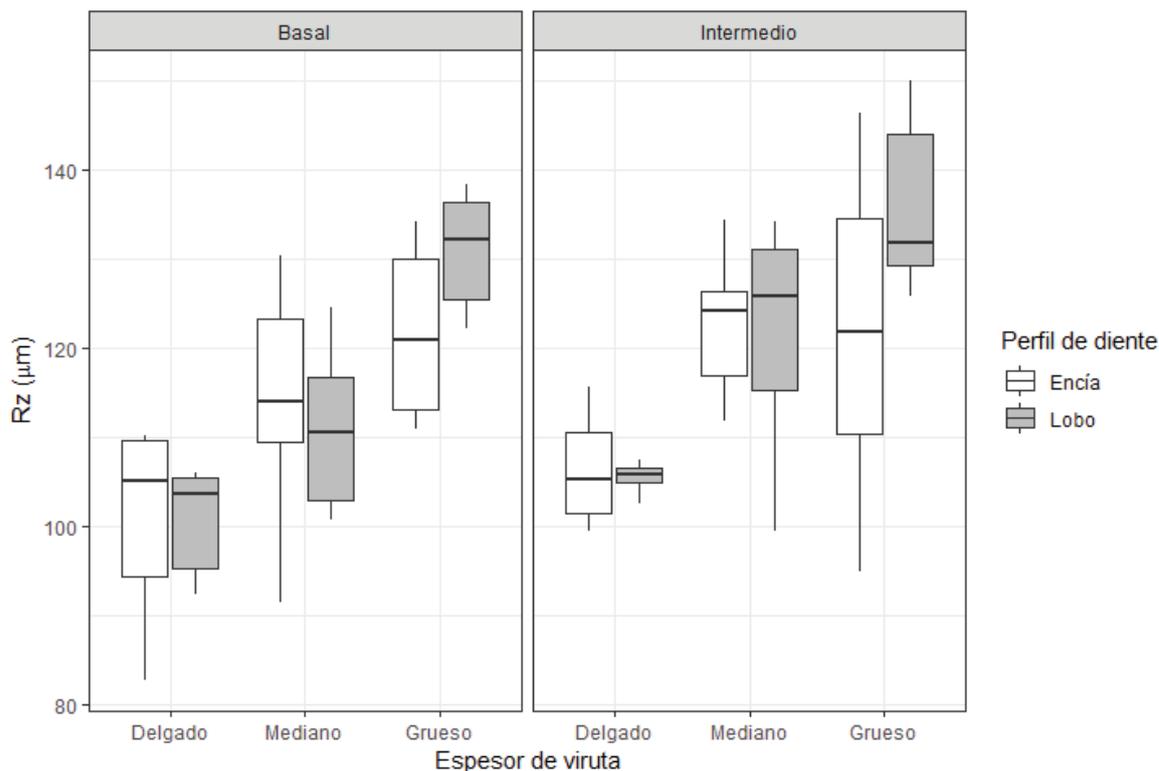
Perfil de diente	Fuste comercial	Parámetro Rz ( $\mu\text{m}$ ) por espesor de viruta			Promedio general
		Delgado	Mediano	Grueso	
Lobo	Basal	100,74 e (6,39)	110,90 bcde (8,50)	130,94 ab (5,18)	114,19 (12,95)
	Intermedio	105,53 cde (1,68)	121,67 abcd (10,95)	135,96 a (7,57)	121,05 (13,01)
Promedio general		103,13 (4,99)	116,28 (10,63)	133,45 (6,53)	117,62 (13,13)
Encía	Basal	100,86 de (11,23)	114,04 bcde (12,04)	121,72 abcd (8,31)	112,21 (12,66)
	Intermedio	106,40 cde (6,03)	122,66 abc (6,72)	121,72 abcd (15,85)	116,93 (12,10)
Promedio general		103,63 (8,92)	118,35 (9,88)	121,72 (12,07)	114,57 (12,38)

Donde: Promedios seguidos por la misma letra minúscula no difieren estadísticamente entre sí por la prueba de Tukey al 5% de probabilidad. \*Valores entre paréntesis son los coeficientes de variación (%) de los promedios.

La variación de rugosidad de un nivel a otro del fuste comercial se visualiza mejor mediante el parámetro Rz, el cual puede detectar en la superficie mecanizada el contraste entre picos y valles inherentes a una estructura anatómica, que Magoss (2008) admite para una rugosidad superficial óptima cuando el mecanizado deja pequeñas irregularidades de superficie.

En la FIGURA 26, se aprecia un deterioro similar al detectado para Ra cuando se cortan espesores de viruta delgados, medianos y gruesos empleando el diente de lobo en el tableado de *C. spruceanum*, el cual generó en el nivel intermedio del fuste comercial un ligero incremento de la rugosidad Rz en comparación a la del diente encía. Sin embargo, en el nivel basal la tendencia del parámetro Rz se mantuvo con el espesor de viruta grueso y se invirtió con los espesores delgado y mediano, disminuyendo ligeramente. Cabe destacar que la rugosidad Rz independientemente del nivel de altura en el fuste comercial, difirió claramente entre los perfiles evaluados cuando se cortan virutas gruesas. De modo general se mantiene la mayor degradación de la superficie para el diente de lobo debido a la saturación de su garganta. En el caso de ambos perfiles la rugosidad Rz también aumenta con la velocidad de avance que gradúa el espesor de viruta, y con la dificultad del corte al pasar del plano tangencial al radial.

FIGURA 26 - PARAMETRO Rz PROMEDIO PARA EL CORTE DE LA MADERA DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS PERFILES DE DIENTE Y TRES ESPESORES DE VIRUTA



La diferente degradación superficial obtenida con cada perfil de diente, en términos de la rugosidad Rz depende de la capacidad de la garganta para evitar interferencias del aserrín en el corte de una calidad superficial, que según Braga (2011), es rugosa cuando observa una alta variación entre picos y valles, que diversos autores atribuyen al corte efectuado por la herramienta a los elementos anatómicos de mayor diámetro, como es el caso de los vasos (MAGOSS, 2008; VIGNOTE et al., 2014; LAINA et al., 2017). En términos generales, el mecanizado del fuste intermedio con el diente encía generó menores rugosidades Ra y Rz respecto al diente de lobo, para cualquier espesor de viruta, tendencia que también es muy evidente en el nivel basal sólo para las virutas gruesas.

#### 4.5.3. Variación de la potencia de corte y de la rugosidad superficial con los parámetros densidad básica y dureza lateral

En la TABLA 23 se recopilan los coeficientes de correlación lineal entre potencia útil, espesor de viruta, rugosidad Ra, rugosidad Rz, densidad básica y

dureza lateral para el corte con el diente tipo lobo, mostrando una correlación no significativa de la potencia útil con la densidad básica ( $r = 0,04$ ) y la dureza lateral ( $r = 0,08$ ) en el corte de la madera de *C. spruceanum* con el diente de lobo, que no explica la variación de la potencia útil consumida. Sin embargo, según diversos autores existe una influencia directa de la densidad de la madera sobre la potencia o fuerza de corte requerida (CHARDIN, 1958; KOCH, 1964; SALES, 1990; GONÇALVES, 2000; GARCIA et al., 2002; CHUCHALA et al., 2014).

TABLA 23 - MATRIZ DE CORRELACION ENTRE POTENCIA UTIL, ESPESOR DE VIRUTA, PARAMETROS DE RUGOSIDAD Y FISICO-MECANICOS PARA EL CORTE CON EL DIENTE TIPO LOBO

VARIABLE	Espesor de Viruta	Ra	Rz	Densidad Básica	Dureza Lateral	Potencia útil
Espesor de Viruta	1,00					
Ra	0,79***	1,00				
Rz	0,80***	0,97***	1,00			
Densidad Básica	0,02	0,15	0,18	1,00		
Dureza Lateral	0,06	0,14	0,15	0,88***	1,00	
Potencia útil	0,94***	0,71***	0,75***	0,04	0,08	1,00

La TABLA 24 presenta los coeficientes de correlación lineal entre potencia útil, espesor de viruta, rugosidad Ra, rugosidad Rz, densidad básica y dureza lateral correspondientes al corte con el diente tipo encía, observándose un bajo grado de correlación de la potencia útil con la densidad básica ( $r = -0,43$ ) y la dureza lateral ( $r = -0,49$ ) en una relación inversa, aunque es evidente, conforme explican varios autores que el aumento de la densidad básica de la médula a la corteza tiende a exigir una mayor torsión del motor para cortar la madera, de allí que promueva el consumo de potencia en el corte de las tablas más próximas a la corteza (EYMA, MÉAUSOONE y MARTIN, 2004; MELO et al., 2015). En la relación aludida la densidad básica y la dureza lateral solo explican alrededor del 18 y 24% de variación de la potencia útil, respectivamente.

La errática relación inversa de la potencia de corte con los parámetros densidad y dureza, según Eyma, Méausoone y Martin (2004) responde a la dificultad para medir las características mecánicas en el nivel local, considerando que la localización de las fuerzas de corte durante el mecanizado de la madera es muy precisa y las características más bajas no siempre se miden.

TABLA 24 - MATRIZ DE CORRELACION ENTRE POTENCIA UTIL, ESPESOR DE VIRUTA, PARAMETROS DE RUGOSIDAD Y FISICO-MECANICOS PARA EL CORTE CON EL DIENTE TIPO ENCIA

VARIABLE	Espesor de Viruta	Ra	Rz	Densidad Básica	Dureza Lateral	Potencia útil
Espesor de Viruta	1,00					
Ra	0,6***	1,00				
Rz	0,54***	0,96***	1,00			
Densidad Básica	-0,47**	-0,21	-0,05	1,00		
Dureza Lateral	-0,51**	-0,19	-0,08	0,85***	1,00	
Potencia útil	0,91***	0,56***	0,49**	-0,43**	-0,49**	1,00

Además de la interferencia del plano radial en los cortes 3 y 4, el muestreo de la densidad y la dureza lateral en el tercio central del ancho y en los primeros 55 cm de longitud en cada extremo de las tablas obtenidas, pudo excluir aleatoriamente, gran parte de la madera juvenil inmersa que puede encontrarse en la trayectoria del diente, sobre todo en los cortes 2 y 5; lo cual conlleva a que se desvirtúe la relación de la potencia con los parámetros físico-mecánicos en estudio.

Gonçalves y Néri (2005) atribuyen la menor fuerza de corte en la madera de *Pinus taeda* a las diferencias anatómicas entre las zonas juveniles y maduras, considerando la menor densidad y menor resistencia de la madera juvenil, así como la relación directa de las fuerzas de corte con estos parámetros. Vignote y Martínez (2006) agregan que la diferencia entre las características de la madera juvenil y adulta es muy variable según especies y por tanto sus efectos, como poseer un comportamiento físico-mecánico diferente al resto de la madera formada.

El hecho de que la densidad básica y la dureza lateral no definieron buenas correlaciones directas con la potencia de corte, pone en evidencia la falta de correspondencia de la madera juvenil aleatoria con las propiedades obtenidas, así como la escasa variabilidad de las características de la madera de plantación. Esta distorsión en árboles de 20 años en plena maduración con un DAP promedio de 27 cm, se puede corregir empleando árboles de hasta 30 años con un DAP mínimo de 40 cm para evitar interferencias de la madera juvenil en las determinaciones requeridas en un estudio de consumo energético y calidad superficial.

Este análisis de correlación tiene carácter preliminar, sobre todo ante las buenas correlaciones obtenidas por diversos investigadores que sostienen que las maderas más densas, o incluso las zonas más densas de la misma muestra,

durante el mecanizado tienden a introducir virutas más pesadas que requieren más fuerza para su eliminación y, por ende, más energía para mover la herramienta de corte (KOCH, 1964; EYMA, MÉAUSOONE Y MARTIN, 2004; MELO et al., 2015).

En la TABLA 23 también se aprecia que los parámetros de rugosidad Ra y Rz con el diente lobo manifestaron una correlación no significativa con la densidad básica ( $r = 0,15$  para Ra y  $0,18$  para Rz) y la dureza lateral ( $r = 0,14$  para Ra y  $0,15$  para Rz), sugiriendo una relación directa. De manera similar, la TABLA 24 muestra una correlación no significativa de los parámetros de rugosidad Ra y Rz con el diente encía, denotando una relación inversa con la densidad básica ( $r = -0,21$  para Ra y  $-0,05$  para Rz) y la dureza lateral ( $r = -0,19$  para Ra y  $-0,08$  para Rz) que diversos especialistas utilizan para describir el efecto de la densidad en la rugosidad superficial (MAGOSS, 2008; AGUILERA y MUÑOZ, 2011; LAINA et al., 2017).

Según Soragi (2009) el contraste entre picos elevados y valles profundos, genera más piezas con peor calidad de superficie en la región más próxima a la médula de *Toona ciliata* donde se espera menor densidad. De otro lado, Laina et al (2017) encontraron que la dureza es la propiedad de la madera que afecta más claramente a su rugosidad final, y hace difícil obtener mejores resultados de rugosidad a medida que aumenta la dureza.

Si bien los coeficientes de correlación se consideran preliminares la tendencia manifestada está de acuerdo con los estudios de Magoss (2008) y Vignote et al. (2014), quienes explican que la variación de la rugosidad superficial en un material quebradizo como la madera, depende de su fractura por fragilidad, en especial del espesor de la pared celular y por tanto de su densidad. Por esta fragilidad las maderas poco densas se rompen más fácilmente mediante un mecanismo de corte asociado con la fractura del material, generando una superficie más irregular debido a las cavidades interiores del diámetro de vasos, fibras y otros lúmenes celulares cortados durante el mecanizado.

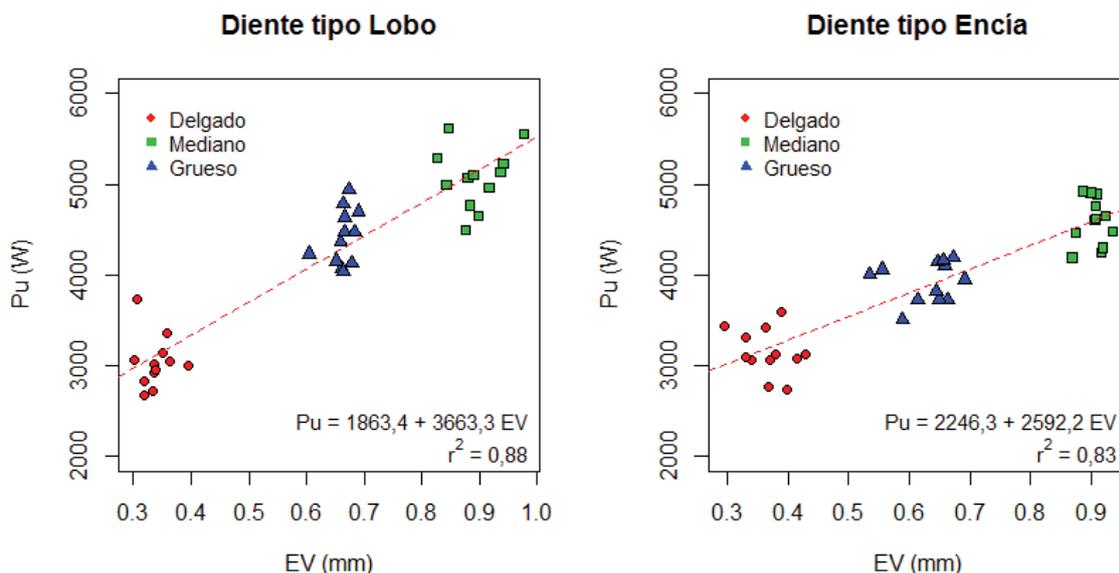
#### 4.6. ESTUDIO DE LOS PARAMETROS UTILIZADOS EN EL CORTE DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS FORMATOS DE DIENTE

##### 4.6.1. Análisis de la potencia útil de corte en función del espesor de viruta

En las TABLAS 23 y 24 según la escala de Calzada (1982) se califica de muy alta la correlación de la potencia útil con el espesor de viruta correspondiente a los perfiles lobo ( $r = 0,94$ ) y encía ( $r = 0,91$ ), confirmando la relación directa demostrada por varios investigadores de que conforme aumenta el espesor de viruta consume mayor potencia para remover virutas más gruesas (CHARDIN, 1958; KOCH, 1964; VEGA y AGUILERA, 2005; AGUILERA y MUÑOZ, 2011; CRISTÓVÃO et al., 2012).

En la FIGURA 27 la recta más inclinada corresponde al perfil lobo, lo cual demuestra su mayor requerimiento de potencia útil respecto al diente encía, posiblemente debido a la magnificación de los esfuerzos de flexión y cizallamiento en un radio de garganta más reducido; además de la evacuación de un gran volumen de aserrín por su mayor ancho de corte. En las ecuaciones de regresión para ambos perfiles, se nota que la variación de la potencia útil puede explicarse por el espesor de viruta en un 83% con el perfil encía y en un 88% con el tipo lobo.

FIGURA 27 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE LA POTENCIA ÚTIL Y ESPESOR DE VIRUTA PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE *Calycophyllum spruceanum*



Revisando los coeficientes angulares de las ecuaciones aludidas se puede afirmar que, por cada micrómetro de incremento en el espesor de viruta se registra un aumento en la potencia útil de aproximadamente 2,6 vatios con el formato tipo encía y 3,7 vatios cuando se utiliza el tipo lobo. Aunque un aumento del espesor de viruta significa un mayor consumo de potencia sin considerar la productividad

de la máquina en  $\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ , es evidente la ventaja del diente encía para cortar virutas gruesas que permitan avanzar la superficie aserrada en menor tiempo, consumiendo menos energía específica de corte respecto al diente lobo.

#### 4.6.2. Análisis de la rugosidad superficial en función del espesor de viruta

En las TABLAS 23 y 24 sobresale la alta correlación de los parámetros Ra y Rz con el espesor de viruta correspondiente al diente tipo lobo ( $r = 0,79$  para Ra y  $0,80$  para Rz) que luego se califica de baja cuando se cambia al diente tipo encía ( $r = 0,60$  para Ra y  $0,54$  para Rz). La disminución de la influencia del espesor de viruta sobre los parámetros de rugosidad obtenidos con el diente encía, puede atribuirse a la manifestación de factores no considerados como proporción y distribución de elementos anatómicos, transición entre planos de corte, resistencia a la tracción perpendicular a las fibras, presencia de médula y nudos, entre otros.

Las FIGURAS 28 y 29 corroboran en ambos perfiles la tendencia lineal positiva estudiada por Vega y Aguilera (2005), Pezoa (2006), Vega, Aguilera y Méausoone (2007) y Aguilera y Muñoz (2011), de que con el aumento del espesor de viruta se incrementa la rugosidad superficial.

FIGURA 28 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Ra Y ESPESOR DE VIRUTA PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE *Calycophyllum spruceanum*

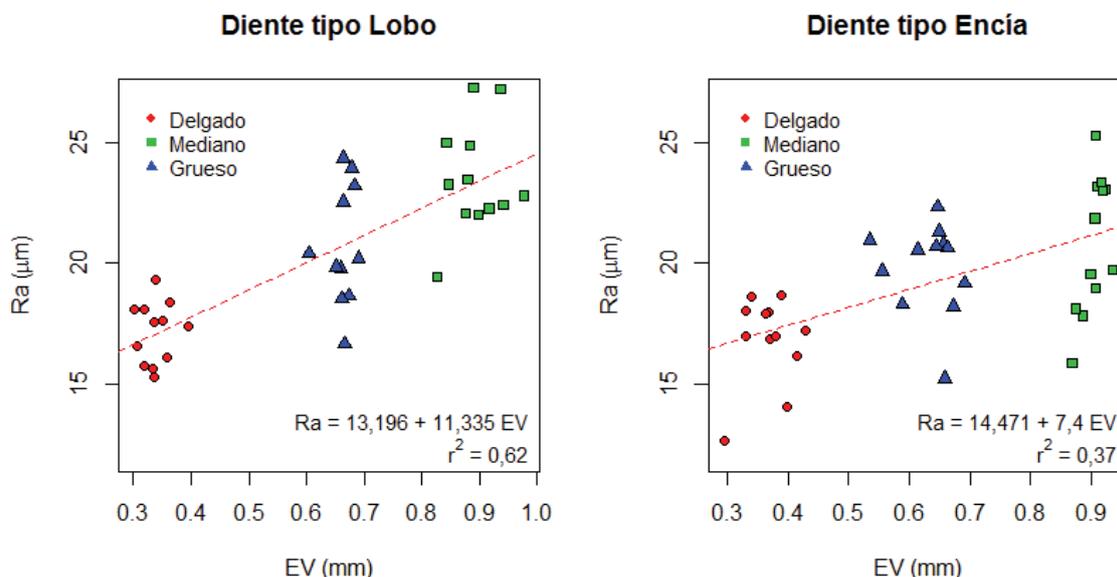
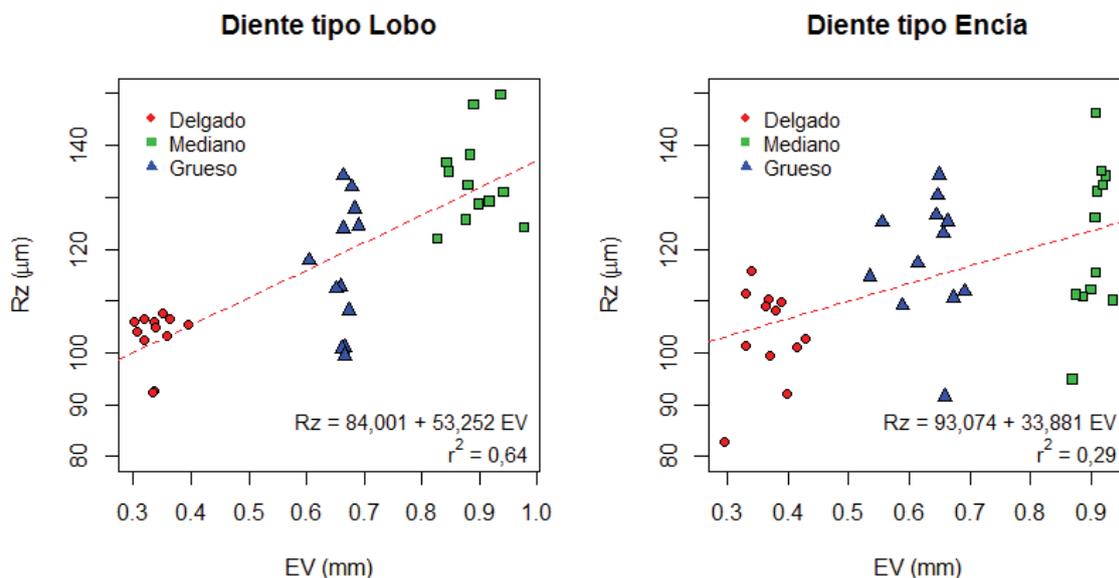


FIGURA 29 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Rz Y ESPESOR DE VIRUTA PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE *Calycophyllum spruceanum*



Revisando las ecuaciones de regresión mostradas en las FIGURAS 28 y 29 se aprecia que el espesor de viruta con el diente lobo explica mejor la variación de Ra en 62% y de Rz en 64%, en comparación al diente encía, que alcanza a explicar la variación de Ra en 37% y de Rz en 29%, posiblemente debido a su interacción con factores no considerados, así como la variabilidad en la ruptura de la viruta por cizallamiento, flexión o compresión inducida en una garganta plana. Por cada milímetro de incremento en el espesor de viruta, los coeficientes angulares para la rugosidad obtenida con el diente de lobo evidencian un aumento de Ra en 11,335 µm y de Rz en 53,252 µm, mientras que con el tipo encía el espesor de viruta manifiesta un aumento de 7,4 µm en Ra y 33,881 µm en Rz.

#### 4.6.3. Análisis de la rugosidad superficial en función de la potencia útil de corte

Las TABLAS 23 y 24 también presentan las correlaciones de los parámetros de rugosidad Ra y Rz con la potencia útil, correspondiendo al diente de lobo una calificación alta ( $r = 0,71$  para Ra y  $0,75$  para Rz) y baja ( $r = 0,56$  para Ra y  $0,49$  para Rz) al diente tipo encía, las cuales sugieren en ambos casos una tendencia lineal positiva como la descrita por Vega y Aguilera (2005); Vega, Aguilera y Méausoone (2007) y Aguilera y Muñoz (2011).

Las tendencias observadas en las FIGURAS 30 y 31 corroboran de que, conforme aumenta la potencia de corte se alcanza una mayor rugosidad superficial, aunque según Vega, Aguilera y Méausoone (2007) una alta heterogeneidad intrínseca de la madera en algunas especies afectaría la correcta formación de la viruta, dificultando la predicción de la calidad superficial en un nivel dado de potencia de corte. Teniendo en cuenta que la rugosidad superficial y la potencia útil de corte manifiestan tendencias similares al aumentar el espesor de viruta, se puede esperar que el mecanizado con marcado deterioro de la superficie confiera una alta rugosidad y solicite una considerable potencia de corte asociada a la remoción de espesores de viruta cada vez mayores.

Las ecuaciones de regresión mostradas en las FIGURAS 30 y 31 revelan que la potencia de corte explica la rugosidad en menor grado que el espesor de viruta, destacando en el diente de lobo la mejor explicación de la potencia útil para la variación de Ra en 51% y de Rz en 56%. En el caso del diente encía la potencia útil explica menos del 50%, justificando el 32% de la variación en Ra y 24% en Rz, la cual puede ser complementada por la influencia del espesor de viruta y su interacción con los elementos anatómicos cortados.

FIGURA 30 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Ra Y POTENCIA ÚTIL PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE *Calycophyllum spruceanum*

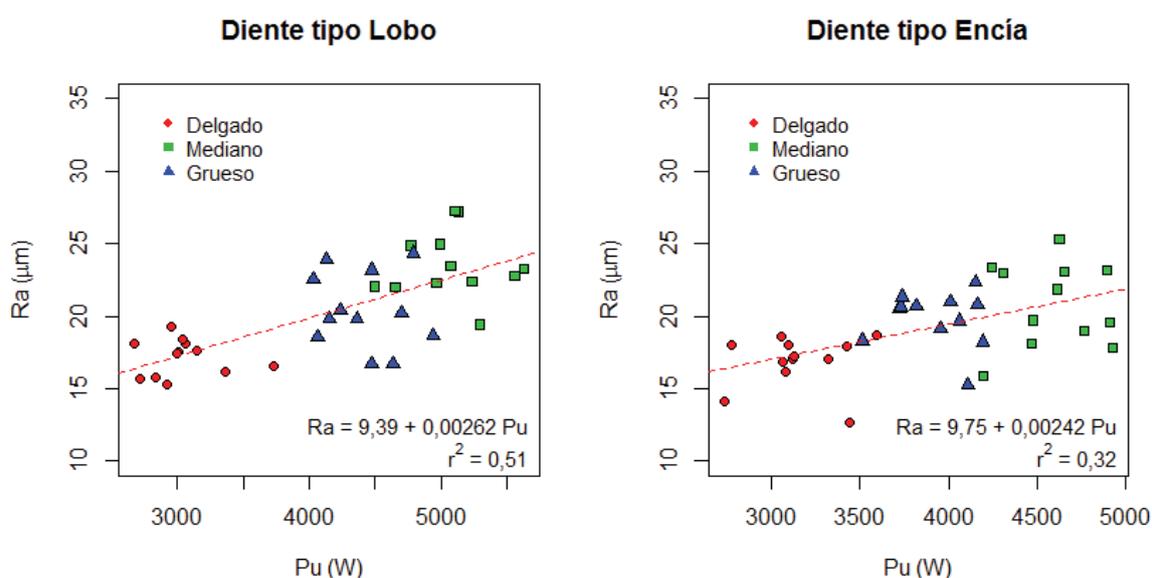
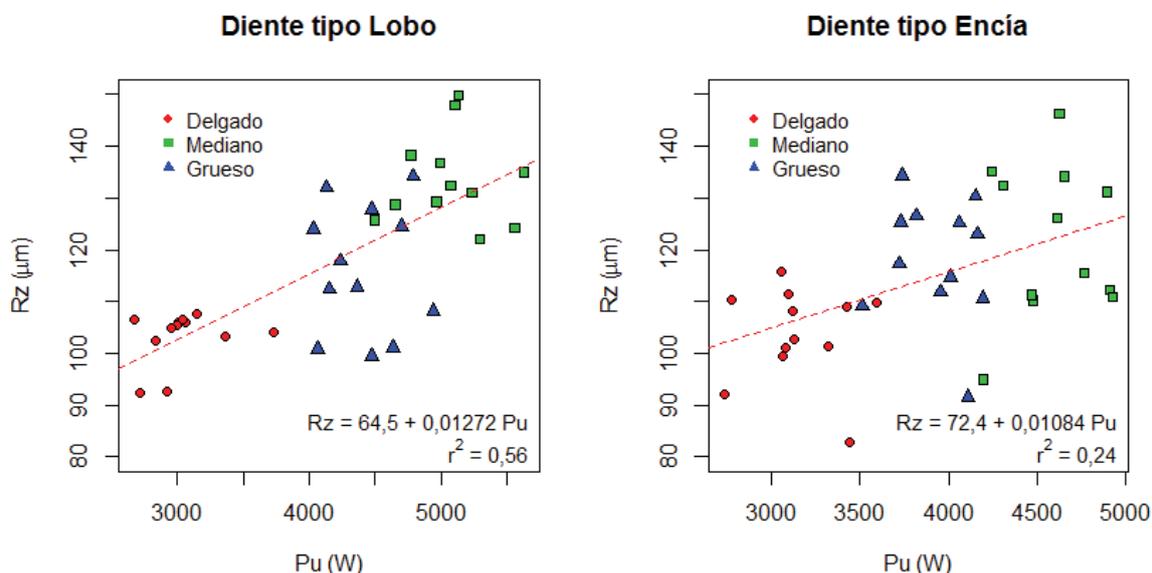


FIGURA 31 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y LÍNEA DE REGRESIÓN ENTRE EL PARAMETRO DE RUGOSIDAD Rz Y POTENCIA ÚTIL PARA DOS PERFILES DE DIENTE EN EL CORTE DE *Calycophyllum spruceanum*



Los coeficientes angulares que se visualizan mejor en las pendientes de las líneas de regresión mostradas en las FIGURAS 30 y 31, permiten afirmar para el formato tipo lobo que el incremento de cada watio en la potencia útil registra un aumento aproximado de 0,00262  $\mu\text{m}$  en Ra y 0,01272  $\mu\text{m}$  en Rz, mientras que para el tipo encía este incremento en la potencia útil manifiesta un aumento de 0,00242  $\mu\text{m}$  en Ra y 0,01084  $\mu\text{m}$  en Rz.

#### 4.7. ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO DE CORTE UNITARIO Y COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN DE LA GARGANTA EN EL MECANIZADO DE *Calycophyllum spruceanum* CON DOS FORMATOS DE DIENTE

La TABLA 25 recopila el promedio y coeficiente de variación del esfuerzo de corte unitario y coeficiente de utilización de la garganta por perfil de diente para tres categorías de espesor de viruta y dos niveles de altura del fuste comercial, complementado por los parámetros evaluados de mayor influencia en el corte de la madera de *C. spruceanum*. En esta tabla se observa un comportamiento del esfuerzo de corte unitario para los espesores de viruta evaluados similar al de la potencia de corte, cuando aumenta por el cambio del perfil tipo encía al tipo lobo,

con lo cual es posible su empleo como predictor del requerimiento de potencia útil para la remoción de diferentes espesores de viruta en el corte de la madera, independientemente del formato de diente.

El esfuerzo de corte unitario fluctúa en el orden de 31 a 53 N para el diente encía y de 34 a 54 N para el tipo lobo cuando la categoría del espesor de viruta cambia de grueso a delgado, poniendo en evidencia la ventaja del diente encía con los espesores de viruta mayores y confirmando su formato idóneo desde el punto de vista energético, por inducir menores esfuerzos de flexión y cizallamiento en un radio de garganta ligeramente superior al diente de lobo. De manera similar a la potencia de corte, el efecto del menor ángulo de salida y mayor radio de garganta del diente encía se manifiesta principalmente en la menor sollicitación del esfuerzo de corte unitario bajo la acción de este perfil.

Los valores correspondientes al límite inferior del rango de esfuerzos unitarios estimados en madera verde con ambos formatos de diente, se aproximan bastante a los esfuerzos medidos en estado verde para otras especies tropicales de densidad similar a la madera estudiada, como *Tectona grandis* y *Testulea gabonensis*, a las cuales Sales (1990) asigna valores de 31,5 y 32,2 N, respectivamente. Sin embargo, los esfuerzos unitarios ubicados en el límite superior permiten presumir su sobreestimación en el presente estudio, lo cual amerita una evaluación de los diferentes métodos para la determinación del esfuerzo de corte.

Cabe admitir que los esfuerzos de corte obtenidos a partir de mediciones de potencia en el motor eléctrico de una sierra de cinta, posiblemente representan valores sobreestimados que Ninin (1986) sugiere depurarlos, considerando los rendimientos mecánicos de las transmisiones y eléctricos de los motores variables con las velocidades y las cargas y que según Gonçalves (2000), estos rendimientos fluctúan de 60% a 85%. Al respecto, Garcia et al. (2002) advierten de la potencia absorbida para vencer el arranque y la pérdida por fricción entre los distintos elementos de transmisión.

Diversos investigadores prefieren captar las señales relativas a los esfuerzos de corte mediante dinamómetros de anillos ortogonales, de galgas extensiométricas o de sensores piezoeléctricos, con lo cual evitan la depuración en los esfuerzos solicitados (WOODSON, 1979; NÉRI, GONÇALVES y HERNÁNDEZ,

2000; EYMA et al., 2004; GONÇALVES y NÉRI, 2005; VEGA, AGUILERA y MÉAUSOONE, 2007; CRISTÓVÃO et al., 2012; MORADPOUR et al., 2016).

Los esfuerzos estimados para ambos formatos de diente comparados con los valores de resistencia específica de corte expresada en  $N.mm^{-2}$ , aunque superan de manera notable el valor de 11,11 reportado por Gonçalves (2000) para una madera más densa que la estudiada, sólo alcanzan el límite inferior de 44,1  $N.mm^{-2}$  fijado por Vignote y Martínez (2006) para maderas blandas. Esta contradicción aparente puede explicarse por los factores considerados en su cálculo.

En términos generales, la baja variabilidad del esfuerzo de corte unitario supera levemente a la de la potencia útil, a una velocidad de corte de  $15,74 m.s^{-1}$  con una altura de corte de 150 mm y un paso de 38 mm. Esto se puede atribuir a la densidad y ángulos de la fibra probablemente diferenciados según la zona de madera mecanizada (juvenil, madura, albura, duramen, o una transición entre ellas) y en menor grado al plano de corte predominante y a la calidad de sitio de la especie maderable.

En cuanto al coeficiente de utilización de la garganta correspondiente a las virutas medianas obtenidas con los perfiles tipo lobo y encía, destaca su rango de 2,8 a 2,9 por su aproximación a 3, valor energéticamente óptimo que Ninin (1969) determina para maderas livianas blandas hasta pesadas semiduras cortadas con el diente pico de loro. Este rango se considera satisfactorio para la madera de *C. spruceanum* cortada con un perfil de diente diferente al pico de loro, teniendo en cuenta que según Chardin (1957), los espesores de viruta medianos (de 0,663 a 0,632 mm) tienden a alojarse en la garganta sobre todo a una velocidad de corte cercana a  $16 m.s^{-1}$ , que puede calificarse de baja.

En el corte de espesores de viruta delgados con ambos perfiles el coeficiente de utilización de la garganta cercano a cinco sugiere una subutilización o desperdicio de la capacidad de la garganta para el alojamiento y evacuación del aserrín. Con los espesores de viruta gruesos el coeficiente de utilización alrededor de dos advierte la posible sobreutilización de la garganta con flujo de aserrín hacia el canal de corte a ambos lados de la cinta, debido a la saturación creciente de la garganta con aserrín.

Independientemente del perfil de diente empleado, en la TABLA 25 se verifica que la mejor calidad superficial, caracterizada por una baja rugosidad Rz asociada a un bajo consumo de energía, corresponde a las virutas delgadas y parece estar relacionada a un bajo alojamiento de virutas en la garganta, considerando que el espesor de viruta de 0,35 mm representa el 43% de la traba del diente de lobo y 45% de la traba del diente encía. Estas partículas diminutas de aserrín de acuerdo con Chardin (1957), es posible que pasen entre la cinta y la madera, aunque esta tendencia puede atenuarse por la baja velocidad de corte empleada que minimiza la dispersión de partículas antes de su expulsión de la garganta al canal de corte.

TABLA 25 - PARÁMETROS DETERMINADOS PARA EL CORTE DE LA MADERA DE CAPIRONA CON DOS PERFILES DE DIENTE

PERFIL DE DIENTE	CATEGORIA DE ESPESOR DE VIRUTA	NIVEL DE ALTURA DEL FUSTE	ESPESOR DE VIRUTA (mm)		POTENCIA UTIL DE CORTE (w)		ESFUERZO DE CORTE UNITARIO (N)		COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN DE LA GARGANTA		RUGOSIDAD Rz (µm)	
			Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)	Prom.	CV (%)
Delgado	Basal		0,329	6,47	3.135,9	11,45	56,94	14,96	5,66	6,53	100,74	6,39
	Intermedio		0,347	8,35	2.943,0	5,61	50,52	5,91	5,37	8,07	105,53	1,68
	Promedio		0,338	7,71	3.039,4	9,37	53,73	12,93	5,52	7,48	103,13	4,99
LOBO	Basal		0,659	4,43	4.491,3	7,26	40,51	5,98	2,82	4,66	110,90	8,50
	Intermedio		0,668	1,70	4.342,8	6,56	38,64	6,56	2,78	1,69	121,67	10,95
	Promedio		0,663	3,26	4.417,0	6,84	39,58	6,47	2,80	3,46	116,28	10,63
Grueso	Basal		0,882	6,40	5.198,4	6,64	35,13	8,71	2,11	6,15	130,94	5,18
	Intermedio		0,903	3,15	4.947,2	6,05	32,55	4,96	2,06	3,10	135,96	7,57
	Promedio		0,893	4,93	5.072,8	6,60	33,84	7,96	2,08	4,88	133,45	6,53
Delgado	Basal		0,357	10,94	3.214,6	11,45	55,96	19,15	5,14	11,81	100,86	11,23
	Intermedio		0,377	10,45	3.092,1	0,90	50,65	10,04	4,86	10,38	106,40	6,03
	Promedio		0,367	10,58	3.153,3	8,15	53,31	15,88	5,00	11,04	103,63	8,92
Mediano	Basal		0,623	7,23	3.958,1	6,97	38,99	7,65	2,93	7,45	114,04	12,04
	Intermedio		0,640	8,41	3.901,7	4,40	37,60	11,53	2,86	9,48	122,66	6,72
	Promedio		0,632	7,62	3.929,9	5,63	38,30	9,46	2,89	8,21	118,35	9,88
Grueso	Basal		0,905	1,41	4.792,1	2,89	32,42	3,95	2,01	1,41	121,72	8,31
	Intermedio		0,904	2,96	4.385,6	3,74	29,73	4,19	2,01	2,99	121,72	15,85
	Promedio		0,904	2,21	4.588,8	5,60	31,08	5,95	2,01	2,23	121,72	12,07

Prom = promedio

CV = coeficiente de variación

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por medio de las evaluaciones de la potencia de corte y de la rugosidad superficial, bajo dos perfiles de diente con tres espesores de viruta en el tableado de *Calycophyllum spruceanum* (capirona) de 20 años, caracterizada por su madera semi-pesada, dura y poca abrasiva, se concluye que:

- La potencia útil de corte y la rugosidad superficial de la madera se diferencia significativamente con la geometría del diente.
- El formato tipo encía solicita menor potencia útil que el tipo lobo y mejora la calidad superficial para las virutas gruesas.
- El descenso del nivel intermedio al basal, incrementa la potencia útil y disminuye la rugosidad superficial, independientemente del espesor de viruta y del formato de diente empleado.
- La potencia útil de corte aumenta con el incremento del espesor de viruta, mostrando correlaciones satisfactorias para ambos formatos de diente.
- El diente de lobo genera mayor degradación de la superficie cuando su rugosidad aumenta con el espesor de viruta y la potencia útil.
- Los esfuerzos de corte unitario para ambos formatos de diente se consideran aceptables según el grado de dureza de la madera estudiada.
- El tableado de la capirona con una misma altura de corte para ambos formatos de diente alcanza un coeficiente de utilización de la garganta satisfactorio con las virutas medianas.

De acuerdo a las conclusiones obtenidas se recomienda:

- Estudiar la energía específica de corte en función del espesor de viruta y de la geometría del diente, con el fin de optimizar su consumo según la productividad de la especie maderable.
- Aumentar la edad de la plantación y el número de árboles para reducir la variabilidad en el estudio del consumo energético y calidad superficial.

- Aumentar el tamaño de la muestra de madera tableada para mejorar la correlación de la estructura anatómica con la rugosidad superficial.
- Estudiar la granulometría del aserrín generado por especie en cada espesor de viruta, con el fin de evaluar las dimensiones de la viruta fragmentada con diferentes formatos de diente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, M.; KIKATA, Y. **Atlas de Maderas del Perú**. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina – Universidad de Nagoya. Publifor, 1994. 202 p.

AGUILERA, A.; VEGA, M. Efecto del cambio de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial de *Pinus radiata* D. Don. **Bosque**, Valdivia, Chile, v. 25, n. 3, p. 25-32, 2004.

AGUILERA, A.; MUÑOZ, H. Rugosidad superficial y potencia de corte en el cepillado de *Acacia melanoxylon* y *Sequoia sempervirens*. **Maderas. Ciencia y Tecnología**. v. 13, n. 1, p. 19 - 28, 2011. Universidad del Bío - Bío. DOI: 10.4067/S0718-221X2011000100002.

ANTOINE, R. Le Sciage des Bois Tropicaux, Principes et Applications. **Revista Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, France, n. 74, p. 35-49, 1960.

ARROYO, P.J. **Propiedades Físico-mecánicas de la Madera**. Mérida: Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de los Andes, 1983. 197 p.

AYSEL, M.; DOGU, K. Efectos de la rugosidad de superficie en las especies *Pinus nigra* y *Pinus brutia* cortadas en sección tangencial y radial. Universidad de Hacettepe. Instituto Profesional, Ingeniería de Industria Maderera. XI Congreso Forestal Mundial. Antalya, Turquía. 1997, p. 108-115.

BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 387 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Disponible en: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80779>>. Consultado 14 dic.2018.

BRAGA, P.C. **Qualidade na usinagem e no acabamento da madeira de Coffea arábica**. 88 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011. Disponible en:<[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/2428/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_Qualidade%20na%20usinagem%20e%20no%20acabamento%20da%20madeira%20de%20Coffea%20arabica.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/2428/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Qualidade%20na%20usinagem%20e%20no%20acabamento%20da%20madeira%20de%20Coffea%20arabica.pdf)>. Consultado 11 mar.2016.

CALZADA, B.J. 1982. **Métodos estadísticos para la investigación**. Lima: Ed. Milagros S.A, 1982. 644 p.

CAMARA NACIONAL FORESTAL. **Utilización Industrial de Nuevas Especies Forestales en el Perú**. Anexo I. Investigación Tecnológica Industrial. Lima: PROYECTO OIMT PD 37/88 (I) Rev. 3, 1991. 91 p.

CAMARA NACIONAL FORESTAL. **Utilización Industrial de Nuevas Especies**

**Forestales en el Perú.** Lima: PROYECTO OIMT PD 37/88 (I) Rev. 3, 1999. 240 p.

CARMAN, S.A.; PONOMARYOVA, I.; BELTRÁN, M.L. **Electrónica Digital Aplicada para Ingeniería Mecánica.** México: Ediciones Verbolibre, 2013. 188 p.

CARMO, J. F.; LATORRACA, J. V. F.; ROCHA, M. P.; BRITO, E. O. Influência da geometria dos dentes das lâminas de serra de fita na qualidade e produtividade da madeira serrada. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 44, n. 2, p. 291 – 302, 2014. Disponible en: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/28958/22783>> Consultado: 23 feb.2017.

CHAVESTA, C. M. **Maderas para Pisos.** Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina. Departamento de Industrias Forestales, 2005. 176 p.

CHARDIN, A. L'étude du sciage par Photographie ultra-rapide. **Revista Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, France, n. 51, p. 40-51, 1957.

CHARDIN, A. Utilisation du Pendule Dynamométrique dans les Recherches sur le Sciage des bois. **Revista Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, France, n. 58, p. 49-61, 1958.

CHARDIN, A. Choix d' un type de scierie pour l'équipement d'une région forestiere tropicale. **Revista Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, France, n. 81, p. 37-48, 1962.

CHUCHALA, D; ORLOWSKI, K.; SANDAK, A.; SANDAK, J.; PAULINY, D.; BARAŃSKI, J. The Effect of Wood Provenance and Density on Cutting Forces While Sawing Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, v. 9, n. 3, p. 5349-5361, 2014. Disponible en: <<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-effect-of-wood-provenance-and-density-on-cutting-forces-while-sawing-scots-pine-pinus-sylvestris-l/>>. Consultado: 13 dic.2016.

CITE madera (Centro de Innovación Tecnológica de la Madera). **Buenas Prácticas en la Operación y Mantenimiento de la Sierra Cinta del Aserradero.** Lima: CITE madera, 2012. 74 p.

CONFEDERACION NACIONAL DE LA MADERA. **Compendio de Información Técnica de 32 Especies Forestales.** Tomo I. Lima: RC Servigraf S.R.L., 1994. 146 p.

CRISTÓVÃO, L.; BROMAN, O.; GRONLUND, A.; EKEVAD, M.; SITOIE, R. Main cutting force models for two species of tropical Wood. **Wood Material Science & Engineering**, v. 7, n. 3, p. 143-149, 2012. DOI. 10.1080/17480272.2012.662996. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2012.662996>> Consultado: 04 nov.2016.

DADSWELL, H.E. The anatomy of Eucalypt wood. Forest Products Laboratory, CSIRO, n. 66, p. 1-28, 1972.

DALOIS, C. **Manuel de Sciage et d' Affûtage**. Nogent-sur-Marne, France: Centre Technique Forestier Tropical, 1990. 199 p.

DÍAZ, R. M.; PECHO DE LA CRUZ, G. R.; GUARDA, S. D. Variación de las propiedades físicas de *Calycophyllum spruceanum* (Benth) Hooker F. ex Chuman (Capirona) de una plantación de ocho años en la zona Tingo María, Perú, 18 p, s.f. Disponible en: [http://www.cnf.org.pe/secretaria\\_conflat/memorias/DOCUMENTO%20MESAS/MESA%203/Robert%20Pecho%20de%20la%20Cruz.pdf](http://www.cnf.org.pe/secretaria_conflat/memorias/DOCUMENTO%20MESAS/MESA%203/Robert%20Pecho%20de%20la%20Cruz.pdf) Consultado: 25 may.2016.

DIN (Deutsches Institut für Normung. DIN 4760: Form deviations: concepts, classification system. Berlin, Beut, 1982. 60 p.

DIRECCION GENERAL DE FORESTAL Y FAUNA. **Perú Forestal en Números 1991**. Lima: Unidad de Programación, 1993. 162 p.

ENCARNACION, C. F. **Nomenclatura de las Especies Forestales Comunes en el Perú**. Lima: Proyecto PNUD/FAO/PER/81/002, 1983. 149 p. Documento de Trabajo N°7.

EYMA, F.; MÉAUSOONE, P.J.; MARTIN, P. Study of the properties of thirteen tropical wood species to improve the prediction of cutting forces in mode B. **Annals of forest science** v. 61, n. 1, p. 55-64, 2004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2003084> ó [www.giref.ulaval.ca/~deteix/bois/.../article12.pdf](http://www.giref.ulaval.ca/~deteix/bois/.../article12.pdf) Consultado: 26 ene 2017.

FRENCH, M.G. **Diseño y Operación de Aserraderos de Maderas Duras Tropicales**. Lima: Dirección General de Industrias, 1977. 252 p.

GARCIA, L.; GUINDEO, A.; PERAZA, C.; DE PALACIOS, P. **La madera y su tecnología**. Madrid: Ediciones Mundi-prensa, 2002. 322 p.

GAUTHIER, R. **Diagnóstico de los aserraderos de la Región del Ucayali Provincia Coronel Portillo**. Lima: Programa de Desarrollo Forestal Perú-Canadá, 1986. 143 p. Informe.

GONÇALVES, M. T. **Processamento da Madeira**. SP: USC-Bauru, 2000. 245 p.

GONÇALVES, R.; NÉRI, A. Orthogonal cutting forces in juvenile and mature *Pinus taeda* Wood. **Scientia Agricola**, Piracicaba, Braz, v. 62, n. 4, p. 310-318, 2005. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000400002> Consultado: 11 mar 2016.

GONZALEZ, R. V. B. **Rugosidade superficial: Uma abordagem prática**. SP: Mitutoyo do Brasil, Departamento de Entrenamiento, 1998.

GUTIERREZ, M.; GUTIERREZ, G. La Madera y su proceso de corte. I Parte. **Suplemento Chile Forestal**, Santiago, N° 82, 1982a. 8 p.

GUTIERREZ, M.; GUTIERREZ, G. La Madera y su proceso de corte. II Parte. **Suplemento Chile Forestal**, Santiago, N° 83, 1982b. 8 p.

IAWA (International Association of Wood Anatomists). List of microscopic features for hardwood identification. **Iawa Bulletin**, Netherlands, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

INACAL (Instituto Nacional de Calidad). NTP 251.015: Madera. Método de determinación de la dureza. Lima, Perú, 2014. 6 p.

INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales). Perú Forestal en Números Año 2005. Lima: Centro de Información Forestal, 2006. 183 p.

INSTITUTO FORESTAL. **Principios de Organización y Operación del Aserradero**. Concepción, Chile: Corporación de Fomento de la Producción, 1989. 217 p. Manual N° 16.

ISO (International Organization for Standardization). ISO/FDIS 13061-1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Ginebra, Suiza, 2014. 4 p.

ISO (International Organization for Standardization). ISO/FDIS 13061-2: Determination of density for physical and mechanical tests. Ginebra, Suiza, 2014. 6 p.

JUNAC (Junta del Acuerdo de Cartagena). **Descripción General y Anatómica de 105 Maderas del Grupo Andino**. Cali: PADT-REFORT, 1981. 442 p.

JUNAC (Junta del Acuerdo de Cartagena). **Manual del Grupo Andino para Aserrío y Afilado de Sierras Cintas y Sierras Circulares**. Cali: PRID-MADERA, 1989. 309 p.

KOCH, P. **Wood Machining Processes**. New York: Ronald Press Company, 1964. 530 p.

LAINA, R.; SANZ, A.; VILLASANTE, A.; LÓPEZ, P.; MARTÍNEZ, J.; ALPUENTE, J.; SÁNCHEZ, R.; VIGNOTE, S. Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, Chile, v. 19, n. 2, p. 203-212, 2017. Disponible en: <<https://www.mysciencework.com/.../dc71bf8866c60559668e506>>. Consultado: 03 mar 2017.

LLUNCOR, D.; ROEDER, O.; YPUSHIMA, A. Comportamiento al maquinado de la

madera de *Calycophyllum spruceanum* BENTH HOOK. F. EX SCHUM. (Capirona) de Pucallpa. **Revista Forestal de Ucayali**, v. 3, n. 1, p. 11-19, 2006.

MAGOSS, E. 2008. General Regularities of Wood Surface Roughness. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, Sopron, Hungría, v. 4, p. 81-93, 2008. Disponible en: <[https://www.researchgate.net/profile/Endre\\_Magoss2/publication/268178676\\_General\\_Regularities\\_of\\_Wood\\_Surface\\_Roughness/links/58db5e1f92851ce5e96d7e2a/General-Regularities-of-Wood-Surface-Roughness.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Endre_Magoss2/publication/268178676_General_Regularities_of_Wood_Surface_Roughness/links/58db5e1f92851ce5e96d7e2a/General-Regularities-of-Wood-Surface-Roughness.pdf)>. Consultado: 22 dic 2018.

MELLENDEZ, M. **Parámetros básicos de corte con sierra cinta en el aserrío de la capirona *Calycophyllum spruceanum***. 110 p. Disertación (Maestría en Industrias Forestales) - Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 1999.

MELLENDEZ, M. Geometría del diente tipo lobo para el aserrío de la Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) con sierra cinta. **Revista Forestal del Perú**, v. 26, n. 1-2, p. 21-36, 2003.

MELO, L.; SILVA, J.; NAPOLI, A.; LIMA, J.; NASCIMENTO, D. Influence of anatomy and basic density on specific cutting force for wood from *Corymbia citriodora* Hill & Johnson. **Forest Systems**, v. 24, n. 3, 9 p, 2015. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.5424/fs/2015243-07712>>. Consultado: 13 dic 2016.

MITUTOYO. **SJ-201P Surface roughness tester**. Kawasaki, Japón: Mitutoyo Corporation, s.f. 184 p. User's manual.

MOLINA, J.; DEL CASTILLO, L. **Afilado y Mantenimiento de Sierra Cinta de Aserradero**. Lima: CITE madera, 2007. 26 p.

MORADPOUR, P.; SCHOLZ, F.; DOOSTHOSEINI, K.; TARMIAN, A. Measurement of wood cutting forces during bandsawing using piezoelectric dynamometer. **Drvna Industrija**, v. 67, n. 1, p. 79-84, 2016. DOI:10.5552/drind.2016.1433. Disponible en: <<https://hrcak.srce.hr/154666>>. Consultado: 13 dic 2016.

MORENO, F. J. **Variación del Contenido de Sílice en cuatro Maderas de la Zona de Von Humboldt Ucayali**. 94 p. Trabajo de Titulación (Ingeniería Forestal) – Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 1994.

NÉRI, A.; GONÇALVES, R.; HERNANDEZ, R. Forças de corte ortogonal 90-90 em três espécies de madeira de eucalipto do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.4, n.2, p.275-280, 2000. DOI: 10.1590/S1415-43662000000200024. Disponible en: <<https://www.researchgate.net/publication/228607895>>. Consultado: 11 mar 2016.

NININ, S.L. Relaciones entre la aptitud del aserrado y algunas propiedades físicas,

mecánicas y químicas de cuatro maderas tropicales. **Revista Forestal Venezolana**, Mérida, n. 8, p. 67-115, 1969.

NININ, S.L. **Manual de Aserrado y Afilado**. Mérida: Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de los Andes, 1986. 288 p.

NININ, S.L.; ESCOBAR, O. **Apuntes del seminario sobre aserrío y afilado de sierras de cinta**. Pucallpa, Perú: INFOR-JUNAC-CEE, 1986.

OTAROLA, G. B. **Guía de Mantenimiento de Sierras de Cinta**. Pucallpa, Perú: Proyecto de Capacitación, Extensión y Divulgación Forestal/COTESU INTERCOOPERATION, 1991. 73 p.

PANTIGOSO, G. J. **Propiedades Físicas y Mecánicas de la Capirona (*Calycophyllum spruceanum* (Benth) hook ex Schumann) procedente de una plantación experimental en San Alejandro Ucayali-Perú**. 133 p. Trabajo de Titulación (Ingeniería Forestal) – Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2009.

PAULA, J. E.; COSTA, K. P. **Densidade da madeira de 932 espécies nativas do Brasil**. Porto Alegre: Ed. Cinco Continentes, 2011. 238 p.

PEZOA, R.D. **Consumo de energía y calidad superficial en el procesamiento de madera seca con sierra circular**. 65 p. Trabajo de Titulación (Ingeniería en Maderas) – Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2006. Disponible en: < <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fifp521c/doc/fifp521c.pdf>>. Consultado: 26 dic.2015.

PNUD/FAO. **Diente, Velocidad y Avance de la Sierra de Cinta**. Lima: Proyecto PNUD/FAO/PER/78/003, 1980. 8 p. Nota Técnica N°24.

REYNEL, C.; PENNINGTON, T.D.; PENNINGTON, R.T.; FLORES, C.; DAZA, A. **Arboles útiles de la Amazonía peruana y sus usos**. Lima: DARWIN INITIATIVE/ICRAF, 2003. 536 p.

REYNEL, C.; PENNINGTON, T.D.; PENNINGTON, R.T. **Arboles del Perú**. Lima: NERC/RBGE/DARWIN INITIATIVE/CED-FDA/APRODES, 2016. 1047 p.

SALES, C. **La Scie a Ruban: Théorie et Practique du Sciage des Bois em Grume**. Nogent-sur-Marne, France: Centre Technique Forestier Tropical, 1990. 152 p.

SANDVIK. **Cuidado y mantenimiento de hojas de sierra cinta para madera**. Sandviken, Suecia: Sandvik Steel, 1992. 20 p.

SANDVIK. **El Manual: producción, uso y mantenimiento de hojas de sierra cinta para madera**. Sandviken, Suecia: AB Sandvik Steel, 1999. 86 p.

SANTIAGO, P. P.; GUEVARA, S. C. L.; ESPINOZA, L. M. L. **Manual de transformación de la madera**. Pucallpa, Perú: Proyecto PD 512/08 Rev. 2 (I) AIDER/OIMT, 2013. 111 p.

SCHREWE, H. **Manual de Acondicionamiento y Mantenimiento de la Sierra de Cinta**. Lima: Proyecto PNUD/FAO/PER/81/002, 1983. 92 p.

SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre). **Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2016**. Lima: Dirección de información y Registro, 2018. 107 p. Disponible en: <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2018/05/Anuario-2016.pdf>. Consultado: 25 set.2018.

SIBILLE, M.A.M. **Guía de Procesamiento Industrial. Fabricación de Muebles con Maderas Poco Conocidas-LKS**. Lima: USAID/PROMPEX, 2006a. 73 p.

SIBILLE, M.A.M. **Guía de Procesamiento Industrial. Ficha Técnica: Capirona**. Lima: USAID/PROMPEX, 2006b. 17 p.

SORAGI, L.C. **Qualidade de superfícies usinadas em madeira de *Toona ciliata* M. Roem.** 61 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009. Disponible en: [http://prpg.ufla.br/prpg/ct-madeira/wp-content/uploads/2012/07/Livia-de-Carvalho-Soragi-Dissertacao\\_impressao.pdf](http://prpg.ufla.br/prpg/ct-madeira/wp-content/uploads/2012/07/Livia-de-Carvalho-Soragi-Dissertacao_impressao.pdf) Consultado: 22 mar 2017.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). T 211 om-02: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta, USA, 2002. 5 p.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). T 245 cm-07: Silicates and Silica in Pulp (Wet Ash Method). Atlanta, USA, 2007. 3 p.

TORRES, S.L. **El esfuerzo de corte en aserrado como función de tres propiedades mecánicas (Dureza, Cizallamiento y Tenacidad) en algunas maderas tropicales**. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 1973. 32 p.

TORTORELLI, L. **Maderas y Bosques Argentinos**, Tomo I. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora, 2009. 515 p.

TREJO J.; NININ, P.; ROSSO, F.; NININ, F. Disminución del desgaste de herramientas cortantes y ahorro energético como efecto de la calidad del filo de sierras de cintas. **Revista Forestal Latinoamericana**, Mérida, n. 41, p 37-56, 2007. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/228718876>. Consultado: 11 mar 2016.

TUSET, R.; DURAN, F.; BERTERRECHE, A.; MARIUS, N.; DANILUK, G. **Manual de Maderas Comerciales, Equipos y Proceso de Utilización. Aserrado de Maderas.** Montevideo: Ed. Hemisferio-Sur, 2007. 370 p.

UDDEHOLM. **Manual de hojas de sierra cinta para madera.** Munkfors, Suecia: Uddeholm Strip Steel AB, 1993. 48 p.

UGARTE, G.L. **Evaluación de factores de sitio en la productividad de plantaciones de *Calycophyllum spruceanum* Benth a través del índice de sitio en la cuenca del Aguaytia, Ucayali, Perú.** 75 p. Disertación (Maestría en Bosques y Gestión de Recursos Forestales) - Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2008.

URBAN, R.; ULLILEN, L. **Mecanismos de financiamiento para el sector forestal en el Perú.** Lima: FONDEBOSQUE. FAO/NFP Facility, 2011. 120 p.

VEGA, M.; AGUILERA, A. Caracterización de la rugosidad superficial y de la energía de corte durante el maquinado de *Pinus radiata*. **Bosque**, Valdivia, Chile, v. 26, n. 1, p. 101-108, 2005. Disponible en: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173113281010>>. Consultado: 26 dic 2015.

VEGA, M.; AGUILERA, A.; MÉAUSOONE, P.J. Esfuerzos de corte y rugosidad superficial en el fresado de pino radiata y su relación con emisión acústica. **Maderas. Ciencia y Tecnología**. v. 9, n. 2, p. 161 - 169, 2007. Universidad del Bío - Bío. DOI: 10.4067/S0718-221X2011000100002.

VIGNOTE, S.; MARTINEZ, I. **Tecnología de la madera.** Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2006. 678 p.

VIGNOTE, S.; VILLASANTE, A.; MARTÍNEZ, I.; MARTÍNEZ, J.A.; LAÍNA, R. Defectos de rugosidad y otras imperfecciones de mecanizado en la madera. **Boletín de Información Técnica AITIM**, Madrid, n. 289, p. 32-38, 2014. Disponible en: <[http://oa.upm.es/36137/1/INVE MEM 2014 197750.pdf](http://oa.upm.es/36137/1/INVE_MEM_2014_197750.pdf)>. Consultado: 22 dic 2018.

VITAL, B. R. **Planejamento e Operação de Serrarias.** Minas Gerais: Editora Universidade Federal de Viçosa, 2013. 211 p.

VIZCARRA, S; LARA, R. **Maderas de Bolivia.** Santa Cruz: CUMAT/CAMARA NACIONAL FORESTAL, 1992. 295 p.

WIGHTMAN, K.; CORNELIUS, J.; UGARTE-GUERRA, L. **¡Plantemos madera! Manual sobre el establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones maderables para productores de la Amazonía peruana.** Lima: ICRAF, 2006. 193 p.

WILLISTON, E.M. **Lumber manufacturing: the design and operation of sawmills and planer mills.** San Francisco: Miller Freeman Publications Inc., 1981. 512 p.

WILLISTON, E.M. **Saws: design, selection, operation and maintenance.** San Francisco: Miller Freeman Publications Inc., 1989. 450 p.

WOODSON, G.E. **Tool Forces and Chip Types In Orthogonal Cutting Of Southern Hardwoods.** New Orleans: USDA Forest Service/Southern Forest Experiment Station, 1979. 77 p.

**ANEXO 1 - GRUPOS ENERGETICOS DE ASERRIO PARA ESPECIES SEGUN SU DENSIDAD AL 12% DE  
CONTENIDO DE HUMEDAD**

GRUPO ENERGETICO I (D = 0,2 - 0,5 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	$\alpha$	$\beta$	$\delta$	$\lambda$	RF	RL
1	45	17 - 18	35° - (30°)	45° - 50°	10°	0,70 - 0,80	8°	10°
2	50	19 - 20	35° - (30°)	43° - 50°	10° - 12°	0,85 - 0,90	8°	10°
3	50	20 - 22	35° - (30°)	42° - 50°	10° - 13°	0,90 - 0,95	8°	10° - 12°
4	20/55	20 - 22/23	35° - (30°)	42° - 50°	10° - 13°	0,90 - 1,00	8°	10° - 12°

GRUPO ENERGETICO II (D = 0,5 - 0,6 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	$\alpha$	$\beta$	$\delta$	$\lambda$	RF	RL
1	50	16 - 17	30° - (35°)	50° - 45°	10°	0,7	7° - 8°	8° - 10°
2	50/60	18 - 19/20 - 21	30° - (35°)	50° - 43°	10° - 12°	0,80 - 0,85	7° - 8°	8° - 10°
3	50/60	19 - 20/21 - 22	30° - (35°)	50° - 43°	10° - 12°	0,85 - 0,90	7° - 8°	8° - 10°
4	50/60	19 - 20/22 - 24	30° - (35°)	50° - 43°	10° - 12°	0,85 - 0,95	7° - 8°	8° - 10°

GRUPO ENERGETICO III (D = 0,6 - 0,7 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	$\alpha$	$\beta$	$\delta$	$\lambda$	RF	RL
1	45/50	15 - 16/16 - 17	30°	52° - 50°	8° - 10°	0,65 - 0,70	7°	7° - 8°
2	50/60	17 - 18/19 - 20	30°	50°	10°	0,75 - 0,80	7°	7° - 8°
3	50/60	18 - 19/20 - 22	30°	50°	10°	0,85 - 0,90	7°	7° - 8°
4	50/60	18 - 19/20 - 22	30°	50°	10°	0,85 - 0,90	7°	7° - 8°

GRUPO ENERGETICO IV (D = 0,7 - 0,85 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	$\alpha$	$\beta$	$\delta$	$\lambda$	RF	RL
1	45/50	16/15 - 17	30°	52°	8°	0,60 - 0,65	6° - 7°	6° - 7°
2	50/60	16 - 17/18 - 20	30°	52°	8°	0,70 - 0,75	6° - 7°	6° - 7°
3	50/60	17 - 18/20 - 21	30°	52° - 50°	8° - 10°	0,80 - 0,85	6° - 7°	6° - 7°
4	50/60	17 - 18/20 - 22	30°	52° - 50°	8° - 10°	0,80 - 0,85	6° - 7°	6° - 7°

GRUPO ENERGETICO V (D = 0,85 - 1,00 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	$\alpha$	$\beta$	$\delta$	$\lambda$	RF	RL
1	45/50	12 - 13/13 - 15	25°	58°	7°	0,45 - 0,50	6°	6°

2	40/45/50	13 – 14/14 – 15	25°	58°	7°	0,55 – 0,60	6°	6°
3	45/50	14 – 15/15 – 16	25°	58° - 57°	7° - 8°	0,65 – 0,70	6°	6°
4	45/50	14 – 15/15 - 16	25°	58° - 57°	7° - 8°	0,65 – 0,70	6°	6°

GRUPO ENERGETICO VI ( $D \geq 1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ )

Tipo de cinta	P	Hd	$\alpha$	$\beta$	$\delta$	$\lambda$	RF	RL
1	35/40	11 – 12/11 – 12	25°	59° - 58°	6° - 7°	0,45 – 0,50	5°	5°
2	35/40/45	2/11 – 13/12 – 13	25°	59° - 58°	6° - 7°	0,50 – 0,60	5°	5°
3	40/45	12 – 13/13 – 15	25°	58°	7°	0,60 – 0,70	5°	5°
4	40/45	12 – 13/13 - 15	25°	58°	7°	0,60 – 0,70	5°	5°

GRUPO ENERGETICO I (D = 0,2 – 0,5 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	EV opt.	Vh	Val.
1*	45	17 – 18	0,70	2500 – 3000	35 – 40
1**	45	17 – 18	----	2000 – 2500	30 – 35
2*	50	19 – 20	1,0 – 1,1	2500 – 3000	45 – 60
2**	50	19 – 20	----	2000 – 2500	35 – 45
3	50	20 – 22	1,1 – 1,2	2500 – 3000	50 – 65
4	50/55	20 – 22/23 – 24	1,1 – 1,3	2500 – 3000	50 – 65 (70)

OBSERVACION: La energía cinética del aserrín en las gargantas tiende a ser insuficiente para saturar pasos mayores de 50-55 mm; especialmente en el caso de maderas fibrosas.

GRUPO ENERGETICO II (D = 0,5 – 0,6 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	EV opt.	Vh	Val.
1*	50	16 – 17	0,8	2500 – 3000	35 – 40
1**	50	16 – 17	----	1800 – 2000	20 – 30
2*	50/60	18 – 19/20 – 21	0,95 – 1,25	2500 – 3000	40 – 55

2**	50/60	18 – 19/20 – 21	----	1800 – 2000	25 – 35
3	50/60	19 – 20/21 – 22	1,00 – 1,30	2500 – 3000	45 – 60
4	50/60	19 – 20/22 - 24	1,00 – 1,40	2500 – 3000	45 – 65

GRUPO ENERGETICO III (D = 0,6 – 0,7 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	EV opt.	Vh	Val.
1*	45/50	15 – 16/16 – 17	0,65 – 0,80	2500	30 – 35
1**	45/50	15 – 16/16 – 17	-----	1500 – 1800	20 – 25
2*	50/60	17 – 18/19 – 20	0,90 – 1,20	2500	40 – 45
2**	50/60	17 – 18/19 – 20	-----	1500 – 1800	25 – 30
3	50/60	18 – 19/20 – 22	0,95 – 1,30	2500	40 – 50
4	50/60	18 – 19/20 – 22	0,95 – 1,30	2500	45 – 55

GRUPO ENERGETICO IV (D = 0,7 – 0,85 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	EV opt.	Vh	Val.
1*	45/50	15/15 – 17	0,65 – 0,80	2000 – 2500	25 – 35
1**	45/50	15/15 – 17	-----	1000 – 1500	15 – 25
2*	50/60	16 – 17/18 – 20	0,80 – 1,20	2000 – 2500	30 – 40 (45)
2**	50/60	16 – 17/18 – 20	-----	1000 – 1500	15 – 30
3	50/60	17 – 18/20 – 21	0,90 – 1,25	2000 – 2500	30 – 45
4	50/60	17 – 18/20 – 22	0,90 – 1,30	2000 - 2500	35 – 50

\* Potencia instalada holgada.

\*\* Potencia instalada limitada al 50% de lo recomendado.

#### GRUPO ENERGETICO V (D = 0,85 – 1,00 g.cm<sup>-3</sup>)

Tipo de cinta	P	Hd	EV opt.	Vh	Val.
1*	40/45	12 – 13/13 – 15	0,35 – 0,40/0,55	1500	10 – 15
1**	40/45	12 – 13/13 – 15	-----	1000	5 – 10
2*	40/45/50	13 – 14/14 – 15/14 – 15	0,40/0,55/0,60	1500	12 – 17
2**	40/45/50	13 – 14/14 – 15/14 – 15	-----	1000	5 – 12

3	45/50	14 – 15/15 – 16	0,60 – 0,70	1500 – 1800	17 – 25
4	45/50	14 – 15/15 – 16	0,60 – 0,70	1500 - 1800	17 – 25

GRUPO ENERGETICO VI ( $D \geq 1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ )  
(Tiene menos intensidad de investigación)

Tipo de cinta	P	Hd	EV opt.	Vh	Val.
1*	35/40	11 – 12/11 – 12	0,25/0,30 – 0,35	1500	8 – 12
1**	35/40	11 – 12/11 – 12	-----	1000	5 – 3
2*	35/40/45	12/11 – 13/12 – 13	0,30/0,30 – 0,40/0,45	1500	10 – 15
2**	35/40/45	12/11 – 13/12 – 13	-----	1000	5 – 10
3	40/45	12 – 13/13 – 15	0,35 – 0,40/0,55	1500	12 – 18
4	40/45	12 – 13/13 – 15	0,35 – 0,40/0,55	1500	12 – 18

LEYENDA:

p = paso      Hd = altura del diente     $\alpha$  = ángulo de ataque     $\beta$  = ángulo de hierro     $\delta$  = ángulo libre  
 $\lambda$  = traba      RF = ángulo de rectificación frontal    RL = ángulo de rectificación lateral  
 EV opt = espesor de viruta óptimo    Vh = velocidad de la cinta    Val = velocidad de alimentación

## ANEXO 2 - FORMATO DE EVALUACION DE LA TRABA PARA EL PERFIL DIENTE DE LOBO

ALTURA DEL DIENTE	11,5 mm	PASO DEL DIENTE	38,0 mm
SENO DE GARGANTA	278,3 mm <sup>2</sup>	ANCHO DEL DIENTE	2,71 mm

Nº DIENTE	TRABA (mm)		RANGO (mm)				SUB GRUPO
	DERECHA	IZQUIERDA	DENTRO DEL DIENTE	ENTRE DIENTES			
				DERECHA	IZQUIERDA	PROMEDIO	
1	0.85	0.70	0.15				A
2	0.60	0.85	0.25				
3	0.72	0.72	0.00				
4	0.82	0.72	0.10				
5	0.85	0.85	0.00	0.25	0.15	0.20	
33	0.80	0.85	0.05				B
34	0.77	0.82	0.05				
35	0.70	0.70	0.00				
36	0.63	0.63	0.00				
37	0.85	0.95	0.10	0.22	0.32	0.27	
65	0.95	0.87	0.08				C
66	0.75	0.75	0.00				
67	0.80	0.85	0.05				
68	0.75	0.95	0.20				
69	0.75	0.87	0.12	0.20	0.20	0.20	
97	0.90	0.90	0.00				D
98	0.75	0.95	0.20				
99	0.80	0.87	0.07				
100	0.75	0.90	0.15				
101	0.80	0.80	0.00	0.15	0.15	0.15	
129	0.95	0.90	0.05				E
130	0.90	0.90	0.00				
131	0.95	0.95	0.00				
132	0.57	0.80	0.23				
133	0.60	0.75	0.15	0.35	0.20	0.28	
161	0.75	0.80	0.05				F
162	0.75	0.70	0.05				
163	0.80	0.90	0.10				
164	0.85	0.82	0.03				
165	0.85	0.95	0.10	0.10	0.25	0.18	

PROMEDIOS (mm)	
DERECHA	0.79
IZQUIERDA	0.83
GRUPAL	0.81
RANGOS PROMEDIOS (mm)	
DEL GRUPO	0.08
DE SUBGRUPOS	0.21

DESVIACION ESTANDAR (mm)	
DENTRO DEL DIENTE	0.03
ENTRE DIENTES	0.09
TOTAL	0.09
CV (%)	
	11.60
INTERPRETACION :	
	Buen igualado

### ANEXO 3 - FORMATO DE EVALUACION DE LA TRABA PARA EL PERFIL DIENTE ENCIA

ALTURA DEL DIENTE	11,0 mm	PASO DEL DIENTE	38,0 mm
SENO DE GARGANTA	272,4 mm <sup>2</sup>	ANCHO DEL DIENTE	2,63 mm

N° DIENTE	TRABA (mm)		RANGO (mm)				SUB GRUPO
	DERECHA	IZQUIERDA	DENTRO DEL DIENTE	ENTRE DIENTES			
				DERECHA	IZQUIERDA	PROMEDIO	
1	0.90	0.57	0.33				A
2	0.85	0.75	0.10				
3	0.85	0.75	0.10				
4	0.90	0.75	0.15				
5	0.45	0.90	0.45	0.45	0.33	0.39	
33	0.80	0.93	0.13				B
34	0.75	0.75	0.00				
35	0.70	0.85	0.15				
36	0.75	0.90	0.15				
37	0.80	0.95	0.15	0.10	0.20	0.15	
65	0.90	0.80	0.10				C
66	0.75	0.80	0.05				
67	0.70	0.80	0.10				
68	0.70	0.70	0.00				
69	0.70	0.75	0.05	0.20	0.10	0.15	
97	0.80	0.85	0.05				D
98	0.80	0.75	0.05				
99	0.75	0.85	0.10				
100	0.80	0.80	0.00				
101	0.80	0.75	0.05	0.05	0.10	0.08	
129	0.85	0.75	0.10				E
130	0.90	0.85	0.05				
131	0.80	0.80	0.00				
132	0.80	0.75	0.05				
133	0.65	0.65	0.00	0.25	0.20	0.23	
161	0.65	0.75	0.10				F
162	0.65	0.65	0.00				
163	0.75	0.55	0.20				
164	0.75	0.70	0.05				
165	0.70	0.75	0.05	0.10	0.20	0.15	

PROMEDIOS (mm)	
DERECHA	0.77
IZQUIERDA	0.77
GRUPAL	0.77
RANGOS PROMEDIOS (mm)	
DEL GRUPO	0.10
DE SUBGRUPOS	0.19

DESVIACION ESTANDAR (mm)	
DENTRO DEL DIENTE	0.04
ENTRE DIENTES	0.08
TOTAL	0.09
CV (%)	11.26
INTERPRETACION	: Buen igualado

**ANEXO 4 - CARACTERISTICAS DE LOS BLOQUES DE CAPIRONA  
EMPLEADOS EN EL ENSAYO DE ASERRADO**

MÓDULO N°	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD HUMEDA (g/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD BASICA	DUREZA LATERAL (Kg/cm <sup>2</sup> )	CONTENIDO DE SILICE (%)	GRANO
1A	50,35	0,97	0,64	704,31	0,33	Lig. Entrecruzado
1B	47,50	0,96	0,64	698,03	0,15	Lig. Entrecruzado
2A	51,71	0,97	0,63	699,16	0,16	Lig. Entrecruzado
2B	52,51	0,97	0,63	665,79	0,15	Lig. Entrecruzado
3A	45,04	0,96	0,65	719,51	0,07	Lig. Entrecruzado
3B	46,89	0,99	0,67	744,26	0,16	Lig. Entrecruzado
4A	51,12	1,00	0,66	765,52	0,18	Lig. Entrecruzado
4B	42,43	0,91	0,64	691,22	0,32	Lig. Entrecruzado
5A	47,81	0,90	0,60	662,23	0,21	Lig. Entrecruzado
5B	43,54	0,95	0,66	716,79	0,08	Lig. Entrecruzado
6A	44,65	0,96	0,66	734,04	0,10	Lig. Entrecruzado
6B	50,14	0,99	0,65	701,43	0,49	Lig. Entrecruzado
PROMEDIO	47,81	0,96	0,64	708,52	0,20	Lig. Entrecruzado
cv (%)	7,08	3,10	2,71	4,23	61,22	
VALOR MIN.	45,89	0,94	0,63	691,55	0,13	
VALOR MAX.	49,72	0,98	0,65	725,50	0,27	

**ANEXO 5 - METRAJE DE CORTE DE CAPIRONA CON CAMBIO DE CUATRO  
CINTAS DURANTE EL REGISTRO DE VARIABLES DE CORTE POR MELENDEZ  
(1999)**

CINTA N°	TROZA N°	NÚMERO DE CORTES	LONGITUD DE CORTE (m)	ALTURA PROMEDIO DE CORTE (cm)	SUPERFICIE ASERRADA (m <sup>2</sup> )	
					POR TROZA	POR CINTA
1	1	21	3,45	49,9	36,15	115,47
	2	18	3,38	37,5	22,82	
	3	16	3,18	41,1	20,91	
	4	20	3,15	56,5	35,60	
2	5	26	3,78	46,8	46,00	76,96
	6	15	3,48	36,4	19,00	
	7	8	3,73	40,1	11,97	

---

	7	11	3,73	43,2	17,72	
3	8	11	3,10	31,4	10,71	29,27
	9	1	3,41	24,5	0,84	
	9	23	3,41	42,8	33,57	
4	10	15	3,18	34,9	16,65	121,62
	11	15	3,53	33,6	17,79	
	12	31	3,68	47,0	53,62	

---

## ANEXO 6 - ESCALA DE CALIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN SEGÚN CALZADA (1982)

RANGO DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	CALIFICACIÓN
De 0,2 a 0,3	Coeficiente muy bajo
De 0,4 a 0,5	Coeficiente bajo
De 0,6 a 0,7	Coeficiente alto
De 0,8 a 1,0	Coeficiente muy alto

## ANEXO 7 - ELEMENTOS ESTRUCTURALES MICROSCOPICOS EN LOS BLOQUES DE CAPIRONA ENSAYADOS

MÓDULO N°	DIAMETRO DE VASOS ( $\mu\text{m}$ )	NUMERO DE POROS/ $\text{mm}^2$	LONGITUD DE VASOS ( $\mu\text{m}$ )	ESPESOR DE PARED CELULAR ( $\mu\text{m}$ )	DIAMETRO DE LUMEN DE FIBRAS ( $\mu\text{m}$ )	DIAMETRO DE FIBRAS ( $\mu\text{m}$ )	LONGITUD DE FIBRAS ( $\mu\text{m}$ )
1A	66,46	37	525,00	4,16	9,13	17,45	1752,81
1B	72,76	36	647,91	4,57	9,24	18,38	1921,77
2A	77,25	31	564,27	4,37	8,70	17,44	1757,52
2B	76,78	34	544,77	4,63	9,16	18,42	1804,20
3A	59,67	37	440,18	3,96	9,06	16,99	1597,95
3B	70,50	34	553,37	4,55	9,01	18,10	1803,31
4A	64,58	41	522,89	3,67	9,46	16,79	1645,48
4B	71,21	31	521,63	4,35	7,92	16,63	1698,06
5A	59,58	32	475,87	3,98	8,01	15,97	1654,03
5B	59,56	42	560,48	4,76	8,23	17,76	1793,55
6A	71,83	38	567,77	4,13	8,30	16,56	1708,08
6B	73,33	37	598,83	4,33	9,56	18,23	1625,19
PROMEDIO	68,63	35,94	543,58	4,29	8,82	17,39	1730,16
cv (%)	9,48	9,97	9,90	7,45	6,43	4,64	5,39
VALOR MIN.	64,94	33,92	513,13	4,11	8,50	16,94	1677,36
VALOR MAX.	72,31	37,97	574,03	4,47	9,14	17,85	1782,97