



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

**Efecto del uso de distintos esquemas en la simulación de  
trozado por prioridad de un rodal podado de *Pinus radiata***

Profesor Guía : Sr. Guillermo Trincado

Trabajo de Titulación presentado como  
parte de los requisitos para optar al  
Título de **Ingeniero Forestal**.

**SEBASTIÁN GARZÓN SAMPER**

VALDIVIA

2009

## CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Guillermo Trincado Villagrán	<u>5,70</u>
Informante:	Sr. Gonzalo Paredes Veloso	<u>5,95</u>
Informante:	Sr. Mario Meneses Villanueva	<u>5,00</u>

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

---

Sr. Guillermo Trincado V.

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Proceso de trozado	3
2.2 Calidad de trozas	3
2.2.1 <i>Tamaño y forma</i>	3
2.2.2 <i>Indicadores de calidad para trozas podadas</i>	6
2.2.3 <i>Indicadores de calidad para trozas no podadas</i>	8
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	10
3.1 Datos	10
3.2 Metodología	11
3.2.1 <i>Tipos de productos y sus restricciones</i>	11
3.2.2 <i>Asignación de valor</i>	12
3.2.3 <i>Algoritmo de simulación de trozado</i>	13
3.2.4 <i>Evaluación de las simulaciones de trozado</i>	16
4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	19
4.1 Simulador de trozado	19
4.1.1 <i>Funciones de valor</i>	19
4.1.2 <i>Prioridad de trozado</i>	21
4.2 Distribución de trozas y volumen	23
4.3 Efecto de la segregación sobre el valor bruto	25
5. CONCLUSIONES	26
6. BIBLIOGRAFÍA	27
ANEXOS	29
1 Abstract and Keywords	
2 Valor (US\$/arb) de cada árbol en cada una de las simulaciones de secuencia.	
3 Volumen (m <sup>3</sup> /arb) de cada una de las simulaciones de secuencia.	
4 Valor medio, mínimo y máximo asignado a cada producto y subproducto.	
5 Pruebas de Hartley y análisis de varianza para establecer la mejor secuencia de productos.	

- 6 Cuadros de distribución de número de productos y volumen según producto.
- 7 Pruebas de Hartley, análisis de varianza y prueba posterior Tukey, para medir el efecto en la segregación de productos.

## INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Radios de las semielipses (Park, 1989).	4
Figura 2.	Largo de internudos, base y tope de los verticilos.	8
Figura 3.	Representación del fuste con diámetros disponibles.	14
Figura 4.	Rango de valores obtenidos para cada tipo de troza.	20
Figura 5.	Volumen por hectárea para 5 simulaciones con distinta prioridad.	21
Figura 6.	Valor bruto por hectárea para 5 simulaciones con distinta prioridad.	22
Figura 7.	Frecuencia de los productos según el nivel de restricciones utilizadas en la simulación.	23
Figura 8.	Distribución del volumen del rodal en los distintos productos según el nivel de restricciones utilizadas en la simulación.	24
Figura 9.	Valor bruto (US\$/árbol) para 3 estrategias de trozado.	25

## ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.	Estadística descriptiva del rodal	10
Cuadro 2.	Especificaciones y restricciones de productos	11
Cuadro 3.	Coefficientes utilizados en el modelo de ahusamiento de Bruce et al. (1968)	15
Cuadro 4.	Procedimiento para realizar el cálculo del LIB.	16
Cuadro 5.	Secuencia de trozado en cada simulación.	17
Cuadro 6.	Funciones de valor y coeficientes de determinación según productos	19

## RESUMEN EJECUTIVO

Se evaluaron distintos esquemas de trozado utilizando un programa simulador de trozado por prioridad que incorpora restricciones dimensionales y restricciones de calidad. Con la información de 25 árboles de un rodal podado de *Pinus radiata* D. Don localizado en la Región de la Araucanía. Se efectuaron diversas simulaciones de trozado en base a una tabla de productos modificada en diversas ocasiones para evaluar los efectos producidos sobre el valor, el volumen y la distribución de los productos.

La asignación de valor a cada tipo de troza se realizó mediante 2 tipos de funciones de valor. El primer grupo de funciones de valor está basado solamente en el diámetro menor de la troza. El segundo incluyó además del diámetro menor, indicadores de calidad como el PLI, LIB, VP y CVP, según corresponda al tipo de troza. La asignación de valor estuvo dentro de los rangos reales en todos los productos excepto en el producto Debobinado Podado.

Se modificó el orden de los 4 productos de mayor valor, obteniendo de esta manera 5 simulaciones diferentes. Sin embargo no se detectaron diferencias significativas de valor ni en el volumen entre simulaciones.

Se analizó el efecto en la distribución de trozas y volumen que producen cambios en las restricciones de los productos. Solamente al flexibilizar las restricciones de calidad (PLI y LIB), se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas. En contraste al eliminar la restricción referida al diámetro máximo de rama, no se produjeron diferencias significativas en la distribución ni en el volumen de los productos.

Se puede concluir que la segregación de productos tiene un efecto sobre el volumen y el valor del rodal. Al incrementar de un solo producto a tres el efecto fue poco notorio. En contraste al llegar a siete productos se produjo un aumento significativo en el valor bruto del rodal.

Palabras clave: Simulación de trozado, *Pinus radiata*, restricciones de calidad, segregación de productos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria forestal es el segundo sector económico con mayores exportaciones en Chile. El año 2007 los retornos producto de las exportaciones del sector alcanzaron los US\$ 4,9 mil millones. En la actualidad existe un total de 2,3 millones de hectáreas de plantaciones, de las cuales el 80% corresponde a *Pinus radiata* D. Don (INFOR, 2008).

El manejo intensivo de las plantaciones ha permitido aumentar el rendimiento y aprovechamiento del recurso (INFOR, 2005). Sin embargo, la productividad de las plantaciones de *P. radiata* es relativamente baja si se compara con países como Nueva Zelanda (Meneses y Guzmán, 2000a). En consecuencia, es necesario desarrollar nuevas técnicas que permitan mejorar los rendimientos y optimizar los sistemas productivos.

Uno de los problemas relevantes en el proceso productivo es asignar eficientemente los recursos de tal manera de maximizar las ganancias (Faaland y Briggs, 1984). Las etapas con mayor potencial de mejoramiento dentro del proceso de transformación del bosque en productos útiles, son el trozado y el aserrío. La decisión de cómo trozar un fuste tiene un impacto directo en el aprovechamiento de la materia prima (Pnevmaticos y Mann, 1972). De esta manera, el operador al definir los cortes y los productos a obtener, determina las ganancias del ejercicio. Estudios relacionados han identificado una pérdida de valor de los fustes entre el 10% y el 35% mediante la comparación entre el rendimiento del trozado manual y la solución óptima (Briggs, 1980; Geerts y Twaddle, 1984; Sessions, 1988).

La decisión de cómo trozar es compleja, aun si se tiene bien definidos los precios y las especificaciones de cada producto. En la práctica se deben considerar múltiples combinaciones de trozas, lo cual resulta imposible de hacer con rapidez en terreno. Como resultado raramente las decisiones de trozado son óptimas, más aun si aumenta la variedad de productos (Geerts y Twaddle, 1984).

A la fecha se han realizado diversas investigaciones sobre sistemas de optimización para solucionar el problema de trozado y aserrío óptimo a nivel de árbol individual, a nivel de rodal y a nivel patrimonial (Laroze, 1999). En el ámbito nacional estos avances han sido poco aprovechados. En la cosecha de bosques en Chile, ha dominado la búsqueda de altos rendimientos más allá de lograr una clasificación adecuada de la materia prima (Meneses y Guzmán, 2000a). Operativamente se utilizan esquemas de trozado en base a prioridad de las trozas de mayor valor o a cierta distribución de trozas fundamentada en la demanda de la industria.

En Chile, el valor potencial a recuperar por el momento es desconocido. Para determinar este valor se requiere conocer el trozado óptimo y el trozado por prioridad como base de comparación. En el trozado por prioridad se privilegian los productos de una lista secuencial preestablecida ordenada en base al valor de los mismos,



mientras que en el trozado óptimo se busca el máximo valor independiente del orden de los productos. Si bien el valor óptimo del trozado no está dentro del alcance de la investigación, se pretende dar un primer paso que permita en futuros estudios determinar la magnitud de recuperación de valor posible de obtener. De esta manera se establecerá la relevancia de incorporar sistemas de optimización y mayor tecnología en el proceso de trozado.

El objetivo general de esta investigación es evaluar el efecto de aplicar distintos esquemas de trozado por prioridad sobre el valor de un rodal y sobre la distribución de trozas. Los esquemas planteados buscan representar diferencias en dos sentidos: en el grado de exigencia de las restricciones de las trozas, y en el nivel de segregación de trozas destinadas a distintos productos finales. Se espera definir el esquema de trozado más apropiado para bosques de estas características, que pueda ser utilizado como base de comparación con una futura optimización.

Para este fin se han establecido los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer el orden de prioridad de trozas que maximiza el valor del rodal.
2. Evaluar el efecto de incorporar restricciones de calidad en la decisión de trozado, en relación a la distribución de tipos de trozas.
3. Estimar la variación del valor bruto del rodal al incrementar la segregación productos.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Proceso de trozado**

Dentro del proceso de transformación del bosque en productos comerciales, se conoce como trozado a la etapa en la cual se cortan los fustes en trozas de menor tamaño en función de dimensiones y características físicas establecidas por la demanda de la industria (Maness y Adams, 1991; Cancino y Arze, 1993; Arce et al 2002). La optimización de trozado consiste en efectuar cortes de tal manera que estos maximicen el valor total del fuste (Sessions, 1988). Los sistemas desarrollados hasta la fecha pueden ser clasificados en términos del nivel de modelación alcanzado: a nivel de árbol individual, a nivel de rodal o a nivel patrimonial (Laroze, 1999).

En cada caso las técnicas varían, aumentando la complejidad gradualmente a medida que se amplía el nivel, no obstante la modelación a nivel de árbol es la base de los siguientes niveles, es el procedimiento es más exhaustivo que requiere de una descripción más detallada del perfil comercial del árbol y de una lista de valores asociados a cada uno de los posibles productos (Kivinen, 2007).

Se ha utilizado una gran variedad de métodos y variables en cada nivel de modelación. Los principales métodos empleados son Programación Lineal, Programación Dinámica, Análisis de Redes y variantes de los mismos (Corvalán, 1992; Wang, 2004). Las variables incluidas se dividen en intrínsecas (dimensiones, forma y calidad del árbol) y en extrínsecas (restricciones en los precios, en la demanda, en el transporte y del proceso de aserrío).

### **2.2 Calidad de trozas**

La calidad de las trozas está dada por los atributos que permiten cumplir o no cumplir con las restricciones de los diferentes tipos de trozas. Los atributos están referidos a la dimensión, a la forma y a las características externas e internas de las trozas. Para diferenciar trozas en función de sus atributos, comúnmente se utilizan índices de calidad de trozas (Villalobos, 2003).

#### *2.2.1 Tamaño y forma*

El tamaño de las trozas se expresa con el largo, el diámetro menor descortezado y el diámetro mayor descortezado. La expresión más común del tamaño es el diámetro menor (Park, 1989), el cual tiene gran incidencia en el aprovechamiento de madera

aserrada Shop 2<sup>1</sup> y mejores para la segunda y tercera troza (Meneses y Guzmán 2000a).

En cuanto a la forma, el indicador de forma que reúne los componentes de curvatura, torcedura, conicidad y ovalidad de las trozas, es el factor de forma (F) que se obtiene mediante la relación entre la forma de la troza y un cilindro (Park, 1989). Mientras mayor es el valor de F, mayor es el aprovechamiento en madera aserrada. La expresión matemática es la siguiente:

$$F = \frac{Cvol}{Lvol} \quad [1]$$

donde:

- $F$  = factor de forma;
- $Cvol$  = volumen de madera común (m<sup>3</sup> ssc);
- $Lvol$  = volumen de la troza sin corteza (m<sup>3</sup> ssc).

La expresión de volumen común (Cvol) más apropiada es una columna calculada a partir de 4 cuartos de elipse (Figura 1).

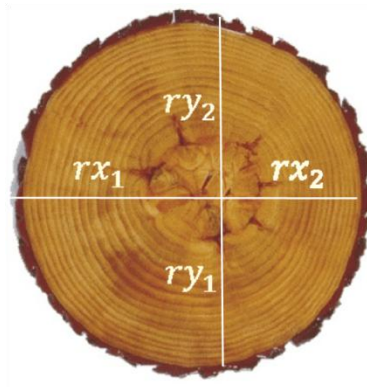


Figura 1. Radios de las semielipses (Park, 1989).

---

<sup>1</sup> Representa un grado intermedio de calidad dentro de la madera clasificada para ser usada en la fabricación de puertas y ventanas.

Los semiejes para estas elipses son el radio mínimo medido desde el centro de la troza en los planos X e Y (Park, 1989). El Cvol se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$Cvol = \frac{\pi \cdot L}{40.000} \cdot [(rx_1 \cdot rx_2) + (rx_2 \cdot ry_1) + (ry_1 \cdot ry_2) + (ry_2 \cdot rx_1)] \quad [2]$$

donde:

- $Cvol$  = volumen de madera común ( $m^3$  ssc);
- $L$  = longitud de la troza (m);
- $rx_1$  = radio mínimo en el plano  $x_1$  (mm);
- $rx_2$  = radio mínimo en el plano  $x_2$  (mm);
- $ry_1$  = radio mínimo en el plano  $y_1$  (mm);
- $ry_2$  = radio mínimo en el plano  $y_2$  (mm).

El volumen de la troza sin corteza (Lvol) se obtiene mediante la sumatoria del volumen de cada una de las secciones en que se divide la troza:

$$Lvol = \sum_{i=1}^n V_i \quad [3]$$

donde:

- $Lvol$  = volumen de la troza sin corteza ( $m^3$  ssc);
- $V_i$  = volumen de la sección  $i$  ( $m^3$  ssc);
- $n$  = número de secciones a lo largo de la troza.

El volumen de cada sección se calcula con el método de cubicación Smalian, expresado como:

$$V_i = \left[ \frac{a_i + A_i}{2} \right] \cdot L_i \quad [4]$$

donde:

- $V_i$  = volumen de la sección ( $m^3$  ssc);
- $a_i$  = área de la sección de diámetro menor ( $m^2$ );
- $A_i$  = área de la sección de diámetro mayor ( $m^2$ );
- $L_i$  = longitud de la sección (m).

### 2.2.2 Indicadores de calidad para trozas podadas

En trozas podadas tanto el índice de troza podada (PLI), como el potencial de madera debobinable (VP) y el potencial de madera *clear* debobinable (CVP), son indicadores estándar de calidad en la industria de la madera.

**Índice de troza podada (PLI).** El índice de troza podada PLI (Pruned log index), desarrollado por Park (1989), es un indicador utilizado para caracterizar trozas y rodales podados. El PLI es un indicador a nivel de troza, y expresa la potencialidad de ésta para producir madera aserrada *clear* a partir de variables medibles. Meneses y Guzmán (2000b) demostraron la utilidad del PLI para evaluar rodales con silvicultura intensiva en Chile. La expresión matemática del PLI es la siguiente:

$$PLI = \left( \frac{D_{1,3} - DCD}{10} \right)^{0,5} \cdot \frac{D_{1,3}}{DCD} \cdot F^{1,6} \quad [5]$$

donde:

- $PLI$  = índice de troza podada;
- $D_{1,3}$  = diámetro a 1,3 metros de altura;
- $DCD$  = diámetro del cilindro defectuoso (mm);
- $F$  = factor de forma.

El diámetro del cilindro defectuoso (DCD) corresponde al diámetro máximo de oclusión localizado a lo largo de la troza. El DCD es el diámetro mínimo que contiene todos los defectos internos relativos a las ramas y a la sinuosidad de la médula. Para su cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$DCD = \frac{[(rox_1 + rox_2) + (roy_1 + roy_2)]}{2}$$

[6]

donde:

- $DCD$  = diámetro del cilindro defectuoso (mm);  
 $rox_1$  = radio máximo de oclusión en el plano  $x_1$  (mm);  
 $rox_2$  = radio máximo de oclusión en el plano  $x_2$  (mm);  
 $roy_1$  = radio máximo de oclusión en el plano  $y_1$  (mm);  
 $roy_2$  = radio máximo de oclusión en el plano  $y_2$  (mm).

**Potencial de madera debobinable (VP).** En el proceso de debobinado la troza se somete a un movimiento giratorio lo cual implica restricciones adicionales en la forma y en la posición del cilindro defectuoso (Park, 1996). El VP (Veneer potential) es un porcentaje que mide la capacidad de una troza para producir chapas (madera debobinada) de cualquier calidad, en función de su tamaño y forma. Su expresión matemática es la siguiente:

$$VP = \frac{Cvol - Rvol}{Lvol} \cdot 100$$

[7]

donde:

- $VP$  = potencial de madera debobinable;  
 $Cvol$  = volumen de madera común ( $m^3$  ssc);  
 $Rvol$  = volumen del cilindro residual ( $m^3$  ssc);  
 $Lvol$  = volumen de la troza sin corteza ( $m^3$  ssc).

**Potencial de madera *clear* debobinable (CVP).** El CVP (Clearwood veneer potential), a diferencia del VP, incorpora el volumen del cilindro defectuoso. De esta manera el CVP es un porcentaje que representa la proporción potencial de la troza para producir chapas con calidad *clear* (Park, 1996). La expresión matemática del CVP es la siguiente:

$$CVP = \frac{Cvol - DCDvol}{Lvol} \cdot 100$$

[8]

donde:

- $CVP$  = potencial de madera *clear* debobinable;
- $Cvol$  = volumen de madera común ( $m^3$  ssc);
- $DCDvol$  = volumen del cilindro defectuoso ( $m^3$  ssc);
- $Lvol$  = volumen de la troza sin corteza ( $m^3$  ssc).

### 2.2.3 Indicadores de calidad para trozas no podadas

Los mejores indicadores de calidad de trozas no podadas están referidos al largo de internudos (Meneses y Guzmán, 2003b). Debido a que esta variable permite estimar el aprovechamiento de madera aserrada de remanufactura (Shop y Finger joint).

**Largo de internudos (LI).** El largo de internudo es la diferencia entre la altura base del verticilo  $n+1$  menos la altura tope del verticilo  $n$  (Figura 2).

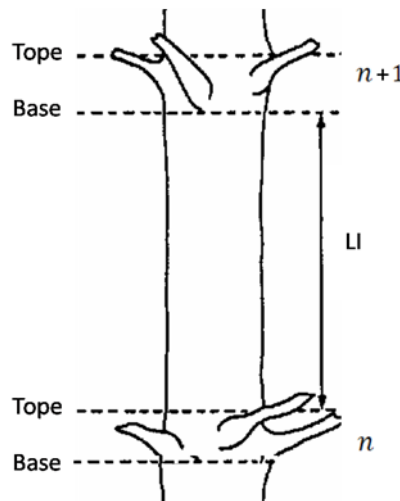


Figura 2. Largo de internudos, base y tope de los verticilos.

**Índice de Internudos (II).** El II es usado a nivel de troza para describir la frecuencia de internudos a lo largo de la troza. Este índice comprende la proporción de todos los largos de internudos mayores a 0,6 metros de largo situados en la troza (Grace y Carson, 1993), su expresión matemática es la siguiente:

$$II_k = \frac{\sum_{i=1}^n l_{ki}}{L} \cdot 100 \quad [9]$$

donde:

- $II_k$  = índice de internado de  $k$  (%);
- $l_{ki}$  = longitud de internado mayor o igual a  $k$  (m);
- $L$  = longitud de la troza (m).

**Largo de Internados Base (LIB).** El LIB representa el largo de internado necesario para tener un índice de internado igual a 0,5 es decir el largo de internado base que se encuentra en el 50 % de la troza. La expresión matemática es la siguiente:

$$0,5 = \frac{\sum_{i=1}^n l_{ki}}{L} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \geq k}{L} \quad [10]$$

donde:

- $k$  = largo de internado base LIB (m);
- $l_i$  = largo de internado (m);
- $L$  = longitud de la troza (m).



### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Datos

La información proviene del Proyecto de Calidad de Rollizos FONDEF D0311128, almacenada en la base de datos del sistema CALIRO 1.0. Los datos corresponden a un rodal de *P. radiata* podado, ubicado en el predio Toltén, Provincia de Cautín, de la Región de la Araucanía.

El rodal fue plantado en 1984 en el predio Toltén, con un índice de sitio de 30 m. Al momento de las mediciones la densidad del rodal fue de 317 arb/ha. Utilizando esta densidad fue posible presentar los valores de árbol individual, a nivel de rodal o por hectárea. El Cuadro 1 muestra valores descriptivos del rodal en base a mediciones realizadas a 25 árboles el año 2005.

Cuadro 1. Estadística descriptiva del rodal.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	CV%
DAP (cm)	36,9	53,5	42,9	11
Altura Total (m)	24,8	31,1	28,4	6
Altura de Poda (m)	3,6	7,1	5,4	14

El muestreo realizado en cada uno de los individuos consideró la medición de las siguientes variables de estado:

- Diámetro a 1,3 m sobre el suelo (DAP), diámetros a 0, 5, 10 y 15 m desde la base del fuste (sin considerar el tocón), altura total, altura de poda y altura del tocón.
- Posición o altura de los verticilos interiores (solo en la sección podada), radio y diámetro de la oclusión en 2 ejes del fuste.
- Diámetro de la rama mayor de cada cuadrante, considerando tres trozas de 5 m.
- Altura de la base y el tope de los verticilos hasta la altura correspondiente al Índice de Utilización (IU).

En base a esta información fue posible calcular para cada troza el diámetro del cilindro defectuoso (DCD), PLI y otros indicadores necesarios para integrar la calidad en el simulador de trozado.

## 3.2 Metodología

### 3.2.1 Tipos de productos y sus restricciones

Los tipos de trozas se denominan productos ya que sus restricciones tienen que ver con su uso final (pulpa, madera aserrable y otras). La información referencial de sus respectivas especificaciones, restricciones y de su valor se establecieron en base a normas de tipificación y valores de Forestal Mininco S.A.

La diversidad de productos utilizada está basada en productos del mercado forestal en Chile. Sin embargo para efectos del estudio se simplificó la lista de productos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Especificaciones y restricciones de productos.

COD.	PRODUCTO	Diámetro menor (cm)	Largo Nominal (m)	Diámetro max. Nudos (cm)	PLI	LIB
DB	Debobinado podado	26 - 80	2,55	100 % Podado	>= 2,5	-
DN	Debobinado nudoso	28 - 80	2,55	JAS 28-32 7 JAS 32 y + 10	-	-
AC	Aserrable Clear A	28 - 60	4,9	100 % Podado	>= 2,5	-
AR	Aserrable Remanufactura	28 - 50	4,9	JAS 28-32 10 JAS 32-50 14	-	>= 0,6
AE	Aserrable Estructural	26 - 50	4,9	JAS 26-50 10	-	-
AI	Aserrable Industrial	18 - 50	3,2	JAS 18-24 7 JAS 24-32 10 JAS 32-50 14	-	-
PU	Pulpable	8 - 50	2,44	-	-	-

Básicamente se mantuvieron los productos principales pero se restringió a un solo largo por producto. En los productos Aserrable Clear A y Remanufactura no se incluyeron las subdivisiones C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, R y R<sub>+</sub> respectivamente, ya que al utilizar funciones de valor en estos productos, se logra un efecto similar.

Para todos los productos se consideró como especificaciones dimensionales de la troza el largo y un rango de diámetro JAS (máximo y mínimo). El diámetro máximo de nudos, el índice de troza podada (PLI) y el largo de internudos base (LIB), fueron las restricciones de calidad, utilizadas según el producto. Se asume que los fustes no presentan otro tipo de defectos como la mancha azul, la pudrición, los bolsillos de

resina, los ojos de pájaro, agrietamientos, astillamientos y abultamientos. Además no se consideró más restricciones de curvatura que las implícitas en el PLI.

### 3.2.2 Asignación de valor

En gran parte de los centros de consumo el precio de las trozas no tiene un valor fijo por m<sup>3</sup>. Por lo tanto, se utilizó funciones de valor que permiten asignar un valor diferenciado en función del diámetro y la calidad de cada troza. Se utilizaron 2 tipos de funciones de valor para diferentes grupos de productos.

**Funciones basadas en la relación precio/diámetro.** El mercado generalmente premia a las trozas de mayor diámetro de un mismo producto con un precio mayor (US\$/m<sup>3</sup>). En consecuencia se determinaron funciones de valor en base al diámetro menor de la troza para los siguientes productos: Debobinado nudoso (DN), aserrable estructural (AE) e industrial (AI). Se obtuvieron, para distintos diámetros, valores de mercado actualizados al 2008. Mediante el método de mínimos cuadrados se ajustó el siguiente modelo de regresión lineal simple:

$$Vd = \beta_0 + \beta_1 \cdot Dm \quad [11]$$

donde:

$Vd$  = valor de la troza en base al diámetro menor (US\$/m<sup>3</sup>);

$Dm$  = diámetro menor de la troza;

$\beta_0$  y  $\beta_1$  = coeficientes del modelo.

**Funciones en base al valor residual.** Otro aspecto que impide utilizar un precio fijo, es la variabilidad de la calidad de la madera en trozas de un mismo producto. Los productos en los cuales se consideró la calidad para asignar valor son: Debobinado podado (DP), Aserrable Clear A (AC) y Remanufactura (AR).

Para ello, se utilizaron funciones de valor residual extraídas del Proyecto Maderas Clear FONDEF D0011159. Las funciones se obtuvieron ajustando modelos con el valor residual de la troza, parámetros de dimensión (diámetro menor) y calidad (PLI, CVP, VP y LIB). El valor residual de la troza fue calculado mediante la sumatoria del valor neto de todas las tablas posibles de extraer, dividido por el volumen de la troza. La expresión matemática es la siguiente:

$$V_C = \frac{\sum_1^n V_{\text{tabla}(i)} \cdot [Pt_{(i)} - Ct_{(i)}]}{Lvol} \quad [12]$$

donde:

- $V_C$  = valor residual de la troza (US\$/m<sup>3</sup>) en base a atributos de calidad;
- $V_{\text{tabla}_i}$  = volumen de la i-ésima tabla (m<sup>3</sup>);
- $Pt_i$  = precio de la tabla (US\$/m<sup>3</sup> FOB puesto planta);
- $Ct_i$  = costo de producción de la tabla (US\$/m<sup>3</sup>);
- Lvol = volumen de la troza (m<sup>3</sup> ssc).

Cada función fue calculada considerando una sección particular del fuste. Para efectos de este estudio, la sección correspondiente a cada función no se consideró en base a su posición a lo largo del árbol, sino según el tipo de troza. Es decir, solo en trozas podadas se utilizó la función correspondiente al producto Debobinable podado y Aserrable Clear que incluyen según el caso el PLI, el CVP y el VP.

En contraste, para el producto Remufactura, la función de troza semipodada se utilizó solamente en trozas con un LIB mayor o igual a 0,6 descartando la posición que tenga en el fuste. Sin embargo es muy probable que las trozas con estas características coincidan con la posición correspondiente a su función de valor, ya que está originalmente se derivó para la segunda y tercer troza, entre los 5 y 15 m.

### 3.2.3 Algoritmo de simulación de trozado

El proceso de simulación se implementó en una rutina computacional utilizando el lenguaje de programación FORTRAN.

La base de datos entrega gran cantidad de información, sin embargo fue necesario calcular y estimar valores de algunas variables para poder obtener los indicadores requeridos.

**Predicción de diámetros fustales.** El primer dato necesario para los cálculos posteriores fue el diámetro a cualquier altura. Fue necesario estimar diámetros ya que las alturas donde se debe evaluar los cortes, raramente coinciden con las alturas de los diámetros dados. La Figura 3. representa los diámetros disponibles a distintas alturas.

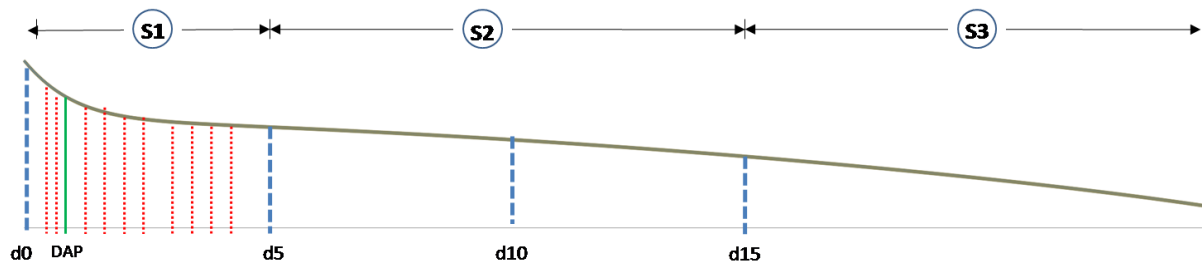


Figura 3. Representación del fuste con diámetros disponibles.

Se delimitaron tres secciones (S1, S2 y S3) en base al tipo de información de diámetro disponible (Figura 3). Consecuentemente, el procedimiento para el cálculo de diámetros fustales fue diferente en cada una de las 3 secciones.

En la primera sección (S1) o sección podada, se cuenta con el diámetro en la posición de cada verticilo representados con líneas rojas punteadas (Figura 3). Adicionalmente se contó con diámetros localizados a 0, 5, 10 y 15 m de altura sin considerar el tocón (d0, d5, d10 y d15).

En el caso que el diámetro desconocido estuvo situado en la sección S1, se utilizaron los diámetros correspondientes a los verticilos más cercanos para interpolar el diámetro desconocido a la altura deseada. Al utilizar estos datos se logra una mayor precisión que al utilizar solamente los diámetros extremos d0 y d5 (Figura 3).

Para estimar los diámetros fustales a alturas entre 5 y 15 no se cuenta con diámetros en cada verticilo. Por lo tanto los diámetros se estimaron interpolando con los diámetros d5, d10 y d15 según corresponda en altura.

Debido a que el último registro de diámetro está ubicado a 15 m del tocón (Figura 3). Para estimar diámetros en alturas superiores se utilizó el siguiente modelo de ahusamiento de Bruce *et al.* (1968):

$$\frac{d_h^2}{d^2} = \beta_1 \cdot x^{1.5} + \beta_2 \cdot A_1 \cdot d + \beta_3 \cdot A_1 \cdot H + \beta_4 \cdot A_2 \cdot d \cdot H + \beta_5 \cdot A_2 \cdot H^{0.5} + \beta_6 \cdot A_3 \cdot H^2 \quad [13]$$

donde:

- $d_h$  = diámetro sin corteza (cm) una altura  $h$ ;
- $d$  = DAP sin corteza (cm);
- $\beta_n$  = coeficientes del modelo;
- $H$  = altura total del árbol (m);
- $h$  = altura fustal (m);

$$\begin{aligned}
 A_1 &= x^{1,5} - x^3 ; \\
 A_2 &= x^{1,5} - x^{32} ; \\
 A_3 &= x^{1,5} - x^{40} ; \\
 x &= \frac{H-h}{H-1,3} .
 \end{aligned}$$

Se utilizaron coeficientes previamente probados en bosques con características similares. El Cuadro 3 muestra los valores de los coeficientes utilizados en el modelo.

Cuadro 3. Coeficientes utilizados en el modelo de ahusamiento de Bruce et al. (1968).

Coeficiente	Valor
$b_1$	0,788368049
$b_2$	-0,004986546
$b_3$	0,021581511
$b_4$	-0,000174624
$b_5$	0,003824906
$b_6$	-0,000001333

Con el objeto de lograr reducir lo más posible el error en la estimación de diámetros, se ponderó los valores obtenidos con el modelo de ahusamiento con la relación existente entre la estimación y el valor real del último diámetro medido que corresponde a d15.

**Índices de calidad.** Con los diámetros y alturas de los extremos de cada posible troza ya calculados, se utilizó la información localizada entre los extremos para calcular los índices requeridos según cada caso aplicando la fórmula matemática correspondiente. Sin embargo, fue necesario definir algunos supuestos y pasos de cálculo utilizados por el simulador.

En caso de la sección podada, el eje geométrico de los datos relevantes asume una troza de 5 m. Para trozas de menor dimensión se asume que la variación del eje geométrico es menor, por consiguiente se utilizó el mismo eje geométrico, tanto para los radios de oclusión como para los radios fustales.

Para el cálculo del VP se asume un diámetro del cilindro residual de 10 cm, ya que es la dimensión más común entre los distintos fabricantes de esta maquinaria. Debido a la naturaleza de los datos de diámetro de ramas, no es posible determinar la altura en la cual se encuentra la rama más gruesa. Solamente se cuenta con el

valor máximo en dos secciones de 5 m de amplitud cada una, de 5 a 10 m y de 10 a 15 m. Durante la simulación, a las trozas que se ubican entre estos valores se les asignó el mayor valor. Para la sección S3, de 15 m de altura en adelante, no existe información de diámetro de ramas. Sin embargo se sabe que el diámetro de las ramas disminuye con la altura, por lo tanto se asume que el diámetro de rama no es limitante en esta sección para ninguno de los productos.

Para el cálculo del LIB primero se debe obtener todos los largos de internudos correspondientes a la troza. Después se ordena los largos de internudos de mayor a menor en una tabla. Se genera una columna con los valores acumulados empezando de mayor a menor. Por último se divide la columna acumulativa por la longitud de la troza. El primer valor de la división que supere o iguale a 0,5 determina la fila correspondiente al LIB.

El Cuadro 4 muestra un ejemplo del cálculo del LIB. En la primera columna se ordenaron los largos de internudos de mayor a menor. En la segunda columna se muestran los valores acumulados, que al ser divididos por la longitud de la troza generan los valores de la última columna.

Cuadro 4. Procedimiento para realizar el cálculo del LIB.

$l_i$ (m)	$l_i$ acumulado (m)	L (m)	$l_i$ acumulado / L
1,16	1,16	5	0,232
0,75	1,91	5	0,382
0,55	2,46	5	0,492
<b>0,51</b>	2,97	5	<b>0,594</b>
0,3	3,27	5	0,654
0,28	3,55	5	0,710

El primer valor igual o superior a 0,5 es 0,594 de la cuarta fila. En esta fila el largo de internudos es 0,51 por lo tanto el LIB es 0,51 m.

### 3.2.4 Evaluación de las simulaciones de trozado

**Secuencia de productos.** Se modificó el orden o secuencia original de los productos dentro de la tabla que utiliza el simulador de trozado. En consecuencia se realizaron 5 simulaciones, cada una con distinto orden de tipo de trozas. En el Cuadro 5. se muestra el orden de los productos en cada una de las cinco simulaciones.

Cuadro 5. Secuencia de trozado en cada simulación.

Simulación	Secuencia
P1	DP → DN → AC → AR → AE → AI → PU
P2	DP → AC → DN → AR → AE → AI → PU
P3	DP → AC → AR → DN → AE → AI → PU
P4	AC → DP → DN → AR → AE → AI → PU
P5	AC → DP → AR → DN → AE → AI → PU

Solamente se realizaron cambios con los primeros cuatro productos (DP, DN, AC y AR), debido a que son los productos de mayor valor. La simulación P1 corresponde al orden original presentado en el Cuadro 2. En la simulación P2 se privilegió a los dos productos que presentaron mayor valor (US\$/m<sup>3</sup>), mientras que en la simulación P3 se privilegió a los tres productos de mayor valor.

Los productos *clear* son excluyentes debido a las dimensiones de los mismos y a la altura de poda del rodal. Por lo tanto, resulta importante evaluar estas cinco secuencias y determinar posibles diferencias. Las simulaciones P4 y P5 se diferencian de P2 y P3 únicamente en el orden de los productos *clear*, de esta manera se espera determinar cuál de ellos debe privilegiarse en el trozado para obtener un mayor valor total. En ambos casos el orden del resto de los productos se mantuvo.

En el análisis estadístico se evaluó diferencias en el valor bruto y el volumen obtenido en cada una de las simulaciones por tipo de producto. El primer paso fue realizar la prueba de homogeneidad de varianza de Hartley. Una vez verificada la homogeneidad, se comprueba si existen diferencias significativas entre las medias mediante un análisis de varianza (ANOVA) entre grupos.

**Distribución de trozas.** En este caso, se realizaron tres simulaciones (PA, PB y PC) donde se modificaron solamente las restricciones de las trozas. La primera simulación (PA), corresponde a la original que contiene todas las restricciones planteadas inicialmente. En contraste, en la tercera simulación (PC) solamente se incluyó restricciones dimensionales (largo y diámetro), dejando sin efecto las especificaciones de calidad. En la segunda simulación (PB), a más de las restricciones dimensionales, se incluyó las restricciones de diámetro máximo de rama correspondientes para cada uno de los productos. En todas estas simulaciones



se utilizó como base la secuencia de productos con mayor valor obtenida en el análisis de secuencia de productos.

Para establecer posibles diferencias de distribución se utilizó como método de análisis de datos categóricos la Prueba de  $\chi^2$ . La prueba se realizó utilizando inicialmente una tabla de contingencia de 3x7, una columna por cada una de las tres simulaciones y siete filas en base a los productos. Además se comparó individualmente cada una de las simulaciones, realizando 3 pruebas adicionales, cada una en base a tablas de contingencia de 2x7. Es decir que se comparó por separado la simulación A con la B, la A con la C y por último la B con la C.

**Segregación de trozas.** Se realizaron tres simulaciones en base a la secuencia de mayor valor, al igual que en la distribución de trozas. El objetivo de estas tres simulaciones es evaluar el efecto que producen en el valor bruto, variaciones en la cantidad de productos. En los tres casos se mantuvieron las restricciones individuales de cada producto.

En la primera se utilizaron todos los productos (PT). La segunda simulación (DP ES PU), se realizó considerando 3 tipos de trozas: Debobinado Podado, Aserrable Estructural y Pulpa. En la tercera simulación se utilizó solamente el tipo de troza pulpable (PU). En este caso se utilizaron estos productos para abarcar todo el rango de precios por  $m^3$  y a su vez para mantener diferentes especificaciones dimensionales.

El análisis, al igual que para el caso de secuencia de productos, se realizó mediante la prueba de homogeneidad de varianza de Hartley y el análisis de varianza (ANOVA) entre grupos. Adicionalmente para los casos en que se encontraron diferencias significativas, se aplicó una prueba de rangos múltiples o análisis de Tukey, que indica cuales medias son significativamente diferentes unas de otras.

## 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Simulador de trozado

#### 4.1.1 Funciones de valor

Se utilizaron seis funciones de valor, una para cada producto con excepción de la pulpa donde se utilizó un valor fijo de 40 US\$/m<sup>3</sup>. Las funciones de valor utilizadas para los productos mencionados se detallan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Funciones de valor y coeficientes de determinación según productos

PRODUCTO	Función de valor	R <sup>2</sup>
Debobinado podado (DP)	$V_c = (1,167 \cdot VP) + (0,451 \cdot CVP)$	0,86
Debobinado nudoso (DN)	$V_d = 41,8484848 + 0,25174825 \cdot Dm$	0,62
Aserrable Clear A (AC)	$V_c = 120,596 - \frac{2.361,175}{Dm} + [27,315 \cdot \ln(PLI)]$	0,67
Aserrable Remanufactura (AR)	$V_c = 43,465 + 0,0002572 \cdot Dm^3 + [2,547 \cdot \exp(LIB)]$	0,71
Aserrable Estructural (AE)	$V_d = 37,7582418 + 0,32417582 \cdot Dm$	0,68
Aserrable Industrial (AI)	$V_d = 27,5710784 + 0,49877451 \cdot Dm$	0,83

Dependiendo del tipo de troza, se utilizó las funciones en base al diámetro menor desarrolladas en este estudio ( $V_d$ ), o las funciones de valor residual extraídas del Proyecto Maderas Clear basadas en atributos de calidad ( $V_c$ ). Las trozas del tipo DP se valoraron en función del VP y CVP. El valor de las trozas AC está dado por el diámetro menor de la troza y por el PLI. Para el caso de trozas AR se utilizó el diámetro menor y el LIB. En el resto de los productos el valor US\$/m<sup>3</sup> está dado únicamente por el diámetro menor de la troza.

Las simulaciones permitieron evaluar el correcto funcionamiento de las funciones de valor. Se utilizaron los valores de cinco simulaciones realizadas en rodal (Cuadro 5). En todos los árboles los resultados de valor siguen una lógica basada en la dimensión y calidad de los mismos.

La Figura 4 representa el contraste entre los rangos obtenidos en la simulación y los rangos reales del mercado nacional, cada uno según el tipo de troza o producto. Las subdivisiones de los productos DN, AR y AI están dadas por las diferentes restricciones de diámetro máximo de nudos en estos productos (Cuadro 2). Se puede apreciar claramente que los productos con mayor amplitud son el Debobinable Podado, Aserrable Clear y Aserrable Remanufactura. En estos productos precisamente es donde se utilizó funciones de valor basadas en atributos o indicadores de calidad.

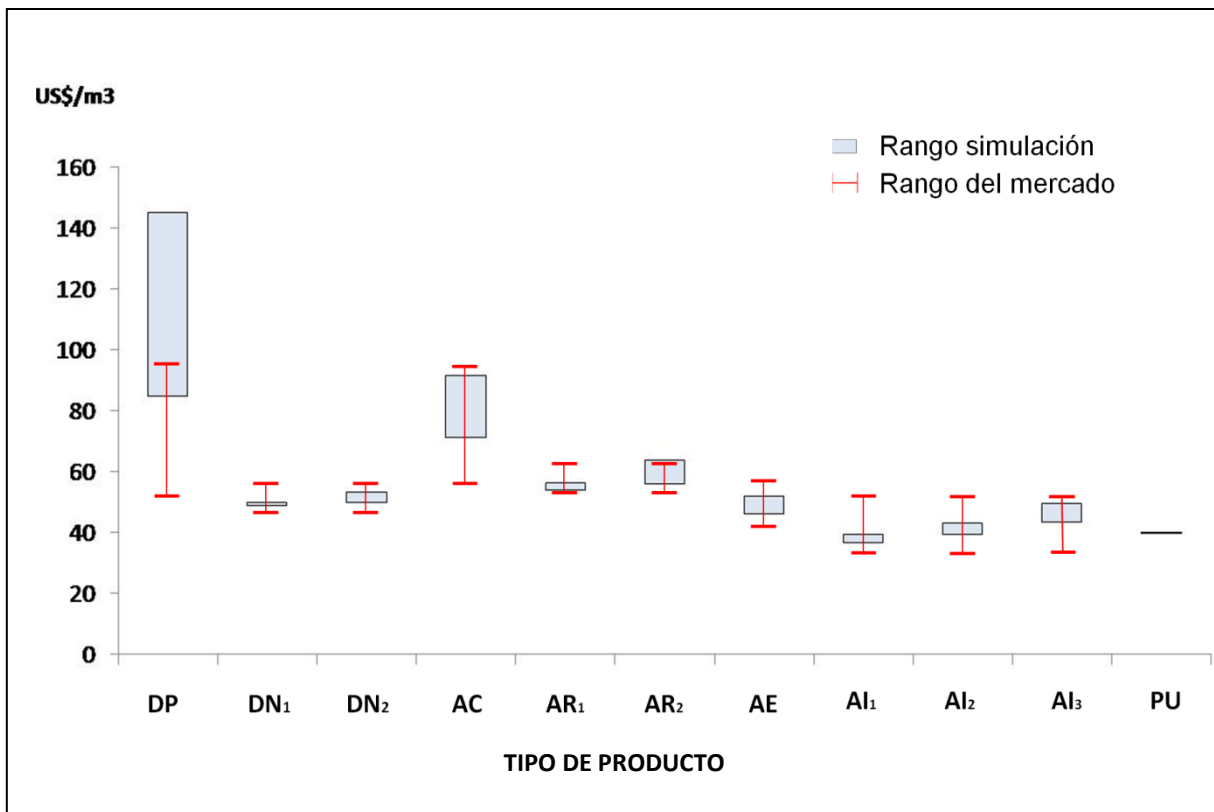


Figura 4. Rango de valores obtenidos para cada tipo de troza.

Los resultados obtenidos con las funciones se encuentran dentro de los rangos observados en el mercado local, excepto para el producto DP. Solamente la función de valor del producto DP sobreestimó los valores de las trozas.

En el mercado local, el valor de este producto presenta un mínimo y un máximo de 50 y 95 US\$/m<sup>3</sup> respectivamente. Sin embargo, en la simulación se observó un mínimo y un máximo de 110 y 145 US\$/m<sup>3</sup> respectivamente. En consecuencia se ajustó la función ponderando con los valores entregados por Forestal Mininco S.A., para mantener los valores dentro del rango real. De esta manera las trozas del tipo DP presentaron un valor mínimo y máximo de 61 y 95 US\$/m<sup>3</sup>, los cuales se encuentran dentro del rango real.

#### 4.1.2 Prioridad de trozado

Se simuló el trozado de todos los productos en todos los árboles variando únicamente su orden o secuencia de los mismos. La simulación P1 corresponde al orden original de la Tabla de Productos. Se alternó el orden de los 4 productos de mayor valor potencial en 5 simulaciones con distinta prioridad.

Las pruebas estadísticas de Hartley determinaron que las varianzas de las cinco simulaciones, en términos de volumen y valor, son homogéneas con un 95 % de confianza. Posteriormente la prueba ANOVA determinó que no hay, en volumen ni en valor, diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las simulaciones con 95 % de confianza.

Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados de volumen y valor bruto por hectárea para las 5 simulaciones.

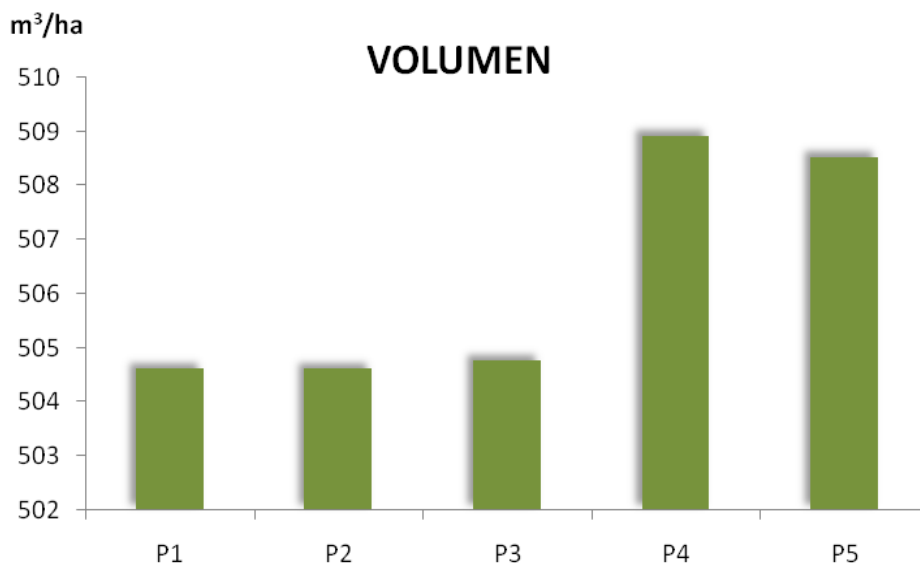


Figura 5. Volumen por hectárea para 5 simulaciones con distinta prioridad.

Aunque estadísticamente no existan diferencias significativas, gráficamente se estableció cual secuencia entrega un mayor volumen y mayor valor bruto total del rodal.

Comparativamente las simulaciones P1, P2 y P3 entregan un volumen muy similar entre ellas y relativamente menor a las simulaciones P4 y P5. Tanto en valor como en volumen las simulaciones P4 y P5 destacan del resto.

Las simulaciones P1 y P2 tienen exactamente el mismo volumen y valor bruto. Esto se explica por el carácter excluyente que tienen entre si los productos DP y AC. La diferencia entre P1 y P2 radica en que en la simulación P2 solamente se intercambi6 lugar el producto DN con AC. Por lo tanto el producto DP mantuvo la primera prioridad anulando la extracci6n de trozas AC.

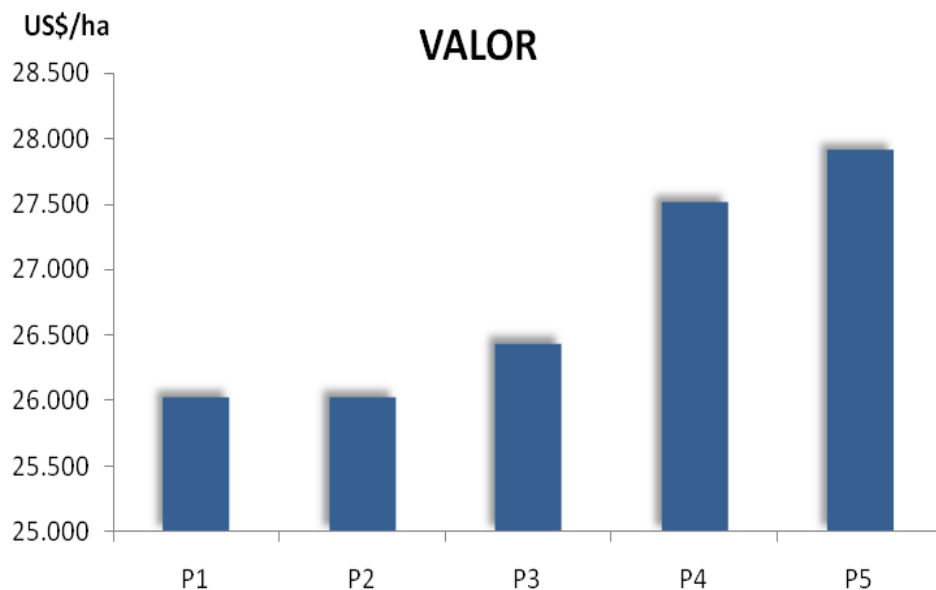


Figura 6. Valor bruto por hect6rea para 5 simulaciones con distinta prioridad.

La simulaci6n P4 present6 el mayor volumen, seguido muy de cerca por P5. Para los an6lisis posteriores se utiliz6 la simulaci6n P5 ya que presenta mayor valor bruto por hect6rea.

## 4.2 Distribución de trozas y volumen

La primera simulación (PA) incluye todas las restricciones originales de cada producto. La simulación PB incluye dimensión (largo y diámetro) y la restricción referida al diámetro máximo de rama. Por último, la simulación PC incluye solamente restricciones de dimensión. La variación en las restricciones de calidad tuvo un marcado efecto sobre la frecuencia de las trozas en cada simulación.

Al realizar la prueba  $\chi^2$  con las tres simulaciones (Tabla 3x7) se determinó que existen diferencias significativas en la distribución del número de productos entre las simulaciones PA, PB y PC.

La prueba del  $\chi^2$  utilizando tablas de contingencia de 2x7 entre PA y PB, y PA y PC, concuerda con el resultado de la prueba realizada en conjunto, existen diferencias significativas en la distribución. Sin embargo al realizar la prueba entre PB y PC no se encontraron diferencias significativas.

La Figura 7 muestra la distribución de tipos de trozas a nivel de rodal para las tres simulaciones. La diferencia de distribución de PA es clara con las simulaciones PB y PC, sin embargo entre las simulaciones PB y PC las diferencias son marginales.

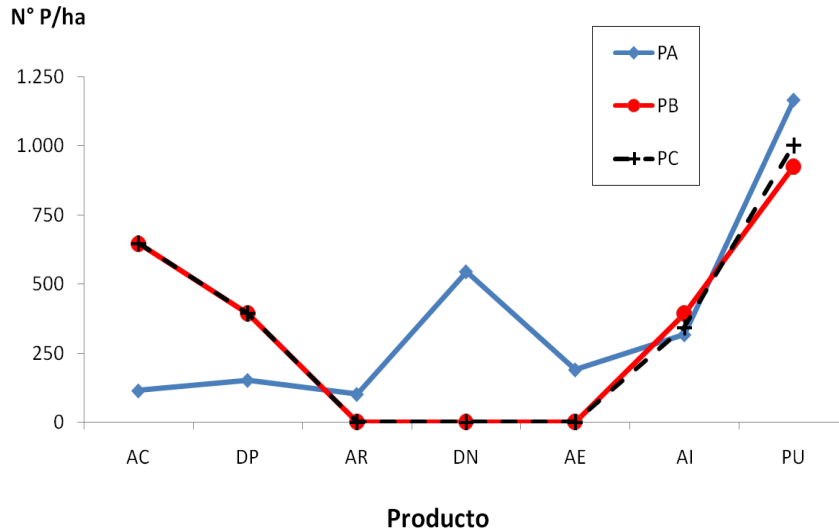


Figura 7. Frecuencia de los productos según el nivel de restricciones utilizadas en la simulación.

El producto pulpable (PU) a pesar de estar situado al último en la lista de prioridad, es el producto que presenta mayor frecuencia en las tres simulaciones. Esto se debe a que es el producto menos restrictivo tanto en términos de calidad como en dimensiones, por lo tanto el cambio de restricciones en el resto de los productos

tiene poco efecto sobre el número de trozas pulpables. En las tres simulaciones la pulpa alcanza cerca del 40 % del total de trozas.

Las trozas industriales por su parte alcanzan solamente entre el 12% y 15% del total de trozas, sin embargo presentan menor variación entre simulaciones, es el tipo de troza que se ve menos afectado por la variación en restricciones de calidad.

Con las condiciones originales, los productos con mayores exigencias tienen menor participación. En la Figura 6 se aprecia que las trozas AC, DP y AR, a pesar de estar en los tres primeros lugares de prioridad, son las que menor frecuencia tienen. En las simulaciones con menos restricciones, la frecuencia de los productos AC y DP se ve incrementada significativamente. En ambas simulaciones (PB y PC), la cantidad del producto AC y DP es igual, lo cual indica que las restricciones de calidad son las que influyen esta variación con respecto a la PA. La frecuencia de los productos AR, DN y AE, prácticamente desaparecen en las simulaciones PB y PC, ya que son absorbidas por los primeros dos productos en prioridad.

Más allá de la frecuencia que presenta cada tipo de troza, el largo de las trozas determina en gran medida la distribución del volumen. La Figura 8 muestra que el producto PU no destaca en volumen con respecto al resto de tipos de trozas, a diferencia de la frecuencia de trozas donde predomina. En contraste las trozas AC tienen una alta participación en el volumen del rodal.

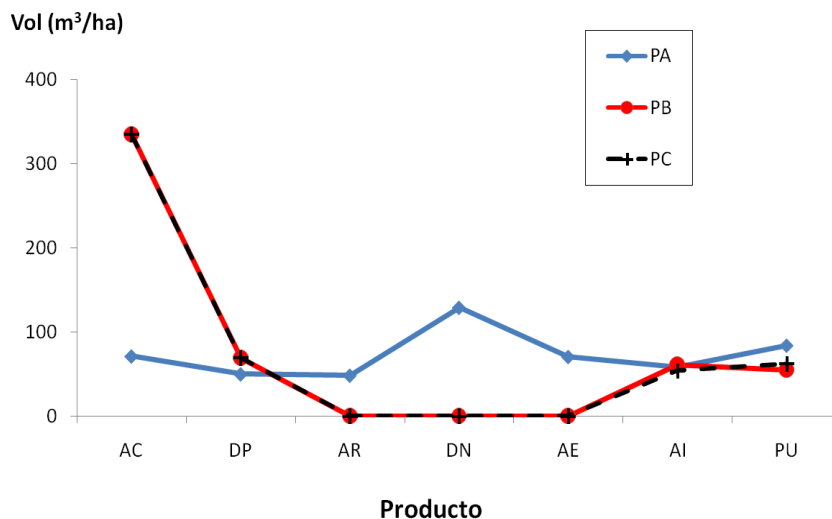


Figura 8. Distribución del volumen del rodal en los distintos productos según el nivel de restricciones utilizadas en la simulación.

### 4.3 Efecto de la segregación sobre el valor bruto

La prueba estadística determinó diferencias significativas entre las medias de las tres simulaciones realizadas. La simulación (DP AE PU) incluye los productos Debobinable Podado, Aserrable Estructural y Pulpa, mientras que PU considera solamente pulpa. La simulación PU actúa de control por lo tanto considera todos los productos.

Las varianzas de los valores de las tres simulaciones son homogéneas. En este caso, a diferencia del volumen, en el valor existen diferencias estadísticamente significativas entre las simulaciones. Los valores de la simulación PT se diferencian significativamente de los valores de las otras simulaciones. Estadísticamente no hay diferencia entre los valores de la segunda y tercera simulación. Por lo tanto el efecto de aumentar de un solo producto a tres es marginal si se lo contrasta con la segregación completa propuesta con la simulación en base a la tabla de productos original (PT).

La Figura 9 representa estas diferencias. Al incluir todos los productos el valor bruto medio de los árboles es significativamente mayor a la simulación DP AE PU que incluye solamente 3 productos y a PU. En este caso, a mayor segregación de productos, mayor resulta el valor bruto del árbol.

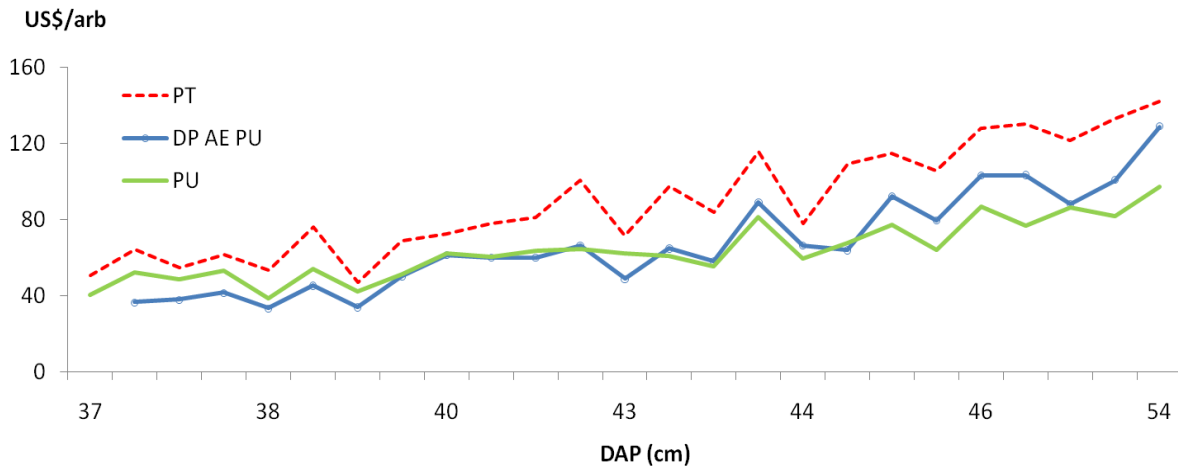


Figura 9. Valor bruto (US\$/árbol) para 3 estrategias de trozado.



## 5. CONCLUSIONES

Las funciones de valor entregaron valores coherentes con las variables que los componen (diámetro menor e indicadores de calidad). Es decir que a mayor calidad o mayor diámetro, mayor valor. Los valores obtenidos están dentro de los rangos reales cada uno de los productos, excepto para el caso del producto Debobinado Podado. Para este caso particular los valores sobrepasaron significativamente a los rangos reales, sin embargo al ajustar la función los valores estuvieron dentro de los rangos reales.

La mayor variación de valores la presentaron los productos donde se utilizó funciones de valor en base a variables de calidad, lo cual resulta útil a la hora de diferenciar los productos de mayor valor y evitar pérdidas de valor.

Al variar la secuencia de los 4 productos de mayor valor en la tabla de productos, no se produjeron diferencias significativas en el volumen ni en el valor de los árboles en los que se realizó la simulación. Sin embargo se debió considerar las diferencias marginales en valor para definir la simulación que se utilizó en los análisis posteriores (P5).

Las simulaciones P1 y P2 entregaron exactamente el mismo volumen y valor. Entre ambas simulaciones solamente se modificó el orden de los productos *clear*. No se logró ver diferencias entre estas simulaciones ya que estos productos son mutuamente excluyentes debido a la restricción de longitud y altura de poda que impide la presencia de ambos productos en un árbol. Futuras investigaciones podrían simular rodales con altura de poda mayores o con productos de menor longitud para de esta manera evaluar diferencias en valor al modificar la posición de estos dos productos en un mismo árbol.

La variación de las restricciones de calidad presentó diferencias significativas en la distribución de productos. Fue necesario contrastar las simulaciones mutuamente para identificar que las diferencias se producen solamente al flexibilizar las restricciones de calidad. Al eliminar las restricciones referidas al diámetro máximo de rama, no se producen diferencias significativas, por lo tanto esta restricción no produce un efecto marcado sobre la distribución.

La distribución y el volumen fueron menos afectados por el cambio en las restricciones en los productos aserrable industrial y la pulpa. El producto aserrable *clear* fue el que presentó mayor aumento tanto en volumen como en frecuencia.

El valor bruto aumento a medida que se incorporaron mayor cantidad de productos. Sin embargo al pasar de un solo producto (pulpa) a tres (pulpa, aserrable estructural y debobinado podado), la diferencia en valor es marginal. Las mayores diferencias en valor se producen con el mayor nivel de segregación evaluado (siete productos).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Arce, J.E., Carnieri, C., Sanquetta, C.R., Filho, A.F. 2002. A forest-level bucking optimization system that considers customer's demand and transportation costs. *Forest Science* 48(3): 492-503.
- Briggs, D.G. 1980. A dynamic programming approach to optimizing stem conversion. Ph.D. thesis. University of Washington. 409 p.
- Bruce, R., Curtiss, L., Van Coevering, C. 1968. Development of a system of taper and volume tables for red alder. *Forest Science* 14, 339-350.
- Cancino, J., Arze, J.B. 1993. Modelo optimizador de trozador basado en funciones de ahusamiento y programación dinámica. Actas Simposio Los Eucaliptos en el Desarrollo Forestal de Chile. INFOR, Pucón, Chile: 513-519.
- Carson, M., Inglis, C.S. 1988. Genotype and location effects on internode length of *Pinus radiata* in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 18(3): 45-53.
- Corvalán, P. 1992. Un Modelo Optimizador de Corta y Trozado en *Eucalyptus globulus*. IUFRO-INFOR. 266-284.
- Faaland, B., Briggs, D. 1984. Log bucking and lumber manufacturing using dynamic programming. *Management Science* 30(2): 245-257.
- Geerts, J.M.P., Twaddle, A.A. 1984. A method to assess log value loss caused by cross-cutting practice on the skidsite. *New Zealand Journal of Forestry* 29(2): 173-184.
- Grace, J.C., Carson, M.J. 1993. Prediction of internode length in *Pinus radiata* stands. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 23(1): 10 – 26.
- INFOR. 2005. Disponibilidad de Madera de plantaciones de pino radiata en Chile. Informe Técnico N° 170. 2003-2032.
- INFOR, 2008. Estadísticas Forestales Chilenas 2007. Boletín Estadístico N°121.
- Kivinen, V-P. 2007. Design and testing of stand-specific bucking instructions for use on modern cut-to-length harvesters. Doctoral Thesis, University of Helsinki, Faculty of Agriculture and Forestry. 65 p.
- Laroze, A. 1999. A linear programming, tabu search method for solving forest-level bucking optimization problems. *Forest Science* 45 (1): 108-116.
- Maness, T.C., Adams, D.M. 1991. The combined optimization of bucking and sawing strategies. *Wood and Fiber Science* 23(2): 296-314.

- Meneses, M., Guzmán, S. 2000a. Productividad y eficiencia en la producción forestal basada en las plantaciones de pino radiata. *Bosque* 21(2): 3-11.
- Meneses, M., Guzmán, S. 2000b. Análisis de la eficiencia de la silvicultura destinada a la obtención de madera libre de nudos en plantaciones de pino radiata en Chile. *Bosque* 21 (2): 85 - 93.
- Meneses, M., Guzmán, S. 2003. Proyecto FONDEF D0011159 "Maderas *Clear*": Informes Finales. Clasificación de rollizos y rodales. Informe N° 5 Proposición de un sistema de clasificación de trozas podadas y no podadas. Valdivia, Universidad Austral de Chile. 164-178.
- Park, J.C. 1989. Pruned log index. *New Zealand Journal of Forestry Science* 19(1): 41-53.
- Park, J.C. 1996. Pruned log evaluation and conversion developments in New Zealand. In: *Presentation to Silvotechna VI*. Concepción, Chile. 26 p.
- Pnevmaticos, S.M., Mann, S.H. 1972. Dynamic programming in tree bucking. *Forest Products Journal* 22(2): 26-30.
- Sessions, J. 1988. Making better tree-bucking decisions in the woods. *Journal of Forestry* 86(10): 43-45.
- Villalobos, E. 2003. Características que determinan el valor residual de trozas no podadas de *Pinus radiata* D. Don. Trabajo de Titulación Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 40 p.
- Wang, J., LeDoux, C.B., McNeel J. 2004. Optimal tree-stem bucking of northeastern species of China. *Forest Products Journal* 54(2): 45-52.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

Abstract and Keywords

## ABSTRACT AND KEYWORDS

A program that simulates bucking to order was developed. It incorporates dimensional specifications and quality constraints. With the information of 25 trees from a pruned stand of *Pinus radiata* D. Don, located at Region de la Araucanía. Diverse bucking simulations were made based on a set of products which were modified in diverse occasions to evaluate the effects taken place on the value, the volume and the distribution of the products.

The value of each log type was carried out by 2 types of value functions. The first group of value functions is only based on the small end diameter of the log. The second included the small end diameter, and quality index like PLI, LIB, VP and CVP, depending on the log type. The assigned values were between the real ranges in all the products except in the product Pruned Veneer.

The order of the 4 products of more value was modified, obtaining 5 different simulations. However they were not significant differences in the gross value neither in the volume among simulations.

The effect in the log distribution and volume that produce changes in the restrictions of the products was analyzed. Only when the quality constraints (PLI and LIB) weren't considered, obtained differences were statistically significant. In contrast, when restrictions referred to the maximum diameter of branch were eliminated, significant differences didn't take place in the distribution, neither in the volume of the products.

Product segregation has an effect on the volume and the value of the stand. A smaller effect was noticed when increasing from a single product to three. In contrast when seven products were considered, a significant effect took place in the gross value of the stand.

Keywords: Bucking simulation, *Pinus radiata*, quality constraints, product segregation

## **ANEXO 2**

Valor (US\$/arb) de cada árbol en cada una de las simulaciones de secuencia.

Valor (US\$/arb) de cada una de las simulaciones de secuencia.

DAP (cm)	Simulación				
	P1	P2	P3	P4	P5
36,9	50,7	50,7	50,7	50,7	50,7
37,2	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3
37,5	54,6	54,6	54,6	54,6	54,6
37,9	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4
38,2	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4
38,5	68,9	68,9	68,9	73,9	76,0
39,2	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0
39,8	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1
40,1	72,7	72,7	72,7	72,7	72,7
40,4	75,6	75,6	75,6	75,6	75,6
41,6	78,3	78,3	81,7	78,3	81,7
42,4	88,4	88,4	88,4	100,9	100,9
42,6	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7
42,7	78,8	78,8	78,8	97,6	97,6
43,4	75,1	75,1	77,5	81,8	83,9
43,5	103,1	103,1	109,2	115,8	115,8
44,1	76,8	76,8	76,8	76,8	76,8
44,2	84,1	84,1	84,1	109,6	109,6
45,2	108,8	108,8	111,3	108,8	111,3
45,3	87,3	87,3	87,3	103,1	106,0
45,9	114,7	114,7	125,5	114,7	125,5
48,5	110,0	110,0	110,0	130,5	130,5
51,5	112,4	112,4	119,6	112,4	119,6
51,8	113,1	113,1	113,1	133,2	133,2
53,5	135,8	135,8	135,8	135,8	135,8
TOTAL	2052,9	2052,9	2085,5	2190,6	2221,9



### **ANEXO 3**

Volumen (m<sup>3</sup>/arb) de cada una de las simulaciones de secuencia.

Volumen (m<sup>3</sup>/arb) de cada una de las simulaciones de secuencia.

DAP (cm)	Simulación				
	P1	P2	P3	P4	P5
36,9	1,119	1,119	1,119	1,119	1,119
37,2	1,295	1,295	1,295	1,295	1,295
37,5	1,219	1,219	1,219	1,219	1,219
37,9	1,343	1,343	1,343	1,343	1,343
38,2	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051
38,5	1,361	1,361	1,361	1,397	1,394
39,2	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
39,8	1,291	1,291	1,291	1,291	1,291
40,1	1,567	1,567	1,567	1,567	1,567
40,4	1,489	1,489	1,489	1,489	1,489
41,6	1,576	1,576	1,581	1,576	1,581
42,4	1,603	1,603	1,603	1,644	1,644
42,6	1,531	1,531	1,531	1,531	1,531
42,7	1,538	1,538	1,538	1,575	1,575
43,4	1,377	1,377	1,377	1,399	1,393
43,5	2,005	2,005	2,034	2,025	2,025
44,1	1,464	1,464	1,464	1,464	1,464
44,2	1,703	1,703	1,703	1,786	1,786
45,2	1,922	1,922	1,922	1,922	1,922
45,3	1,595	1,595	1,595	1,648	1,643
45,9	2,162	2,162	2,145	2,162	2,145
48,5	1,907	1,907	1,907	1,976	1,976
51,5	2,144	2,144	2,139	2,144	2,139
51,8	2,044	2,044	2,044	2,092	2,092
53,5	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44
<b>TOTAL</b>	<b>39,796</b>	<b>39,796</b>	<b>39,808</b>	<b>40,205</b>	<b>40,174</b>

## **ANEXO 4**

Valor medio, mínimo y máximo asignado a cada producto y subproducto.

Valor medio, mínimo y máximo asignado a cada producto y subproducto.

Tipo de troza	Media	Mínimo	Máximo
DP	75,9	60,8	95,1
DN <sup>1</sup>	49,4	48,9	49,9
DN <sup>2</sup>	50,7	49,9	53,2
AC	87,5	71,1	102,3
AR <sup>1</sup>	55,8	55,5	56,3
AR <sup>2</sup>	61,0	57,0	63,9
AE	47,5	46,2	51,9
AI <sup>1</sup>	38,3	36,9	39,5
AI <sup>2</sup>	40,7	39,5	43,2
AI <sup>3</sup>	45,4	43,6	49,6
PU	40,0	40,0	40,0
TOTAL	45,7	36,9	102,3

## **ANEXO 5**

Pruebas de Hartley y análisis de varianza para establecer la mejor secuencia de productos.

Pruebas de Hartley de homogeneidad de varianza del valor bruto.

fcal		ftab
1,3269	<	3,29

Análisis de varianza (ANOVA) del valor bruto.

FV	GL	SC	CM	V. F	V. CRITICO	
					5%	1%
Simulaciones	4	730,721	182,68	0,26	2,45	3,48
Error de estimación	120	85454,4	712,12			
TOTAL	124	86185,1				

Pruebas de Hartley de homogeneidad de varianza del volumen.

fcal		ftab
1,0332	<	3,29

Análisis de varianza (ANOVA) del volumen.

FV	GL	SC	CM	V. F	V. CRITICO	
					5%	1%
Simulaciones	4	0,00730515	0,00182629	0,013	2,45	3,48
Error de estimación	120	16,5379	0,137816			
TOTAL	124	16,5452				

## **ANEXO 6**

Cuadros de distribución de número de productos y volumen según producto.

Tabla de contingencia en base a la frecuencia por hectárea de los productos en tres simulaciones diferenciadas por el grado de restricciones utilizado.

Producto	P5	DMR	DIM
AC	114,1	646,7	646,7
DP	152,2	393,1	393,1
AR	101,4	0,0	0,0
DN	545,2	0,0	0,0
AE	190,2	0,0	0,0
AI	317,0	342,4	393,1
PU	1166,6	1001,7	925,6
TOTAL	2586,7	2383,8	2358,5

Volumen (m3/ha) de los productos en tres simulaciones diferenciadas por el grado de restricciones utilizado.

Producto	P5	DMR	DIM
AC	71,0	334,7	334,7
DP	49,7	69,4	69,4
AR	48,1	0,0	0,0
DN	128,7	0,0	0,0
AE	70,3	0,0	0,0
AI	57,8	53,6	61,0
PU	83,7	62,2	54,6
TOTAL	509,4	519,7	457,6



## **ANEXO 7**

Pruebas de Hartley, análisis de varianza y prueba posterior Tukey, para medir el efecto en la segregación de productos.

Pruebas de Hartley de homogeneidad de varianza del valor bruto.

fcal		ftab
2,6634	<	2,95

Análisis de varianza (ANOVA) del valor bruto.

FV	GL	SC	CM	V. F	V. CRITICO	
					5%	1%
Simulaciones	2	6562,78	3281,39	6,66	3,15	4,98
Error de estimación	72	35457,3	492,462			
TOTAL	74	42020,0				

Contraste Múltiple de Rango: Prueba posterior Tukey.

Sim.	Frec.	Media	Grupos homogéneos
3	25	63,4624	X
2	25	82,6841	X
1	25	83,8743	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	1,19015	15,0217
1 - 3	*20,4119	15,0217
2 - 3	*19,2217	15,0217

\* indica una diferencia significativa.