UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA TIEMPOS DE VOLTEO, DESRAME Y TROZADO EN FAENAS DE APROVECHAMIENTO DE BOSQUE NATIVO, EN LA PROVINCIA DE CAUQUENES

LEONARDO MOYA MUÑOZ

Tesis para optar al grado de:
INGENIERO FORESTAL

PROFESOR GUÍA: DARÍO AEDO ORTÍZ

TALCA – CHILE

2005

UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES.
ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

El Sr. Leonardo Amdres Moya Muñoz, ha realizado la Memoria: **"Modelación matemática para tiempos de volteo, desrame y trozado en faenas de aprovechamiento de bosque nativo en la Provincia de Cauquenes"**, como uno de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Forestal. El Profesor Guía es el Sr. Darío Aedo Ortíz .

La comisión de Calificación constituida por los profesores Sr. Darío Aedo Ortíz y el Sr. Oscar Vallejos Barra, han evaluado con nota 6,1 (seis coma uno).

MARCIA VASQUEZ SANDOVAL
DIRECTORA
ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

Talca, Agosto de 2003.

RESUMEN

Se obtuvieron regresiones lineales y distribución de probabilidad para los tiempos incurridos en las labores propias de raleo de *Nothofagus glauca* (Hualo) en la Provincia de Cauquenes.

Las actividades en que se dividió el ciclo de volteo fueron: desplazamiento del operario, preparación del sitio de volteo, volteo, desrame y trozado. En el caso del tiempo de desplazamiento se obtuvo un modelo de regresión lineal, cuyas variables explicativas fueron la densidad de sotobosque, la pendiente del terreno y la distancia recorrida por el operario. Los tiempos de volteo y desrame y trozado, se modelaron mediante regresiones simples, con las variables explicativas DAP y altura total del árbol respectivamente.

El tiempo de preparación del sitio de volteo, no presentó una correlación satisfactoria con las variables del rodal. La distribución Lognormal, fue la mejor función de densidad de probabilidad para ajustar los datos.

Los objetivos de productos finales a obtener y características de los árboles remanentes determinaron la intensidad y tiempo empleados en volteo.

SUMMARY

Linear regressions and probability density functions were obtained for felling activity times in thinning operations of *Nothofagus glauca* at Cauquenes country.

The felling cycle activities were: operator movement, felling place preparation, felling and delimbing-bucking. For operator movement time was obtained a linear regression with the explained variable underfory density, slope and movement distance. Felling and delimbing-backing times were modeled by a simple regression with DBH and height as explained variable respectively.

The time for felling place preparation was not modeled successfully by a linear regression. The Lognormal distribution was the best probability density function that fitted the data.

The goals of final product and remaining tree characteristics determined the intensity and time used in felling.

ÍNDICE

Página

1.- INTRODUCCIÓN..... 1

2.- OBJETIVO..... 3

3.- ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS..... 4

3.1.- Proyecto "Conservación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo PCMSBN"..... 4

3.2.- Renovales de Hualo..... 5

3.3.- Silvicultura en bosques secundarios de *Nothofagus*..... 6

3.4.- Antecedentes de operación para el uso de motosierra en faenas de volteo, desrame y trozado..... 8

3.5.- Modelos de Regresión Lineal..... 9

3.5.1.- Análisis de relación entre variables.....10

3.5.2.-Supuestos básicos para modelos de regresión lineal.....11

3.5.3.- Prueba de significancia para los coeficientes de regresión.....13

3.5.4.- Coeficiente de determinación..... 15

4.- METODOLOGÌA.....16

4.1.- Materiales.....16

4.2.- Área de estudio.....16

4.3.- Descripción de las labores realizadas.....17

4.4.- Variables de interés.....18

4.6.- Obtención de funciones de tiempo..... 20

5.- PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....21

5.1.- Modelos de regresión lineal..... 22

5.1.1.-Modelo para tiempo de desplazamiento.....22

5.1.2.- Modelo para tiempo de volteo..... 23

5.1.3.- Modelo para tiempo de desrame y trozado..... 25
5.1.4.- Ajuste de funciones de distribución de probabilidad
para tiempo de preparación del sitio de volteo..... 26
5.2.- Análisis del error promedio para los modelos obtenidos..... 27

6.-CONCLUSIONES..... 29

7.-BIBLIOGRAFÍA.....31

APÉNDICE 1. Base de datos..... 33
APÉNDICE 2. Ajuste de modelos para tiempo de desplazamiento.....36
APÉNDICE 3. Ajuste de modelos para tiempo de volteo.....56
APÉNDICE 4. Ajuste de modelos para tiempo de desrame y trozado.....69
APÉNDICE 5: Ajuste de función de distribución de probabilidades
para tiempo de preparación del sitio de volteo.....77

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro Página

1. Rango de las variables del modelo para tiempo de desplazamiento.....23
2. Rango de la variable del modelo para tiempo de volteo..... 25
3. Rango de la variable del modelo para tiempo de desrame y trozado.....26
4. Error promedio obtenido para cada componente del ciclo del trabajo..... 27
5. Error promedio obtenido para el tiempo total del ciclo..... 28
6. Matriz de correlación asociada al juste de modelos para tiempo de desplazamiento.....37
7. Análisis de regresión del modelo 1 para tiempo de desplazamiento.....38
8. Análisis de varianza del modelo 1 para tiempo de desplazamiento.....38
9. Análisis de regresión del modelo 2 para tiempo de desplazamiento.....41
10. Análisis de varianza del modelo 2 para tiempo de desplazamiento.....41
11. Análisis de regresión del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.....43
12. Análisis de varianza del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.....43
13. Análisis de regresión del modelo 4 para tiempo de desplazamiento.....45
14. Análisis de varianza del modelo 4 para tiempo de desplazamiento.....45
15. Análisis de regresión del modelo 5 para tiempo de desplazamiento.....47
16. Análisis de varianza del modelo 5 para tiempo de desplazamiento.....47
17. Análisis de regresión del modelo 6 para tiempo de desplazamiento.....49
18. Análisis de varianza del modelo 6 para tiempo de desplazamiento.....49
19. Análisis de regresión del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.....51
20. Análisis de varianza del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.....51
21. Análisis de regresión del modelo 8 para tiempo de desplazamiento.....53
22. Análisis de varianza del modelo 8 para tiempo de desplazamiento.....53
23. Resumen estadístico de las variables utilizadas en el ajuste de modelos para tiempo de desplazamiento.....55
24. Matriz de correlación asociada al ajuste de modelos para tiempo de volteo.....57
25. Análisis de regresión del modelo 1 para tiempo de volteo.....58

26. Análisis de varianza del modelo 1 para tiempo de volteo.....58
27. Análisis de regresión del modelo 2 para tiempo de volteo.....60
28. Análisis de varianza del modelo 2 para tiempo de volteo.....60
29. Análisis de regresión del modelo 3 para tiempo de volteo.....62
30. Análisis de varianza del modelo 3 para tiempo de volteo.....62
31. Análisis de regresión del modelo 4 para tiempo de volteo.....64
32. Análisis de varianza del modelo 4 para tiempo de volteo.....64
33. Análisis de regresión del modelo 5 para tiempo de volteo.....66
34. Análisis de varianza del modelo 5 para tiempo de volteo.....66
35. Resumen estadístico de las variables utilizadas en el ajuste de modelos para tiempo de volteo.....68
36. Matriz de correlación asociada al ajuste de modelos para tiempo de desrame y trozado.....70
37. Análisis de regresión del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.....71
38. Análisis de varianza del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.....71
39. Análisis de regresión del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.....73
40. Análisis de varianza del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.....73
41. Análisis de regresión del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.....75
42. Análisis de varianza del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.....75
43. Valores obtenidos para el ajuste de funciones de distribución de probabilidades para tiempo de preparación del sitio de volteo.....77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Página

1. Gráficos bidimensionales correspondientes al ajuste de modelos para tiempo de desplazamiento.....36
2. Gráfico de residuos del modelo 1 para tiempo de desplazamiento.....39
3. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 1 para tiempo de desplazamiento.....40
4. Gráfico de residuos del modelo 2 para tiempo de desplazamiento.....42
5. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 2 para tiempo de desplazamiento.....42
6. Gráfico de residuos del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.....44
7. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.....44
8. Gráfico de residuos del modelo 4 para tiempo de desplazamiento.....46
9. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 4 para tiempo de desplazamiento.....46
10. Gráfico de residuos del modelo 5 para tiempo de desplazamiento.....48
11. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 5 para tiempo de desplazamiento.....48
12. Gráfico de residuos del modelo 6 para tiempo de desplazamiento.....50
13. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 6 para tiempo de desplazamiento.....50
14. Gráfico de residuos del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.....52
15. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.....52
16. Gráfico de residuos del modelo 8 para tiempo de desplazamiento.....54
17. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 8 para tiempo de desplazamiento.....54

18. Gráficos bidimensionales correspondientes al ajuste de modelos para tiempo de volteo.....56
19. Gráfico de residuos del modelo 1 para tiempo de volteo.....59
20. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 1 para tiempo de volteo.....59
21. Gráfico de residuos del modelo 2 para tiempo de volteo.....61
22. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 2 para tiempo de volteo.....61
23. Gráfico de residuos del modelo 3 para tiempo de volteo.....63
24. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 3 para tiempo de volteo.....63
25. Gráfico de residuos del modelo 4 para tiempo de volteo.....65
26. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 4 para tiempo de volteo.....65
27. Gráfico de residuos del modelo 5 para tiempo de volteo.....67
28. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 5 para tiempo de volteo.....67
29. Gráficos bidimensionales correspondientes al ajuste de modelos para tiempo de desrame y trozado.....69
30. Gráfico de residuos del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.....72
31. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.....72
32. Gráfico de residuos del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.....74
33. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.....74
34. Gráfico de residuos del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.....76
35. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.....76

1.- INTRODUCCIÓN

El bosque nativo chileno alberga un enorme potencial de desarrollo social, cultural y económico para el país. En Chile, más de trece millones de hectáreas, equivalentes al 17% del territorio están cubiertas por este recurso, concentrándose mayoritariamente (en un 93%) entre las regiones Séptima y Undécima. Bajo una planificación adecuada, 6,9 millones de hectáreas están en condiciones de convertirse en un recurso productivo importante para miles de pequeños y medianos propietarios, a través de un manejo que, además, asegure que el recurso se mantenga e incluso mejore en el tiempo (CONAF, 2004).

Actualmente, a pesar del potencial desarrollo económico y social que representa el bosque nativo para nuestro país, las prácticas realizadas especialmente por pequeños y medianos propietarios, carecen de una planificación adecuada. Además, los bajos niveles de mecanización presentes en estas faenas, no permiten obtener los rendimientos y productividad necesarios para el desarrollo de las familias y comunidades, cuyos ingresos económicos provienen en gran parte del aprovechamiento de este recurso. En este sentido, iniciativas como: políticas gubernamentales que incentiven la inversión; y la apertura de líneas de investigación relacionadas con la actividad, son entre otras, fundamentales para optar a un desarrollo económico, social y cultural, acompañado de un aprovechamiento sustentable del bosque nativo chileno.

En cuanto a la investigación, la generación de herramientas para una adecuada planificación de las intervenciones, es fundamental para optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles que en su mayoría son escasos. De esta forma, el uso de modelos matemáticos relacionados con los tiempos incurridos en las actividades propias de raleo en bosque nativo, es una alternativa válida para lograr niveles de planificación adecuados.

El presente estudio se basa en la obtención regresiones lineales o funciones de distribución de probabilidades, asociadas a los tiempos incurridos en labores propias de un raleo, realizado sobre un renoval de *Nothofagus glauca* (Hualo). Cabe destacar además, que este tipo de intervención, es una de las alternativas más utilizadas por pequeños y medianos propietarios en la obtención de productos provenientes del bosque nativo.

2.- OBJETIVO

Modelar matemáticamente tiempos de volteo, desrame y trozado en faenas de raleo de bosque nativo en la provincia de Cauquenes.

3.- ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

3.1.- Proyecto "Conservación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo PCMSBN".

El Proyecto Conservación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo contempla áreas de desarrollo desde la Séptima a la Undécima Región. Para la Región del Maule las áreas de desarrollo se encuentran en las provincias de Talca, Linares y Cauquenes. Precisamente en esta última es donde se realizó el presente estudio. El Proyecto posee como objetivos fundamentales: contribuir al manejo sustentable del bosque nativo por parte de pequeños propietarios; permitir el mejoramiento de las condiciones económicas de las familias campesinas a través de la actividad forestal; fortalecer la asistencia técnica de CONAF hacia los pequeños propietarios; simular un sistema de subsidio para el manejo del bosque nativo (CONAF, 2004).

La primera etapa del proyecto comprendió un período de cinco años, culminando el segundo semestre del año 2002. Durante este periodo se constituyeron las siguientes áreas de trabajo: elaboración de planes de ordenación; incentivos al manejo de bosque nativo; sistema de extensión forestal; apoyo a la comercialización. En una segunda etapa, la cual se encuentra actualmente en proceso, se desarrollan ciertos aspectos con una mayor intensidad con respecto a la primera fase, estos son: fortalecimiento del concepto de Área de Desarrollo, con el fin de mejorar y focalizar el impacto del proyecto; se incorpora a medianos propietarios al sistema de incentivos para que se constituyan en ejemplos positivos para los pequeños propietarios; se fortalece la comercialización de productos forestales para incorporar el manejo de bosques sin incentivos directos (CONAF, 2004).

3.2.- Renovales de Hualo

El bosque nativo a nivel nacional alcanza una superficie de 13.430.602 ha. Los principales tipos forestales constituyentes de este recurso y su porcentaje de superficie corresponden a las siguientes: Siempreverde 30,9%, Lenga 25,3%, Coigue de Magallanes 13,4%, Roble-Raulí-Coigue 10,9%, Ciprés de la Guaitecas 7,2%, Coigue-Raulí-Tepa 4,2%, Esclerófilo 2,5%, Alerce 2,0%, Araucaria 1,9%, Roble-Hualo 1,4% y Ciprés de la Cordillera con un 0,3%. La superficie de bosque nativo presente en la Región del Maule es de 370.329 ha, correspondientes al 2,8% del total nacional. Dentro de la VII Región el recurso bosque nativo se presenta en un 3,7% como bosque adulto, 86,7% como renovales, 6,7% como bosque adulto renoval y en un 2,8% como bosque achaparrado. Los principales tipos forestales presentes en la región y su porcentaje a nivel de superficie son: Roble-Raulí-Coigue 42,9%, Roble Hualo 40,0%, Esclerófilo 14,9% y Ciprés de la Cordillera 2,1% (UACH *et al*, 1999).

La distribución geográfica del tipo forestal Roble-Hualo se sitúa desde el cerro La Campana hasta el río Itata por los sectores altos de la Cordillera de la Costa y desde Colchagua al río Ñuble, entre los 400 a 1000 msnm, por la Cordillera de los Andes. El clima característico de esta zona es mediterráneo húmedo, con un régimen de precipitaciones que fluctúa entre los 500 a 1000 mm/año en la costa y entre los 1000 a 2000 mm/año en la Cordillera de los Andes. El marco fisiográfico común para el desarrollo de este tipo forestal son las zonas montañosas. El tipo forestal Roble-Hualo crece en el sector costero generalmente sobre suelos desarrollados sobre rocas graníticas en su mayoría residuales y en suelos poco profundos, de textura franca, formados sobre esquistos. En el sector andino este tipo forestal se encuentra generalmente asociado a suelos generados a partir de rocas graníticas y conglomerados volcánicos, los cuales dan origen a suelos trumaos (Donoso, 1981).

3.3.- Silvicultura en Bosques Secundarios de *Nothofagus*

Prácticamente todos los bosques de crecimiento secundario en nuestro país, han sido intervenidos tardíamente, en aquellos casos donde se ha aplicado raleo. Esta situación implica utilizar criterios de manejo que se adecuen a estas situaciones específicas. Si se trata de bosques de *Nothofagus* jóvenes, los criterios silvícolas a emplear, deben adecuarse a éstos, siendo en algunos aspectos diferentes a las situaciones de rodales maduros. De acuerdo a experiencias prácticas documentadas realizadas en bosques de segundo crecimiento y plantaciones de Raulí, Roble y Coigüe es posible definir algunas acciones silviculturales, en donde el silvicultor debe guiarse por los cambios en la dinámica del bosque y la estructura del rodal (Donoso y Lara, 1998).

El mismo autor plantea que una aplicación de esto corresponde a la utilización del criterio del árbol futuro, el cual considera según grado de importancia: viabilidad, calidad del fuste y el espaciamiento en el manejo del rodal, como criterios fundamentales para el raleo. En pie quedan los árboles que califican para el objetivo establecido, que normalmente corresponde a un producto de alto valor como rollizos para madera foliada y/o aserrada.

En una etapa anterior, cortas de limpieza pueden contribuir a reducir el monte bravo sobredenso a rodales penetrables, en los cuales se pueda realizar la primera selección de individuos. Clareos posteriores y cortas de saneamiento, generan la base para afirmar la selección de árboles futuros. Cuando el rodal llega a una altura de 8 a 12 m, y mantiene una densidad de 1000 o más árboles por hectárea, debe realizarse la selección de aproximadamente 400 individuos futuros. Si al final de la rotación quedan 200 a 300 árboles, se abrían seleccionado 100 a 200 árboles futuros de reserva. La liberación paulatina de los árboles seleccionados se maneja extrayendo en cada intervención un número de competidores directos por cada uno de ello. Esto ocurre básicamente en el estrato

dominante y codominante, lo que significa aplicar raleos por lo alto. Entonces no debería alterarse sustancialmente el estrato intermedio, el cual cumplirá con mantener las condiciones microclimáticas de protección para los árboles elegidos para la cosecha final, evitar los daños de insolación en la corteza, evitar el secamiento superficial del suelo, la formación de epicornios y la proliferación extrema del sotobosque y el desarrollo vigoroso de renuevos de tocón (Donoso y Lara, 1998).

Los estratos intermedio y bajo están básicamente formados por especies arbóreas tolerantes, muchas de las cuales también son de alto valor maderero. Como su ritmo de crecimiento es más lento que el de los *Nothofagus*, podrían perdurar durante más de una generación de éstos. Si este fuera uno de los objetivos de manejo de un bosque, se pueden considerar algunos raleos al estrato intermedio, con el único objetivo de generar espacio para los mejores árboles tolerantes. Al realizar la cosecha el estrato intermedio podría quedar en pie, proyectándose hacia la siguiente generación de *Nothofagus,* en los espacios abiertos dejados para la cosecha (Donoso *et al.*, 1998).

Esquemas de manejo como el propuesto requieren de mano de obra altamente calificada y son de alta exigencia técnica para el silvicultor. El hecho que prácticamente todos los renovales se estén interviniendo tardíamente implica que se debe tomar especial cuidado en no desestabilizarlos con raleos muy fuertes. En este sentido, ya las primeras experiencias documentadas sobre el manejo de renovales, recomiendan intervenciones moderadas. Para renovales de 10 a 15 años de edad se señala la necesidad de estabilizar la masa forestal a través de un prerraleo, dejando en pie 2200 a 2500 árboles por hectárea. De ahí en adelante se sugieren intervalos de 10 a 12 años pero, extrayendo el 30 al 35 % del área basal en cada uno de ellos. Si el objetivo para un rodal es maximizar su calidad y valor, las intervenciones al estrato dominado no ayudan a este fin. Como se planteó anteriormente, este tipo de intervención toma sentido cuando se

pretende proyectar especies tolerantes a la siguiente generación de *Nothofagus* (Donoso y Lara, 1998).

3.4.- Antecedentes de Operación para el Uso de Motosierra en Faenas de Volteo, Desrame y Trozado

Según Hernández (1985), el volteo de árboles en pie es el trabajo más peligroso dentro de las operaciones forestales, por este motivo requiere de personal altamente calificado y con una rutina de trabajo cuidadosamente planeada. El motosierrista de volteo debe operar a una distancia mínima de 2,5 veces la altura del árbol, al lugar de volteo más próximo. Esta distancia puede ser aumentada cuando la visibilidad en el bosque es escasa.

Al dar inicio a la operación de volteo, lo más importante es considerar la dirección de caída de los árboles, lo cual requiere considerar los siguientes factores: organización de la faena; inclinación y centro de gravedad del árbol; dirección del viento; topografía y pendiente; tamaño y forma de las ramas; distribución de la copa; obstáculos (troncos, ramas, etc.); tiempo atmosférico.

Una vez determinada la dirección de caída del árbol, las herramientas y accesorios anexos se deben colocar en sentido opuesto, luego se debe limpiar el área de trabajo y despejar las rutas de escape. Luego de tener en cuenta todos estos factores, se procede al volteo propiamente tal. En cuanto al desrame, una forma de facilitar esta labor es volteando un árbol en forma perpendicular al avance, con el fin de utilizarlo como banco de trabajo en el desrrame de los posteriores individuos. Empleando este método el trabajo de desrrame puede llevarse a cabo a una altura de trabajo cómoda, y por ende haciendo un menor esfuerzo.

Las técnicas a utilizar en labores de trozado tienen relación con la forma en que se presenta el árbol. En este sentido se puede dar el caso de árboles normales y árboles sometidos a tensión. Para superar las condiciones y desarrollar la operación con normalidad, se debe emplear los dos tipos de corte empleados comúnmente con esta herramienta (cadena tirando y cadena empujando), según como lo requiera la situación.

3.5.- Modelos de Regresión Lineal

Según Gujarati (1997), una regresión lineal permite determinar la dependencia de una variable (variable dependiente) respecto de una o más variables explicativas (variables independientes). El objetivo es proveer de una herramienta que permita estimar o predecir el valor promedio poblacional de la variable dependiente, en función de valores específicos de la o las variables explicativas. Si la dependencia es con una única variable explicativa el análisis de regresión es simple. Por el contrario, si el análisis de regresión involucra más de una variable independiente, se trata de un análisis múltiple.

El mismo autor plantea que una primera hipótesis de trabajo en el análisis de regresión lineal, es que existe un modelo lineal entre la variable dependiente y explicativas del tipo $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + ... + \beta_i X_i$, donde los β_i son parámetros desconocidos, pero fijos, llamados coeficientes de regresión poblacional. El interés del análisis de regresión es encontrar los valores estimados (estimadores) de estos coeficientes, en base a las observaciones obtenidas.

El método comúnmente usado para obtener una regresión lineal, es el método de los mínimos cuadrados (MCO). Este método hace que los coeficientes de regresión muestral se ajusten lo más posible a los verdaderos coeficientes de regresión poblacionales. El método opera minimizando la suma de los residuos

observables al cuadrado (e_i^2), con el fin de ajustar la regresión muestral. Los residuos corresponden a las diferencias entre los valores observados y los valores estimados de la variable dependiente. Estos valores representan a todas las variables que no están incluidas en el modelo de regresión, que colectivamente pueden afectar a la variable dependiente (Gujarati, 1997).

3.5.1.- Análisis de relación entre variables

El método más usado para el análisis de las relaciones bivariantes es el gráfico de dispersión, un gráfico de puntos basados en dos variables, presentándose una variable en el eje horizontal y la otra en el eje vertical. Las variables pueden corresponder a valores observados, valores esperados o incluso residuos. Los puntos del gráfico representan los correspondientes valores conjuntos de las variables para cualquier caso dado. El patrón de los puntos representa la relación que existe entre las variables. Cuando los puntos se organizan a lo largo de una línea recta, existe una relación lineal de correlación, por otro lado, un conjunto de puntos curvados puede indicar una relación no lineal. En el caso de presentarse un conjunto de puntos aparentemente aleatorios, se puede afirmar que no existe relación entre las variables (Hair *et al.*, 1999).

El mismo autor plantea que la forma más utilizada para este análisis es la matriz de gráficos de dispersión. En ésta se representa el gráfico de dispersión para todas las combinaciones posibles de las variables estudiadas.

3.5.2.- Supuestos básicos para modelos de regresión lineal

La calidad de la estimación de un modelo de regresión lineal está sujeta al cumplimiento de los supuestos básicos que la definen, y estos son: normalidad, homocedasticidad y ausencia de multicolinealidad.

En relación con el supuesto de normalidad, este asume que las perturbaciones de la población o residuos muestrales, están distribuidos de forma normal. Una propiedad de esta distribución es que cualquier función lineal de variables normales, será también normal. Bajo este supuesto las distribuciones de probabilidades de los estimadores MCO pueden obtenerse fácilmente (Gujarati, 1997). Una forma simple de comprobar este supuesto es a través del análisis gráfico de los residuos, con el eje de las ordenadas en escala normal. Si la curva de la función de distribución acumulada se asemeja a una línea recta, permitiendo pequeñas desviaciones, se aceptaría el cumplimiento del supuesto. Por otra parte éste puede ser verificado cuantitativamente a través del estadístico de prueba de bondad de ajuste Kolmogorov Smirnov K_S (Cid *et al.,* 1990).

El cumplimiento del supuesto de normalidad permite aseverar que: los estimadores muestrales de β_i y σ^2 son insesgados, su valor promedio o esperado es igual al valor verdadero; son eficientes, poseen varianza mínima; y son consistentes, convergiendo hacia sus verdaderos valores poblacionales a medida que el tamaño muestral aumenta asintóticamente. En consecuencia, se puede afirmar que los estimadores MCO son los mejores estimadores lineales insesgados (MELI) de los parámetros poblacionales (Gujarati, 1997).

El supuesto de homocedasticidad está asociado al cumplimiento de varianzas constantes para distintos niveles de la variable explicativa, es decir, las perturbaciones tienen la misma varianza. Por el contrario, la existencia de heterocedasticidad indica que los estimadores siguen siendo insesgados y

consistentes, pero no poseen varianza mínima, dejando de ser eficientes para cualquier tamaño muestral. Consecuencia de esto, los estimadores dejan de ser MELI. La heterocedasticidad da como resultado intervalos de confianza amplios y pruebas de hipótesis menos poderosas, donde las pruebas de significancia de variables t y F, posiblemente produzcan resultados inexactos. Ross (2001) plantea que generalmente este supuesto es comprobado visualmente por medio del gráfico de residuos estandarizados (residuos observados divididos por la desviación estándar de las Y_i). Alrededor del 95% de los residuos estarán contenidos entre los valores -2 y +2, cumpliendo el supuesto de homocedasticidad si se disponen formando una banda horizontal centrada con respecto al valor cero. Cualquier indicio de un patrón de comportamiento distinto hará sospechar de heterocedasticidad.

Medidas correctivas ante el no cumplimiento de este supuesto, son las transformaciones del tipo logarítmicas (comprimiendo las escalas en las que se miden las variables), recíprocas, y raíz cuadrada de la variable independiente, con el fin de hacer sus varianzas homocedásticas al correr nuevamente la regresión. Otra forma de resolver la heterocedasticidad, si se conocen sus varianzas, es mediante el método de Cuadrados Mínimos Ponderados, el cual minimiza la importancia de los residuos con valores extremos, ponderándolos por el inverso de sus varianzas (Gujarati, 1997).

La ausencia de multicolinealidad entre las variables explicativas, evita la existencia de correlaciones lineales significativas entre ellas. La multicolinealidad es un problema de grado y no de tipo, o sea, lo importante no es la presencia o ausencia de ésta sino su grado y magnitud, siendo una característica de la muestra y no de la población. Sin embargo, la multicolinealidad no viola los supuestos básicos de regresión, es más, aún en el caso de una evidente presencia de ésta, los estimadores de MCO siguen siendo MELI (Gujarati, 1997).

Las consecuencias de la multicolinealidad varían dependiendo de su grado y magnitud. En el caso de colinealidad perfecta entre las variables explicativas, sus coeficientes de regresión son indeterminados y sus errores estándar infinitos. Si se presenta una alta colinealidad, pero no perfecta, es posible la estimación de los coeficientes de regresión, pero sus errores estándar tienden a ser grandes, debido a esto, los valores poblacionales de los coeficientes de regresión no pueden ser estimados de forma precisa. Una regla general para detectar colinealidad entre las variables explicativas, consiste en observar el coeficiente de regresión de orden cero, el cual mide el grado de asociación entre dos variables. Si este valor es superior a 0,8, la multicolinealidad es un problema serio. Sin embargo, se debe considerar que altas correlaciones pueden sugerir colinealidad entre variables, pero no es necesario que estas correlaciones sean altas para contar con su presencia. Es decir, altas correlaciones son una condición suficiente pero no necesaria para la existencia de multicolinealidad, debido a que ésta se puede presentar asociada a correlaciones bajas (menores a 0.5) (Gujarati, 1997).

Otra forma de detectar el problema de multicolinealidad, es realizar una regresión a cada variable explicativa en las restantes variables, calculando el coeficiente de determinación R^2 y aplicando el test F para determinar si existe colinealidad significativa entre ellas. Como método de solución al problema de multicolinealidad se recomienda utilizar información previa del modelo, omitir una variable altamente colineal, transformar la información, u obtener nueva información (Gujarati, 1997).

3.5.3.- Prueba de significancia para los coeficientes de regresión

Una prueba de hipótesis es un procedimiento que utiliza los resultados de una muestra para verificar si una hipótesis planteada es verdadera o no. Los métodos que permiten la aceptación o negación de una hipótesis, los cuales

establecen afirmaciones sobre el valor del parámetro a estimar, son la prueba de significancia y la de intervalos de confianza. La hipótesis planteada se denomina hipótesis nula (H_0), la que es probada frente a una hipótesis alternativa (H_1) (Gujarati, 1997).

Los pasos del procedimiento para una dócima de hipótesis indicados por Cid *et al.,* (1990) son: establecer una hipótesis nula H_0 y una hipótesis alternativa H_1; establecer un nivel se significancia (α) de la prueba, que representa la probabilidad de rechazar H_0 cuando ésta es verdadera; establecer el estadístico de prueba (estimador muestral) y la zona de rechazo o región crítica, la cual define los valores del estimador para los cuales la información muestral contradice la hipótesis nula; y la regla de decisión, si para una muestra particular el estadístico de prueba (valor calculado) cae dentro de la región crítica, se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa. En cambio, si el valor calculado no cae dentro de la zona crítica no podemos rechazar H_0.

Un método complementario al cálculo de la región crítica bajo un nivel de significancia (α) dado, es el nivel de significancia observado de la prueba de hipótesis llamado valor-p, el que representa la cantidad de evidencia en contra de la hipótesis nula, encontrada en la muestra bajo el supuesto de que H_0 es verdadera. Técnicamente el valor-p está definido como el nivel de significancia más bajo al cual puede rechazarse una hipótesis nula. Por consiguiente, si α es mayor que valor-p se rechaza H_0, en cambio, si α es menor a valor-p, no se puede rechazar H_0 (Cid *et al.,*1990).

Una prueba t permite determinar si las variables explicativas de una regresión lineal, representadas por el parámetro estimado, tienen influencia sobre la variable dependiente. Las hipótesis a evaluar en este caso se presentan a continuación:

H_0: el coeficiente de regresión estimado β_i es igual a cero.

H_1: el coeficiente de regresión estimado β_i es distinto de cero.

Si los datos no apoyan la hipótesis nula el valor t obtenido será grande, por consiguiente asociado a un valor-p pequeño, y caerá dentro de la región crítica rechazándose la hipótesis nula (Gujarati, 1997).

3.5.4.- Coeficiente de determinación

Según Gujarati (1997), el coeficiente de determinación de regresión múltiple R^2 es una medida de resumen la cual muestra que tan bien se ajustan los datos a una línea de regresión muestral. En otras palabras, el R^2 mide la proporción de la variación total de la variable dependiente, explicada por el modelo de regresión, asumiendo valores entre 0 y 1. Si el valor de R^2 se acerca a 1, el modelo se aproxima a un ajuste perfecto. Cid *et al.* (1990), señalan que una medida modificada del R^2, es el coeficiente de determinación ajustado (R^2aj), el cual por el hecho se ser sensible al número de variables que componen el modelo, es útil para comparar entre modelos.

4.- METODOLOGÍA

4.1.- Materiales

En la elaboración de este estudio, se utilizó una base de datos generada en terreno para las variables de interés y variables del rodal. La digitalización de la información y posterior análisis, se realizó mediante el uso del programa computacional Excel. En la obtención de regresiones lineales se utilizó el programa de análisis estadístico Statgraphics versión 1.4. Para el ajuste de funciones de distribución de probabilidades, se utilizó el programa estadístico de ajuste de funciones Statfit versión 1.1.

4.2.- Área de Estudio

La información requerida en este estudio, se obtuvo de un raleo mixto realizado durante el mes de Julio de 2004, sobre un renoval de Roble Hualo (*Nothofagus glauca*), en estado de desarrollo latizal medio. La superficie estudiada corresponde a 3,0 ha. Esta zona se encuentra afecta al Proyecto "Conservación y Manejo Sustentable de Bosque Nativo" (PCMSBN). El área de estudio se ubica en el sector "El Trozo", predio "Las Yeguas", ubicado a 40 Km. al Oeste de la ciudad de Cauquenes, en la Cordillera de la Costa de la Región del Maule.

El predio posee una superficie total de 155,2 ha de uso preferentemente forestal. En relación al tipo forestal Roble Hualo presente, éste abarca una superficie de 118,4 ha, de las cuales un 2,5% corresponde a brinzales, un 76,9% al estado de desarrollo latizal y un 20,6 % se encuentra en estado de desarrollo fustal. El plan de manejo correspondiente, contempla un programa de corta o explotación y reforestación en bosque nativo, para una superficie de 57,0 ha, a efectuarse en el periodo 2003-2007.

4.3.- Descripción de las Labores Realizadas

El estudio se realizó en base a los tiempos productivos incurridos por un motesierrista en el desarrollo de las labores inherentes a un raleo mixto en bosque nativo. El operario utilizó una motosierra STIHL MS 270, la cual posee una cilindrada de 50 cm^3 y una espada de 45 cm de longitud. El ciclo de trabajo contempló labores de: despeje de sotobosque, preparación del sitio de volteo, volteo propiamente tal, desrame y trozado.

Para una mejor descripción de las labores realizadas en cada ciclo de trabajo, se mencionan a continuación los objetivos planteados por el propietario en relación a esta intervención. De acuerdo a esto, las metas perseguidas fueron: obtener madera, principalmente de hualo, para la producción de carbón; dejar como individuos remanentes los de mejor forma y mayores dimensiones para la obtención de madera aserrada; y eliminar al máximo la competencia de los estratos menores del rodal, sobre los árboles remanentes.

La duración del ciclo de trabajo estuvo determinada por el término del desrame y trozado de un individuo, momento en que se producía el desplazamiento hacia el individuo siguiente, y terminando con el desrame y trozado de este individuo. Las labores realizadas durante el ciclo fueron: despeje del sotobosque, preparación del sitio de volteo, volteo, y desrame y trozado.

La labor de despeje del sotobosque, se realizó durante el desplazamiento del operario entre un árbol a otro, donde se eliminaron matorrales y/o arbustos que impedían el desplazamiento, como también los que representaban competencia para los individuos remanentes. En la preparación del sitio de volteo, el operario eliminaba aquellos arbustos y/o matorrales que representasen un obstáculo para el posterior volteo, en algunos casos, esta labor no fue necesaria dado que las

condiciones en algunos lugares permitían operar con facilidad. En el volteo, el operario procedió a realizar los cortes necesarios para derribar y dejar el árbol sobre el terreno. En la labor de desrame y trozado, el operario avanzaba sobre el árbol volteado, eliminando las ramas y dimensionaba el fuste en forma simultanea.

4.4.- Variables de Interés

Para la posterior generación de regresiones lineales o distribuciones de probabilidad, para los tiempos incurridos en cada labor realizada durante el ciclo de trabajo, se midieron los tiempos correspondientes a cada labor y las potenciales variables explicativas asociadas a cada ciclo. Los componentes del tiempo total en segundos por ciclo de trabajo se definieron como: tiempo de desplazamiento (T_d), tiempo de preparación (T_p), tiempo de volteo (T_v) y tiempo de desrame y trozado (T_dt).

El tiempo de desplazamiento se refiere al tiempo que requirió el operario para trasladarse de un árbol a otro, comenzando al término de la última operación en un individuo, y terminando con la llegada al próximo individuo a ser volteado. El tiempo de preparación, es el tiempo empleado en despejar la base del árbol y definir la dirección de caída del mismo, comenzando con la llegada del operario a la base del árbol y concluyendo con el comienzo del primer corte. El tiempo de volteo, es el tiempo que empleó el operario en realizar la serie de cortes necesarios para voltear el árbol, comenzando con el inicio del primer corte y terminando con la caída del mismo. Por último, el tiempo de desrame y trozado es el tiempo que requirió el operario para eliminar todas las ramas del fuste, dimensionarlo y despuntarlo, para obtener los productos requeridos. Este componente comienza con la caída del árbol y termina en el momento en que el fuste se encuentre limpio de ramas, trozado y despuntado.

Las potenciales variables explicativas medidas en terreno, para modelar los tiempos incurridos en desplazamiento, preparación, volteo, desrame y trozado, para cada ciclo de trabajo fueron las siguientes: distancia en m recorrida por el operario entre un árbol y otro (D); pendiente del terreno en %, medida en el área de desplazamiento (m); grado de densidad de sotobosque presente en la zona del desplazamiento (s); diámetro en cm a 1,3 m de altura del árbol (DAP); altura total del árbol en m (H); porción del fuste en m con presencia de ramas (Fr); número de cortes realizados sobre el fuste (Nc); y el número de trozas obtenidas del fuste (Nt).

En relación con la variable adimensional densidad de sotobosque (s), se establecieron cinco grados con el fin de representarla de forma numérica. El grado 1, se refiere a zonas con presencia de matorral bajo, poco denso, el cual no presentaba dificultad para el desplazamiento. El grado 2, representa zonas con presencia de matorral bajo asociado ocasionalmente a arbustos, los cuales dificultaban el desplazamiento, y por lo tanto obligando a labores de despeje parciales. El grado 3, representa zonas con presencia de matorral denso asociado a arbustos, los cuales dificultaban el desplazamiento, obligando a labores de despeje. El grado 4, se asocia a zonas con presencia de matorral denso asociado a arbustos con una alta densidad, dificultando el desplazamiento y por lo tanto obligando a labores de despeje. Por último, el grado 5 de densidad de sotobosque, representa zonas con presencia de matorral denso, asociado a lianas y arbustos con alta densidad, no permitiendo el desplazamiento y por lo tanto obligando a labores intensivas de despeje.

4.5.- Obtención de Funciones de Tiempo

En la generación de regresiones lineales para los tiempos de desplazamiento, preparación, volteo, desrame y trozado, se ajustaron modelos utilizando el programa estadístico Statgraphics versión 1.4. El primer paso del ajuste consistió en una visualización gráfica de la posible relación lineal entre las variables originales y/o transformaciones de éstas. Posteriormente, por medio del análisis de las matrices de correlación para tales variables, se eligieron las que presentaron una mayor correlación con el componente a modelar. Además, dentro del mismo análisis se evidenciaron las relaciones entre variables independientes, para el caso de modelos multivariados, con el fin de comprobar el supuesto de no multicolinealidad. En este caso se consideró un valor de 0,5 como máximo de correlación entre variables independientes.

La comprobación del supuesto de normalidad se realizó mediante el ajuste de los residuos de cada modelo a la distribución normal, utilizando la prueba de ajuste Kolmogorov Smirnov (K-S) con un grado de significancia de 5%. Para comprobar el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad, se realizó un análisis gráfico de los residuos estandarizados, los cuales debían distribuirse de de forma homogénea como una banda en torno al valor cero. Luego de comprobados estos supuestos, se procedió a elegir el modelo que presentara una mayor facilidad de uso y un mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj).

Para el caso de variables dependientes que no mostrasen una correlación satisfactoria con las potenciales variables explicativas, se realizó un ajuste de funciones de distribución de probabilidades. El valor promedio para el componente modelado, estará representado por la esperanza de dicha distribución.

5.- PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Considerando los datos obtenidos, 106 ciclos de trabajo, el tiempo promedio de duración por ciclo fue de 132,3 s. Para el componente tiempo de desplazamiento se obtuvo un valor promedio de 103,9 s, representando un 78,5 % del tiempo total promedio por ciclo de trabajo. En relación al tiempo de preparación del sitio de volteo, este registró un promedio de duración de 6,5 s, correspondiente al 4,9 % de la duración total del ciclo. Para el tiempo de volteo, se obtuvo un promedio de duración de 9,9 s, correspondiente al 7,5 % de la duración total del ciclo de trabajo. Finalmente, para el componente tiempo de trozado y desrame, se registró una duración promedio de 12,1 s, correspondiente al 9,1 % del tiempo promedio por ciclo de trabajo.

La principal labor involucrada en el tiempo de desplazamiento, el cual representa un 78,5 % de la duración del ciclo completo, básicamente correspondía a la eliminación de gran parte del sotobosque presente en el trayecto de un árbol a otro. Labor que poseía directa relación con uno de los objetivos planteados por el propietario para esta intervención, el cual buscaba eliminar al máximo la competencia sobre los individuos remanentes, con el objeto de incrementar sus volúmenes. Cabe señalar además, que para el 84 % de los ciclos de trabajo medidos, el grado de densidad de sotobosque se encontraba dentro de los valores 3, 4 y 5, los cuales demandaban labores de despeje con distintas intensidades. Considerando la distancia recorrida por el operario entre un individuo y otro, para la muestra recogida se obtuvo un promedio de 7,1 m, lo que implica que el operario utilizó gran parte del tiempo de desplazamiento en labores de despeje de sotobosque. La base de datos generada en terreno se muestra en el Apéndice 1.

En relación con las actividades desarrolladas dentro de los demás componentes del ciclo (preparación del sitio de volteo, volteo, desrame y trozado), estas se realizaron de forma normal, de acuerdo a lo descrito anteriormente en

aspectos metodológicos. En conjunto estos componentes representan el 21,5 % del total de tiempo incurrido por cada ciclo de trabajo.

5.1.- Modelos de Regresión Lineal

Para los tiempos de desplazamiento, preparación, volteo, desrame y trozado, el ajuste de modelos de regresión lineal se realizó en base al total de ciclos de trabajo registrados. En el caso del tiempo de preparación del sitio de volteo, este tuvo una ocurrencia de 74,5% con respecto al total de ciclos medidos. Para el caso del tiempo de desrame y trozado, se registró una ocurrencia de un 88,7%. En relación a los componentes desplazamiento y volteo, éstos tuvieron una ocurrencia del 100%, con respecto al total de ciclos medidos.

5.1.1.- Modelo para tiempo de desplazamiento

Como resultado del análisis de gráficos bidimensionales y matrices de correlación, se establecieron como potenciales variables explicativas para el tiempo de desplazamiento (T_d), la distancia recorrida por el operario (D), la pendiente del terreno (m) y el grado de densidad de sotobosque (s). Estas variables presentaron una correlación satisfactoria con la variable de interés y una baja correlación entre sí, dando cumplimiento al supuesto de no multicolinealidad. Ver Apéndice 2.

En la génesis de este modelo se utilizó el total de observaciones medidas en terreno para la variable dependiente y las variables explicativas elegidas. En relación con el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad, fue necesario aplicar una transformación del tipo logarítmica a la variable dependiente (T_d),

luego de no tener resultados satisfactorios al aplicar transformaciones a las variables independientes del modelo, en busca del cumplimiento de este supuesto.

Por otra parte, los residuos estandarizados de los modelos preliminares y del modelo final, mostraron un ajuste satisfactorio a la distribución normal, evaluado a través de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov Smirnov, con un nivel de significancia del 5%. Luego de comprobar el cumplimiento de los supuestos de homocedasticidad y normalidad de los residuos, se eligió el modelo con mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj). El modelo 7 propuesto para tiempo de desplazamiento presentó el mayor (R^2 aj), cumpliendo además con los supuestos comprobados. A continuación se presenta el modelo elegido, en su forma original y operativa. En el Apéndice 2, se muestra el proceso de ajuste desde la elección de variables explicativas, hasta la elección del modelo final.

$$Ln\ (T_d) = 2{,}81881 + 0{,}0397368 * m + 0{,}218211 * s + 0{,}339764 * Ln\ (D)$$

n: 106 $\qquad$ R^2 aj (%): 53.2

$$T_d = D^{0{,}339764} * e^{2{,}81881 + 0{,}0397368 * m + 0{,}218211 * s}$$

Cuadro 1. Rango de las variables del modelo para tiempo desplazamiento.

	Mínimo	Media	Máximo
m (%)	3,0	9,9	20,0
s (-)	1,0	3,2	5,0
D (m)	1,9	7,1	20,2

5.1.2.- Modelo para tiempo de volteo

Como resultado del análisis de matrices de correlación y gráficos bidimensionales para las variables que conformarían el modelo, se establecieron en una primera instancia como variables independientes, el diámetro a 1,3 m de

altura (DAP) y la altura del árbol (H), las cuales presentaron una correlación satisfactoria con la variable dependiente tiempo de volteo (T_v). Cabe señalar que estas variables además de estar correlacionadas con la variable temporal, también lo estaban entre sí, obligando a modelar utilizando alguna combinación de éstas o cada una por separado, debido al cumplimiento del supuesto de no multicolinealidad.

Luego de analizar modelos que incluían combinaciones de ellas, o cada una por separado, DAP^2 demostró ser la más indicada para modelar el tiempo de volteo. En relación con el cumplimiento de los supuestos normalidad y homocedasticidad, estos fueron cumplidos satisfactoriamente al aplicar la prueba de bondad de ajuste (K-S) y el análisis del gráfico de residuos estandarizados respectivamente. En el Apéndice 3, se muestra el proceso de modelación para el tiempo de volteo, desde la elección de las variables independientes, hasta la obtención del modelo final.

Durante el proceso de modelación se detectó por medio del gráfico de residuos estandarizados, la presencia de un dato muy alejado del promedio, correspondiente a un tiempo de volteo cuya magnitud no fue atribuible a algún error en la toma de datos o demora del operario (39,5 s). En primera instancia la magnitud de esta observación se creyó relacionada a un árbol de grandes dimensiones pero, al analizar el ciclo de trabajo correspondiente se observó que el individuo en cuestión, si bien estaba entre los de mayor DAP (22 cm), sus dimensiones no representaban un valor atípico. Este dato se hace evidente al analizar los residuos del modelo final para el tiempo de volteo, pero no existió ningún tipo de justificación para excluirlo. A continuación se presenta el modelo 3 para el tiempo de volteo, el que presentó el mayor R^2 aj,

$$T_v = 3{,}56615 + 0{,}0378627 * DAP\text{^}2$$

n: 106 R^2 aj (%): 51,1

Cuadro 2. Rango de la variable del modelo para tiempo de volteo.

	Mínimo	Media	Máximo
DAP (cm)	6,5	12,3	23,0

5.1.3.- Modelo para tiempo de desrame y trozado

Como se mencionó anteriormente, no todos los individuos volteados durante la faena estuvieron sujetos a desrame y trozado, debido básicamente a que se trataba de árboles muertos en que sólo permanecía en pie parte del fuste original, con lo cual no era necesario dimensionarlos ni desramarlos. De los 106 ciclos de trabajo medidos en terreno, en 12 oportunidades el operario no realizó labores de desrame o trozado. De esta forma el modelo propuesto se generó a partir de 94 observaciones correspondientes al 88,7% del total de datos.

En una primera instancia se probaron como variables explicativas para este tiempo el DAP y la altura del árbol H. Como estas variables presentan una alta correlación entre sí, se debía utilizar una combinación de éstas o cada una por separado. Luego del análisis de matrices de correlación y gráficos bidimensionales, se obtuvo como resultado que la altura del árbol H, poseía una mayor correlación con la variable temporal. Luego de efectuar una transformación del tipo logarítmica sobre esta variable, la correlación aumentó. Además, derivado de esta transformación, al observar el gráfico de residuos estandarizados del modelo, éstos se disponían de forma homogénea en torno al valor cero, mejorando esta situación con respecto a la variable original. Para el caso del supuesto de normalidad de los residuos, este fue cumplido satisfactoriamente al ajustar los residuos del modelo a la distribución normal por medio de la prueba de ajuste (K-S). En el Apéndice 4, se muestra el ajuste de modelos preliminares para el tiempo de desrame y trozado (T_td), desde la elección de las variables explicativas por medio de gráficos bidimensionales y matrices de correlación,

hasta la elección del modelo final. El modelo 2, de la serie de modelos probados para el tiempo de desrame y trozado, presentó el mayor R^2 aj.

$$T_dt = -29,5042 + 18,7442 * Ln (H)$$

n: 94 R^2 aj (%): 55,4

Cuadro 3. Rango de la variable del modelo para tiempo de desrame y trozado

	Mínimo	Media	Máximo
H (m)	4,2	10,5	22,5

5.1.4.- Ajuste de funciones de distribución probabilidad para tiempo de preparación del sitio de volteo

De los 106 ciclos de trabajo registrados durante la toma de datos, en 79 oportunidades el operario realizó la labor de preparación del sitio de volteo. Esta situación se generó debido a que en ocasiones, bajo condiciones de trabajo favorables asociadas especialmente a la ausencia de sotobosque, el operario procedía a voltear inmediatamente luego de llegar a la base el árbol. Las ocasiones en que se realizó la labor corresponden al 74,5% del total de observaciones.

El ajuste se realizó mediante estimadores de máxima verosimilitud. Como resultado del proceso se obtuvo que la distribución Lognormal se ajustaba de mejor forma al tiempo de preparación. Por medio del cálculo de la esperanza de esta distribución, se obtuvo un tiempo promedio para este componente de 7,8 s. Dado que el tiempo de preparación posee una ocurrencia de un 74.5% con respecto al total de ciclos medidos, el tiempo promedio por ciclo de trabajo para éste es de 5,8 s. En el apéndice 5, se muestran los resultados del ajuste de fdp para tiempo de preparación y los parámetros que definen la distribución Lognormal

5.2.- Análisis del Error Promedio para los Modelos Obtenidos

Este análisis consistió en establecer el error para cada modelo final, ponderando el valor estimado por el factor de ocurrencia correspondiente, y comparándolo con el valor real para cada componente. Además, se obtuvo el error para el tiempo total del ciclo de trabajo, comparando la suma de los tiempos promedio estimados a través de los modelos, con el tiempo promedio real del ciclo.

El tiempo promedio estimado para cada componente se obtuvo mediante el uso de los valores promedio de las variables independientes correspondientes a cada modelo. El valor real para cada componente se obtuvo mediante el promedio calculado sobre los valores de la muestra. Los resultados de este análisis se presentan en el cuadro siguiente.

Cuadro 4. Error promedio obtenido para cada componente del ciclo del trabajo.

Componente	Valor estimado (s)	Valor real (s)	Diferencia (s)	Error (%)
T_d	97,2	103,9	-6,7	6,4
T_p	5,8	6,5	-0,7	10,8
T_v	9,3	9,9	-0,6	6,1
T_dt	12,9	12,1	0,8	6,6

De los valores obtenidos se desprende que el modelo para tiempo de preparación es el que presenta el mayor error, correspondiente a una subestimación de un 10,8 % con respecto al valor real. En este caso, el valor estimado corresponde a la esperanza de la distribución Lognormal ajustada a la variable temporal. El modelo de regresión lineal para el tiempo de desplazamiento, presentó un error de subestimación de 6,4 %. Para el modelo lineal de tiempo de volteo, se obtuvo un error de subestimación de un 6,1 %. Por último, el modelo de regresión lineal para el tiempo de desrame y trozado, presentó un error de sobreestimación, correspondiente a un 6,6 %.

En relación con el tiempo total del ciclo de trabajo, los resultados obtenidos se presentan en el cuadro siguiente.

Cuadro 5. Error promedio obtenido para el tiempo total del ciclo.

Valor estimado (s)	Valor real (s)	Diferencia (s)	Error (%)
125,2	132,3	-7,1	5,4

El error promedio para la estimación del tiempo total del ciclo es de un 5,4 % de subestimación. A partir de los resultado obtenidos es aconsejable realizar estudios posteriores de verificación y validación de los modelos propuestos, previo a su uso extensivo.

6.- CONCLUSIONES

Para las condiciones de terreno en que se realizó el estudio, las variables grado de densidad de sotobosque (s), distancia recorrida por el operario (D) y la pendiente del terreno (m), fueron relevantes en la obtención de un modelo para tiempo de desplazamiento. De acuerdo a los valores obtenidos en la muestra, la labor de despeje de sotobosque, realizada durante el desplazamiento del operario, constituyó parte importante del tiempo total por ciclo de trabajo (78,5 %). En consecuencia, el tiempo total para el ciclo es fuertemente influenciado por la densidad de sotobosque presente en el rodal.

En el caso del componente tiempo de preparación del sitio de volteo, este no presentó relaciones lineales con las variables del rodal medidas, procediéndose al ajuste de funciones de distribución de probabilidad. En esta ocasión, la distribución Lognormal mostró el mejor ajuste.

Las variables diámetro a 1,3 m de altura (DAP) y altura del árbol (H), resultaron ser las más indicadas en la generación de modelos de regresión simples para tiempo de volteo, y de desrame y trozado, respectivamente.

La estimación del tiempo total para el ciclo de trabajo, mediante los modelos obtenidos, arrojó un error de subestimación de un 5,4 %. No obstante es necesario verificar y validar estos resultados.

Los objetivos planteados por el propietario en relación a las intervenciones de este tipo, ya sea en cuanto a los productos a obtener o las características deseadas para el rodal remanente, tienen directa relación sobre los tiempos incurridos por componente del ciclo de trabajo, y por consiguiente en la duración total de éste. En este caso, la obtención de madera para la producción de carbón y la posterior producción de madera aserrada a partir del rodal remanente,

condicionaron las labores realizadas durante la intervención. Lo anterior se vio reflejado en las dimensiones de los individuos volteados, y en el alto porcentaje de tiempo utilizado en la eliminación de gran parte del sotobosque presente en el rodal, con el objeto de eliminar la competencia sobre los individuos remanentes.

7.-BIBLIOGRAFÍA

Cid, L; Mora, A; Valenzuela, M. 1990. Inferencia estadística. Editorial Aníbal Pinto. Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad de Concepción. 319 p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal, Chile). 2004. Proyecto: Conservación y Manejo Sustentable de Bosque Nativo. (en línea). Consultado 3 ene. 2005. Disponible en: http://www.chilebosquenativo.cl/proyecto.htm

Donoso, C. 1981. Investigación y desarrollo forestal: tipos forestales de los bosques nativos de Chile. 70 p. (Documento CONAF-FAO. Nº 38).

Donoso, C; Lara, A. 1998. Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Editorial Universitaria S.A. Santiago. Chile. 421 p.

Gujarati, D. 1997. Econometría básica. 3ª ed. Bogotá, Colombia. McGraw-Hill Interamericana, S.A. 851 p.

Hair, J; Anderson, R; Tatham, R; Black, W. 1999. Análisis Multivariante. 5° ed. Madrid. Prentice-Hall Iberia, S.A. 832 p.

Chile Forestal N° 135. 16 p. (Documento Técnico N° 10).

UACH (Universidad Austral de Chile), UC (Pontificia Universidad Católica de Chile), UT (Universidad de Temuco). 1999. Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe Nacional con Variables Ambientales. 89 p.

Ross, S. 2001. Probabilidad y estadística para ingenieros. Trad. M. Hano. 2ª ed. México. McGraw-Hill Interamericana Editores, S. A. 585 p.

APÉNDICE 1. Base de Datos

Arb.	T_d	D	m	s	T_p	T_v	DAP	H	Fr	T_dt	DAT	Nc	Nt
1	51,3	4,3	3	4	13,5	10,7	12,1	9,5	3,1	4,8	15	2	3
2	120,3	5,5	5	4	3,2	4,2	14,4	8,3	3,4	5,5		1	2
3	83,1	6,1	4	3	0	7,9	8,7	6	1,8	3,7	10,2	1	2
4	121,8	8,1	6	4	15,1	11	13,5	11,2	4,3	15,4	14,2	2	3
5	123,6	8,9	8	4	10,5	9,8	14,2	12,3	3	11	15,1	4	5
6	141,1	6,8	6	4	12,7	16,5	13,6	8,2	2,7	11,4	16,3	2	3
7	85	4,2	5	3	4,2	3,8	7,8	6,2	1	4	9	1	2
8	158,9	10	15	3	12	11,6	12,3	7,4	3,3	0	12,8	0	1
9	182,7	6,5	20	3	5,5	21	18,6	9,4	4,5	20,1	21,6	3	4
10	110,6	3,2	13	2	15,4	14,6	14,5	8,5	4,9	22,4	15,7	1	2
11	142,5	5,7	17	4	21,2	6,1	8,3	4,2	1,9	2,8	11,4	0	1
12	82,8	4,4	5	3	20	5,6	9	7	1,3	3,4	10,1	1	2
13	135,7	9	5	4	5	8,5	11,8	10,1	3,2	18	12,3	2	3
14	221,4	14,7	15	4	0	2,3	7,4	9,2	4,6	10,1	8,4	2	3
15	86	4,9	16	3	0	11,1	15,5	12,7	4,8	21,7	16	3	4
16	172,2	6,5	15	4	0	5,4	9,7	8,4	3,7	0	12,1	0	1
17	80,5	6	12	3	56,7	14,2	10,3	8,2	3,8	6,8	13,2	1	2
18	48,5	5,2	6	1	0	11,6	12,4	7,3	3,7	4	13,2	1	2
19	127,9	8,1	12	4	0	6	13,1	9,7	3,2	15,2	15,6	2	3
20	41,6	3,8	5	2	0	8,5	14,4	12,3	5,8	25,4	16,9	4	5
21	48,3	4,1	5	1	0	13,8	17,2	10,4	2,3	17,8	17,7	2	3
22	88,1	7,9	5	4	0	4,1	7,1	6,7	2,9	6	8	2	3
23	68,5	9,5	14	3	0	7,8	9,2	7,7	3,8	7,5	10	1	2
24	19,8	1,9	5	1	0	6	14,4	11,9	4	19,7	17,4	3	4
25	58,4	4,7	3	2	4,2	14,3	18,6	14,7	4,2	24,3	22	3	4
26	80,9	6,7	4	3	5,5	16,8	11	16,5	6,9	29,8	13,4	4	5
27	20,1	2,8	3	3	0	3,5	7	6,3	2,2	6,4	8	1	2
28	110,7	6,9	8	4	0	4,6	6,5	5,2	2,3	5,7	8,1	0	1
29	135,4	3,7	11	4	3,3	3,9	8	6,2	3,4	0	8,8	0	1
30	122	12,1	9	4	4,3	5	8,8	9,2	4,4	19,2	11,7	2	3
31	128	5,4	9	3	3,8	3	7,5	5,1	3,1	0	7,7	0	1
32	92,3	3,7	12	3	4,9	9,9	12,9	9,8	4,9	16,7	15,1	3	4
33	47,8	7,5	11	3	2,8	11,3	14	11,9	3,6	24	16,8	2	3
34	141,6	5,4	10	3	2,3	13,7	16	11,3	6	13,4	17,3	2	3
35	95,9	6,8	8	2	11,7	11,4	9,7	7,4	2	4,5	9,6	1	2
36	56,2	4	6	3	7,2	6,3	9	10,3	5,7	20,3	11,1	2	3
37	75,8	6,1	6	3	3,8	6	8,6	9,5	4,9	7,8	12,4	2	3
38	101	5,7	8	3	2,3	16,8	18,7	13,2	5,1	26,4	22,1	3	4
39	186,4	9,6	10	3	3,3	39,5	22	20,1	10,8	24,4	23,5	6	7
40	89	2,8	8	4	9,8	3,3	11,3	16,8	7,8	26,4	12,6	4	5

Continúa...

Arb.	T_d	D	m	s	T_p	T_v	DAP	H	Fr	T_dt	DAT	Nc	Nt
41	77,2	3,4	8	5	0	5,6	16,8	17,4	8,2	29,9	19,3	4	5
42	56,7	6,7	7	3	12,5	11,2	12,2	9,4	3,2	3,4	14,6	2	3
43	183	5,5	10	4	3,4	4,8	14,5	8,6	2,7	7,9	17	1	2
44	83,4	6,1	4	3	0	8	8,8	6,5	2	2,8	9,8	1	2
45	121,9	7,8	4	4	15	11,9	13,6	10,5	4	19,9	14,3	2	3
46	223,8	10,8	14	4	0	9,6	14,3	12	3,3	7,4	16	2	3
47	141	7,2	13	4	0	8,4	14,1	8,5	2,1	4,9	14,3	1	2
48	86	4,5	15	3	4,8	4,3	8	6,8	0,9	5,6	8,8	1	2
49	162,3	10,3	18	3	12,8	12,7	12	7,1	3	0	12,4	0	1
50	179,1	5,9	18	3	4,2	21,9	18,1	9,6	4,2	20,7	22,3	2	3
51	112,7	3,4	19	2	16,8	14,7	14,7	8,6	4,5	19,8	16	1	2
52	139,5	4,8	20	4	0	5,9	8,1	5	2,1	2,8	12	0	1
53	78,9	5,1	11	3	18,2	6,6	8,9	7	1	3	9,9	1	2
54	135,4	7,7	12	4	6,7	10,2	11,4	9,9	3,2	21,3	13,1	2	3
55	222	15	14	4	3,4	3,4	8	9,4	4,1	8	9,3	2	3
56	86,7	5,6	19	3	2,5	11	15,4	13	5	24	16,2	3	4
57	169,4	5,8	18	4	4,3	6,3	10	8,7	4,3	0	11,2	0	1
58	81	6,3	14	3	0	15,4	10,4	9,1	4,2	5,6	12	2	3
59	49,8	5,2	6	2	2,1	12,6	13	6,9	3,2	4	13,3	1	2
60	123,8	7,9	6	4	5,3	9,1	13,2	10	3	15,7	15,9	2	3
61	42,2	4,5	5	2	3,2	8	14,7	11,8	3,8	25	16,6	2	3
62	47,6	4,4	3	1	1,9	14,8	18	10,2	6,5	19,6	19,1	2	3
63	89,2	8,1	4	4	3,2	4,5	7,5	7,1	3,6	5,3	8,2	1	2
64	118,5	10,1	4	3	1,2	8,6	9,7	8	4	7,7	10	1	2
65	20	2	6	1	0	7,1	14,4	12	4,1	21,1	16,5	2	3
66	56,8	4,5	6	2	4,2	14,6	19	14,2	3,7	24,6	22,1	3	4
67	81,6	7,8	5	3	5,6	17,2	11,7	16,7	5,3	20,3	13,1	4	5
68	22,3	3	5	3	1,5	3,5	8	6,7	2	0	8,5	0	1
69	110,7	7,4	6	4	3	4,6	6,9	5,1	1,8	0	8,2	0	1
70	138	4,4	8	4	3,7	3,1	7,8	6,7	3,6	0	8	0	1
71	120,8	11,3	6	4	3,5	5,5	8,8	9,5	3,7	22,1	11,6	2	3
72	128,7	5,2	6	3	4,4	3,7	7,9	5,6	2,9	0	8,5	0	1
73	92,4	4	10	3	5	10,7	12,7	10	4,7	16,7	15,3	2	3
74	48	7	12	3	2,8	12	13,9	12	3,8	24	15,9	2	3
75	143,2	5,5	9	3	3	14,7	17	11,4	6	16,4	17,5	2	3
76	96,5	7,8	8	2	12,1	12,9	9,8	7,7	2,1	3,4	10,9	1	2
77	57	4,6	11	3	6,2	7,8	10	10,6	6,4	18,4	12,2	2	3
78	75,9	6,6	13	3	4,6	6,4	9,5	9,8	4,9	7,8	9,9	3	4
79	109,8	3,2	13	3	2,3	17,6	19	13,8	3,7	18	20,3	3	4
80	190,7	8,1	10	3	3	25,1	23	20,4	10,3	29	23,8	5	6
81	90,1	5,1	10	4	9,9	3,7	11,7	17	7	30,7	12,3	4	5
82	161,3	8,9	10	4	4,7	4,8	9,7	6,7	3,1	15,3	10,7	1	2

Continúa...

Arb.	T_d	D	m	s	T_p	T_v	DAP	H	Fr	T_dt	DAT	Nc	Nt
83	78	4	8	5	5,5	5,4	17,2	18	9,5	30,2	19,1	5	6
84	100,5	11,2	8	4	12,4	4,2	13	10	3,3	13,7	13,2	2	3
85	98,4	14,1	8	4	3,2	6,8	15,2	11,3	4	15	18	2	3
86	99,7	7,3	11	4	0	8,8	18,4	12,9	2,8	13,4	22,3	3	4
87	110,2	16,8	10	4	14,7	6,1	8,2	10,2	3,3	11,5	14,3	2	3
88	90,5	5,5	11	3	11,1	9,4	9,2	6,8	4,1	10,1	12,4	1	2
89	89,4	10	10	4	12	11,2	14,8	11,5	3,1	6	15,4	2	3
90	121,1	20,2	9	4	3,8	19,1	19,3	13,4	2,5	10,3	22,1	3	4
91	79,6	18,4	13	3	10,8	10,4	12	8,9	3,1	4,5	13,4	3	4
92	99,2	10,5	12	3	6,2	8	8,5	6,4	2,6	0	10,7	0	1
93	120,3	14,8	12	4	0	8,7	6,5	5,8	2,4	0	8,6	0	1
94	125,1	11,3	14	3	21,2	12,4	8,3	6	3,2	3	11,3	1	2
95	79,6	12,7	12	3	20	11	9,1	7,7	3,1	2,5	12,7	1	2
96	107,1	8,2	13	3	6,3	13,5	8,8	9,4	3,8	8,9	9,9	2	3
97	46,3	3,5	10	2	0	7,5	8	6,1	1,6	5,6	12,4	1	2
98	76,2	6,3	11	2	13	16	13	8,9	3,7	10	16,1	2	3
99	103	4,8	13	2	0	14	15,7	11,8	4,6	11,3	18,9	2	3
100	125,7	12	15	3	56,7	8,2	10,1	13,9	6,7	12	11	3	4
101	98,6	7,3	14	3	0	3,4	7,8	10,3	5,4	8	12,3	2	3
102	112,3	8,7	16	4	0	8,9	13,2	14,6	8,1	9,6	14	3	4
103	143,7	9,9	15	4	12,4	13,1	19	18	10,5	16,4	23,4	4	5
104	59,8	4,5	13	3	0	23,7	22,1	22,5	12,4	25,8	26	5	6
105	76,8	6,4	12	3	8	8,6	11,5	9,7	3,4	6,5	14,2	2	3
106	132,5	5	12	3	7	10	16,8	13	6	9,6	17,5	3	4

Donde:

T_d: tiempo de desplazamiento (s)
D: distancia recorrida (m)
m: pendiente del terreno (%)
s: grado de densidad de sotobosque
T_p: tiempo de preparación del sitio para el volteo
T_v: tiempo de volteo
DAP: diámetro a 1,3 m de altura (cm)
H: altura del árbol (m)
Fr: porción del fuste que posee ramas (m)
T_dt: tiempo de desrame y trozado (s)
DAT: diámetro de tocón (cm)
Nc: número de cortes realizados sobre el fuste
Nt: número de trozas obtenidas del fuste

APÉNDICE 2. Ajuste de modelos para tiempo de desplazamiento

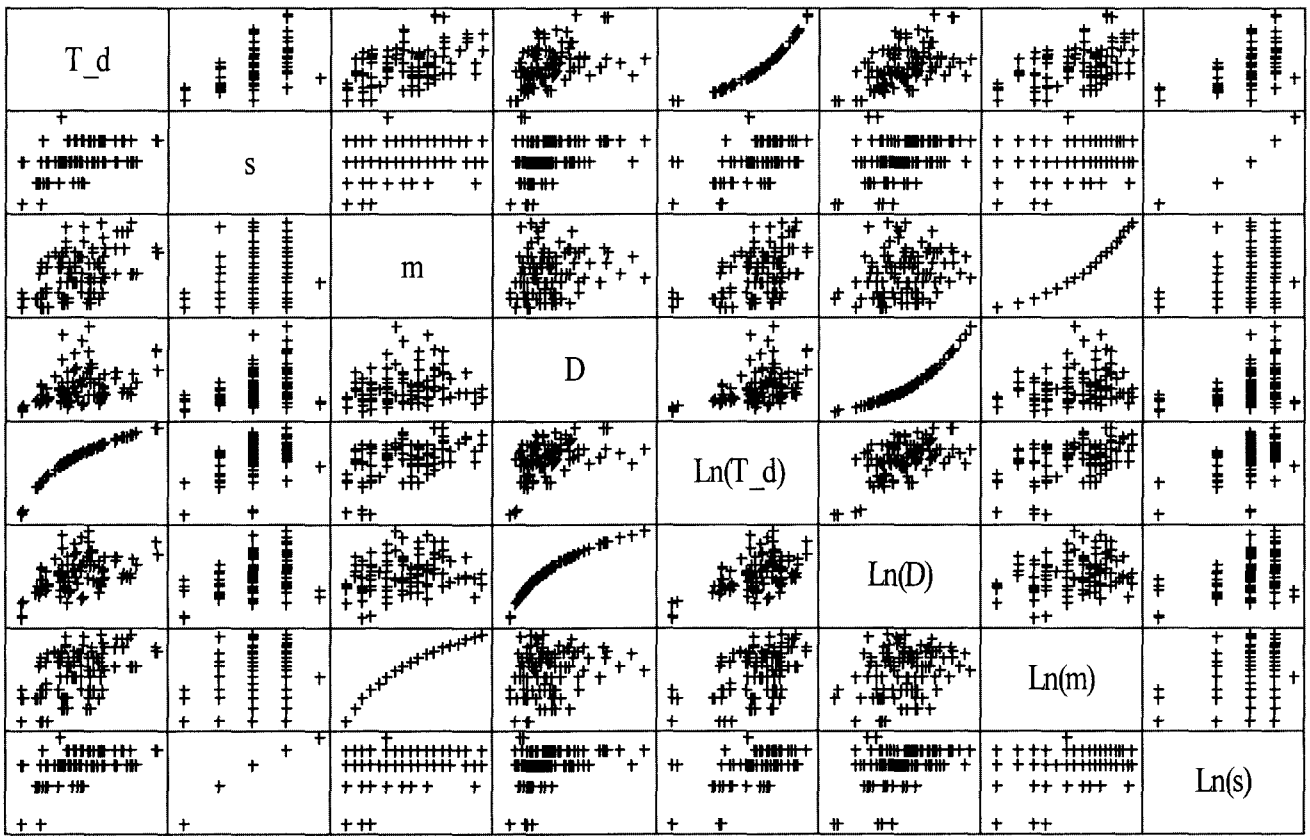


Figura 1. Gráficos bidimensionales correspondientes al ajuste de modelos para tiempo de desplazamiento

En el caso del análisis gráfico para la variable dependiente (T_d), en relación con las potenciales variables explicativas (D, m y s), las transformaciones del tipo logarítmicas mostraron mejores resultados en comparación con otros tipos de transformaciones probadas. Este resultado, se reafirma numéricamente a través del análisis de la matriz de correlación asociada a estas transformaciones.

Cuadro 6. Matriz de correlación asociada al ajuste de modelos para tiempo de desplazamiento.

	T_d	s	m	D	Ln (T_d)
T_d		0,4993	0,4720	0,4161	0,9415
s	0,4993		0,1404	0,3720	0,5571
m	0,4720	0,1404		0,1841	0,4683
D	0,4161	0,3720	0,1841		0,4383
Ln (T_d)	0,9415	0,5571	0,4683	0,4383	
Ln (D)	0,4859	0,4222	0,2074	0,9534	0,5473
Ln (m)	0,4736	0,1751	0,9705	0,2244	0,4871
Ln (s)	0,5066	0,9703	0,1972	0,3767	0,5854

	Ln (D)	Ln (m)	Ln (s)
T_d	0,4859	0,4736	0,5066
s	0,4222	0,1751	0,9703
m	0,2074	0,9705	0,1972
D	0,9534	0,2244	0,3767
Ln (T_d)	0,5473	0,4871	0,5854
Ln (D)		0,2442	0,4483
Ln (m)	0,2442		0,2309
Ln (s)	0,4483	0,2309	

En base a los valores de correlación entre las potenciales variables explicativas, se analizarán posibles modelos de regresión con ausencia de multicolinealidad. Es decir, se considerarán dentro de un mismo modelo y en términos separados, solo aquellas potenciales variables explicativas que presenten una correlación menor o igual a 0,5.

Cuadro 7. Análisis de regresión del modelo 1 para tiempo de desplazamiento.

Dependent variable: T_d

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-14,1333	13,8864	-1,01778	0,3112
D	2,64767	1,0121	2,61602	0,0102
m	3,85672	0,756329	5,09926	0,0000
s	19,0918	4,11422	4,64044	0,0000

El cuadro 7, al igual que todos los cuadros correspondientes a análisis de regresión presentados para los modelos propuestos incluye: parámetros estimados (parameter), valor estimado de estos parámetros (estimate), su error estándar (standard error), valor t asociado a la estimación de los parámetros (t-statisticc) y la probabilidad asociada a las estimaciones realizadas.

Cuadro 8. Análisis de varianza del modelo 1 para tiempo de desplazamiento.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	90846,9	3	30282,3	27,92	0,0000
Residual	110641,0	102	1084,72		
Total (Corr.)	201488,0	105			

R-squared = 45,088 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 43,4729 percent
Standard Error of Est. = 32,935
Mean absolute error = 25,9003
Durbin-Watson statistic = 1,91575

Para el caso del análisis de varianza que contiene cada modelo probado, se incluye para el modelo (model), para el error (residual) y para el total (total), la

fuente de variación (source), suma de cuadrados (sum of squares), grados de libertad (df), cuadrados medios (mean square), razón F (F-ratio) y la probabilidad asociada a las estimaciones realizadas (p-value).

Además, junto con este cuadro se presenta el análisis de correlación del modelo el cual incluye: coeficiente de determinación (r-squared), coeficiente de determinación ajustado (r-squared adjusted for d.f.), error estándar de estimación (standard error of estimation), error medio absoluto (mean absolute error) y el estadígrafo de Durbin-Watson (Durbin-Watson statistic).

En este caso de acuerdo a los resultados, del análisis de regresión se desprende que los parámetros son significativos y aportan al modelo. Además, de acuerdo con el análisis de varianza, se puede afirmar que existe relación lineal entre las variables.

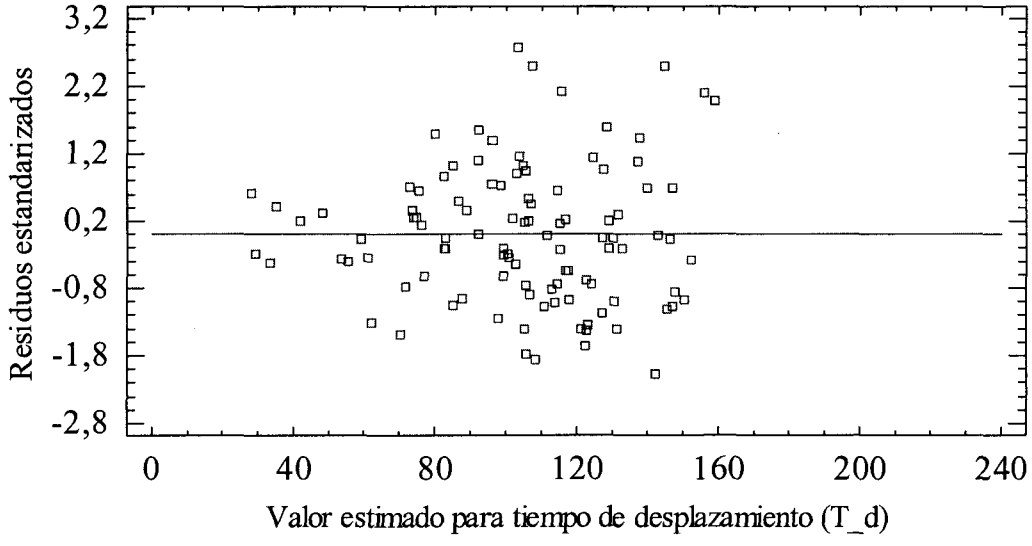
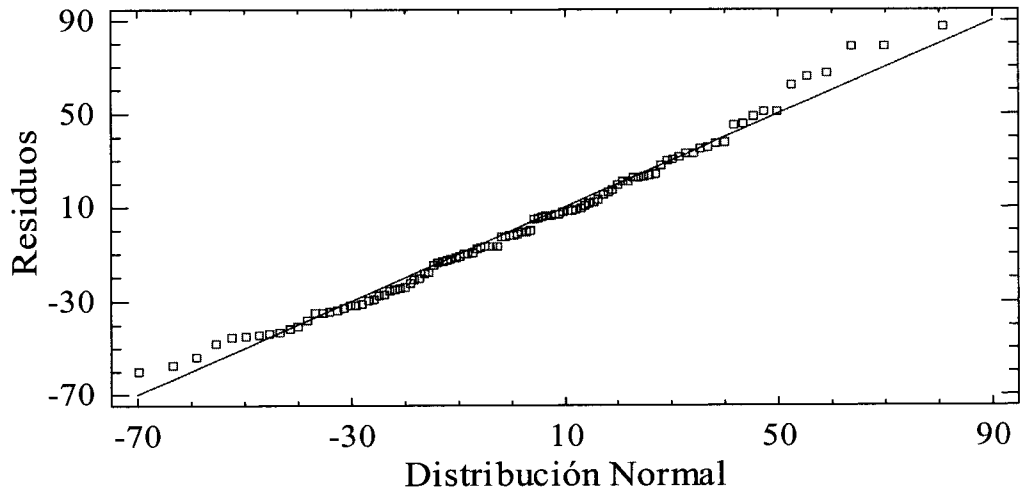


Figura 2. Gráfico de residuos del modelo 1 para tiempo de desplazamiento

Para verificar el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad en cada uno de los modelos preliminares, se analizará el gráfico de residuos

correspondiente. Si éstos se disponen de forma homogénea en torno al valor cero en forma de banda, se aceptará el cumplimiento del supuesto. En este caso, el gráfico de residuos del modelo 1 para tiempo de desplazamiento, muestra una dispersión cónica con respecto al valor cero, asumiéndose un comportamiento heterocedastico de los residuos del modelo, no cumpliendo con este supuesto.



P-Value = 0,930499

Figura 3. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 1 para tiempo de Desplazamiento.

En el caso del cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, este se cumplió de forma satisfactoria para el modelo propuesto, de acuerdo al gráfico y valor-p obtenidos.

Cuadro 9. Análisis de regresión del modelo 2 para tiempo de desplazamiento.

Dependent variable: T_d

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-3,54514	12,7082	-0,278966	0,7808
Ln (s)	46,3672	10,5892	4,37871	0,0000
m	3,66062	0,768902	4,76083	0,0000
D	2,73925	1,02089	2,68321	0,0085

Cuadro 10. Análisis de varianza del Modelo 2 para tiempo de desplazamiento.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	88691,5	3	29563,8	26,73	0,0000
Residual	112797,0	102	1105,85		
Total (Corr.)	201488,0	105			

R-squared = 44,0183 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 42,3717 percent
Standard Error of Est. = 33,2543
Mean absolute error = 26,1606
Durbin-Watson statistic = 1,95383

Para el modelo 2, los resultados obtenidos en el análisis de regresión muestran que los parámetros del modelo son significativos. Además, de acuerdo con el análisis de varianza, se puede afirmar que existe relación lineal entre las variables.

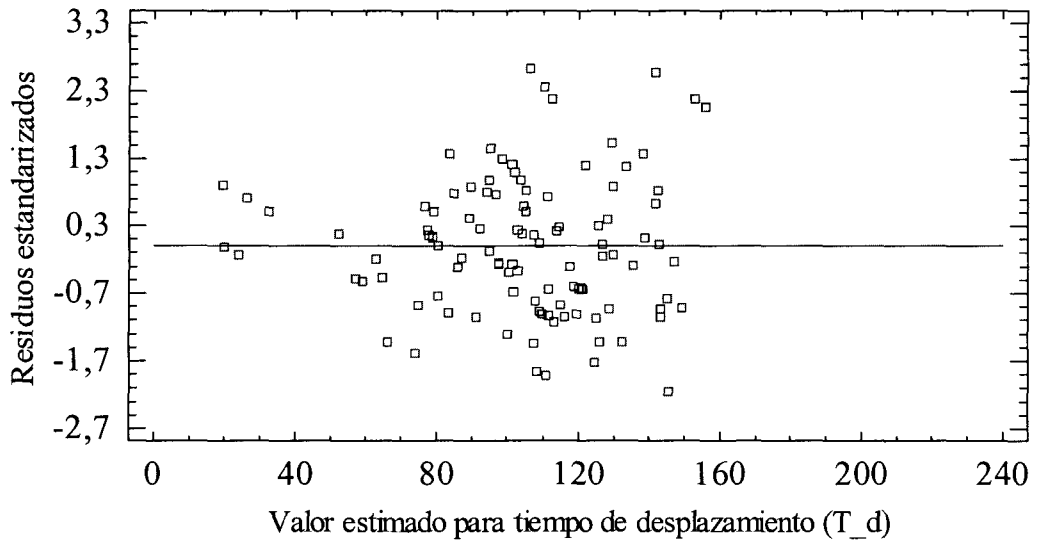


Figura 4. Gráfico de residuos del modelo 2 para tiempo de desplazamiento.

El gráfico de residuos para el modelo 2, muestra una dispersión cónica con respecto al valor cero, no cumpliendo con el supuesto de homocedasticidad.

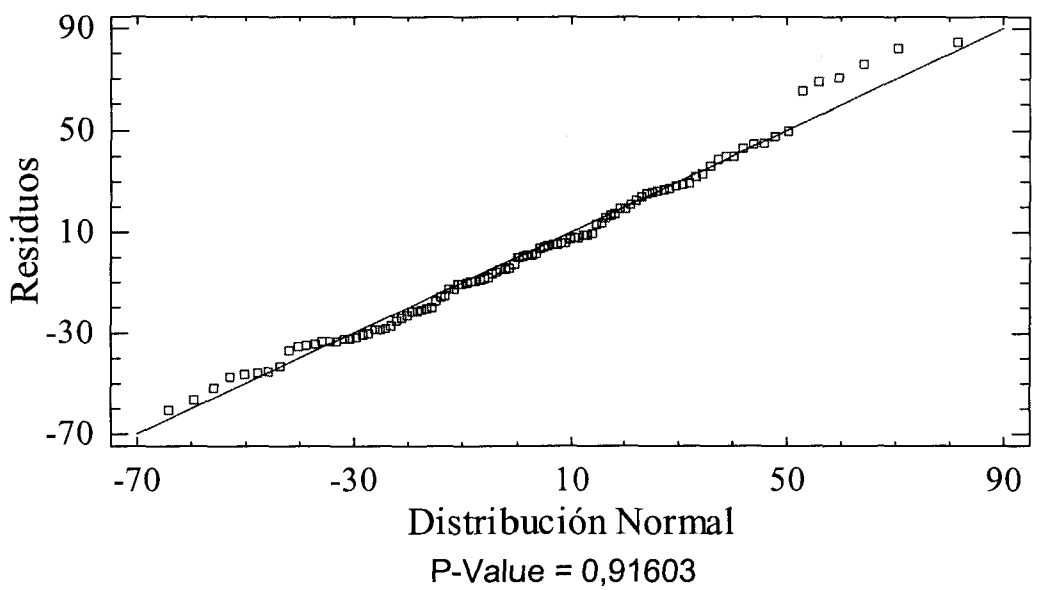


Figura 5. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 2 para tiempo de desplazamiento.

Para el modelo 2, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 11. Análisis de regresión del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.

Dependent variable: T_d

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-25,596	14,929	-1,71451	0,0895
Ln (s)	41,3314	10,7637	3,83989	0,0002
Ln (D)	25,8917	7,85433	3,29648	0,0013
m	3,57089	0,757776	4,71233	0,0000

Cuadro 12. Análisis de varianza del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	92356,4	3	30785,5	28,77	0,0000
Residual	109132,0	102	1069,92		
Total (Corr.)	201488,0	105			

R-squared = 45,8372 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 44,2442 percent
Standard Error of Est. = 32,7096
Mean absolute error = 25,724
Durbin-Watson statistic = 1,95036

Para el modelo 3, del análisis de regresión se desprende que los parámetros son significativos y aportan al modelo. Además, de acuerdo con el análisis de varianza, se puede afirmar que existe relación lineal entre las variables

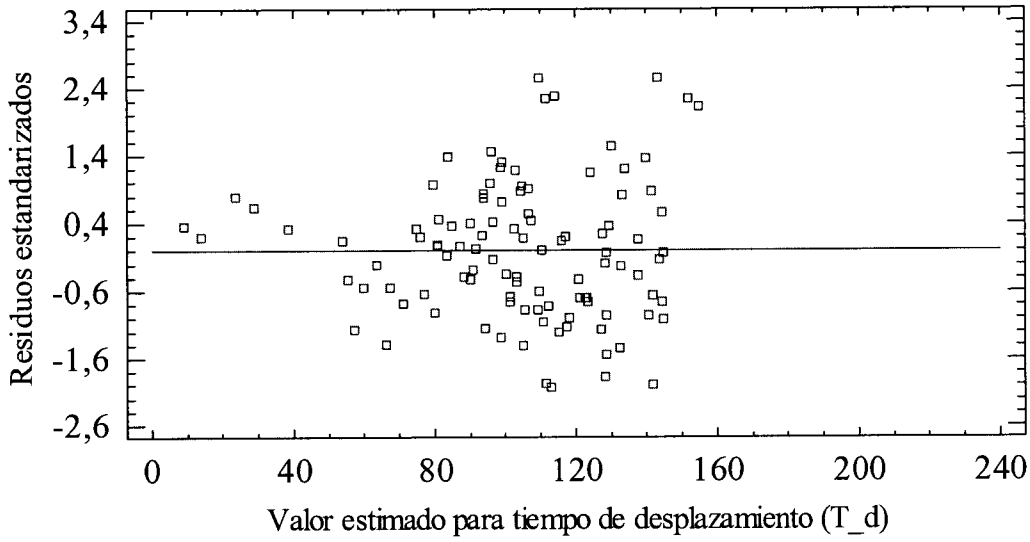


Figura 6. Gráfico de residuos del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.

El gráfico de residuos para el modelo 3, muestra que persiste una dispersión cónica de los residuos con respecto al valor cero, a pesar de las transformaciones realizadas a las variables independientes.

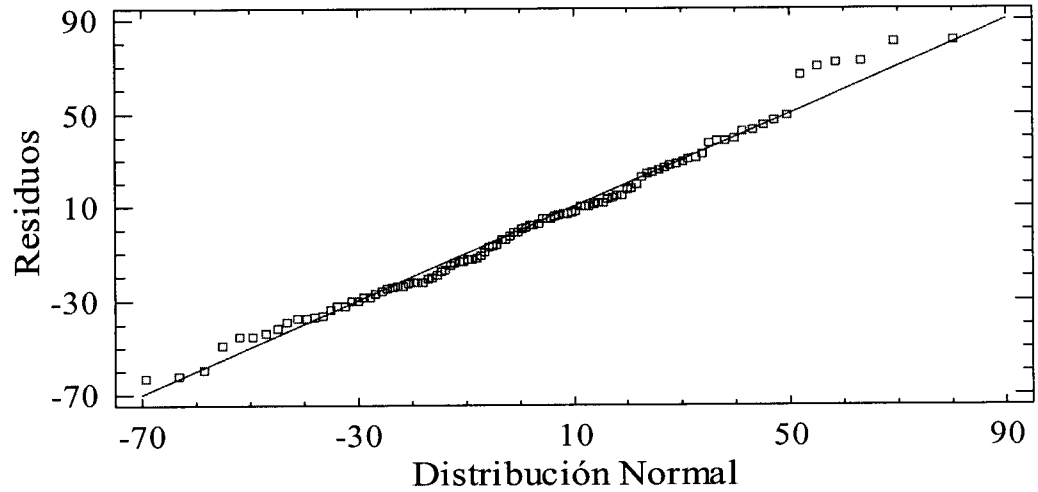


Figura 7. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 3 para tiempo de desplazamiento.

Para el modelo 3, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 13. Análisis de regresión del modelo 4 para tiempo de desplazamiento.

Dependent variable: T_d

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-46,1361	18,0088	-2,56186	0,0119
D	2,53194	1,03045	2,45712	0,0157
s	18,7288	4,17634	4,48452	0,0000
Ln (m)	33,0221	6,92626	4,76766	0,0000

Cuadro 14. Análisis de varianza del modelo 4 para tiempo de desplazamiento (T_d).

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	87944,6	3	29314,9	26,33	0,0000
Residual	113543,0	102	1113,17		
Total (Corr.)	201488,0	105			

R-squared = 43,6476 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 41,9901 percent
Standard Error of Est. = 33,3642
Mean absolute error = 26,4556
Durbin-Watson statistic = 1,85414

Para el modelo 4, del análisis de regresión se desprende que los parámetros son significativos y aportan al modelo. Además, el análisis de varianza muestra que existe una relación lineal entre las variables.

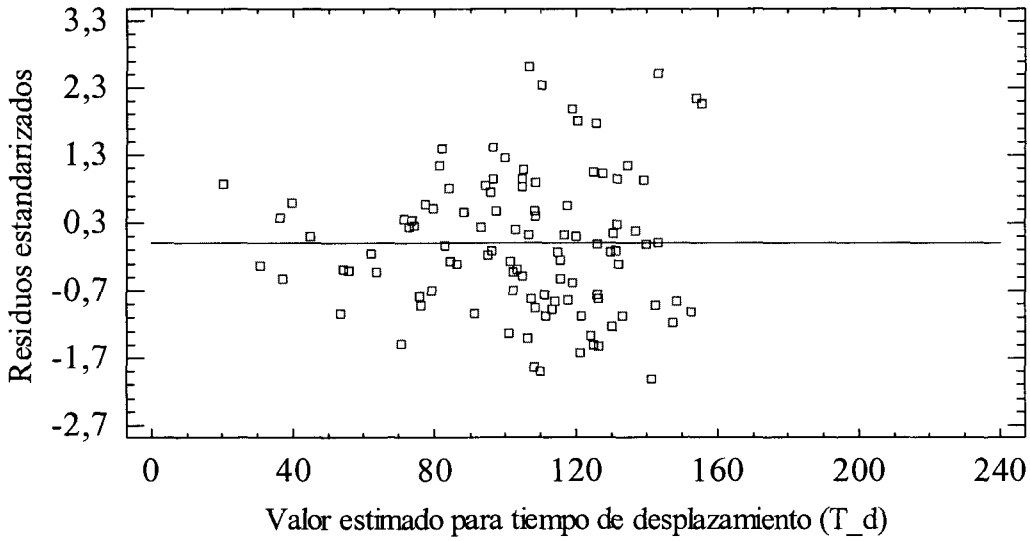


Figura 8. Gráfico de residuos del modelo 4 para tiempo de desplazamiento.

El gráfico de residuos para el modelo 4, muestra que persiste una dispersión cónica de los residuos con respecto al valor cero, a pesar de las transformaciones realizadas a las variables independientes.

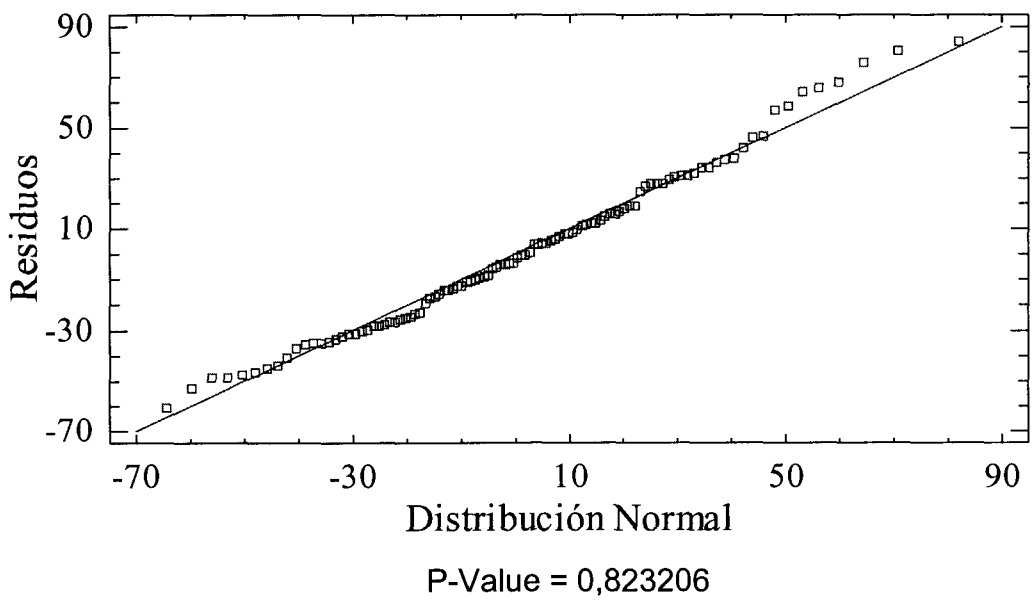


Figura 9. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 4 para tiempo de desplazamiento.

Para el modelo 4, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 15. Análisis de regresión del modelo 5 para tiempo de desplazamiento (T_d).

Dependent variable: Ln (T_d)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	3,11544	0,148427	20,9897	0,0000
D	0,0301444	0,010818	2,78651	0,0064
s	0,248691	0,0439755	5,65522	0,0000
m	0,0419365	0,00808414	5,18751	0,0000

Cuadro 16. Análisis de varianza del modelo 5 para tiempo de desplazamiento (T_d).

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	12,8104	3	4,27012	34,46	0,0000
Residual	12,6405	102	0,123926		
Total (Corr.)	25,4508	105			

R-squared = 50,3338 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 48,873 percent
Standard Error of Est. = 0,352031
Mean absolute error = 0,276932
Durbin-Watson statistic = 1,95023

Con la transformación del tipo logarítmica realizada sobre la variable dependiente T_d, tanto la constante del modelo como los coeficientes de regresión son significativos. Además, existe un incremento en el R^2 aj.

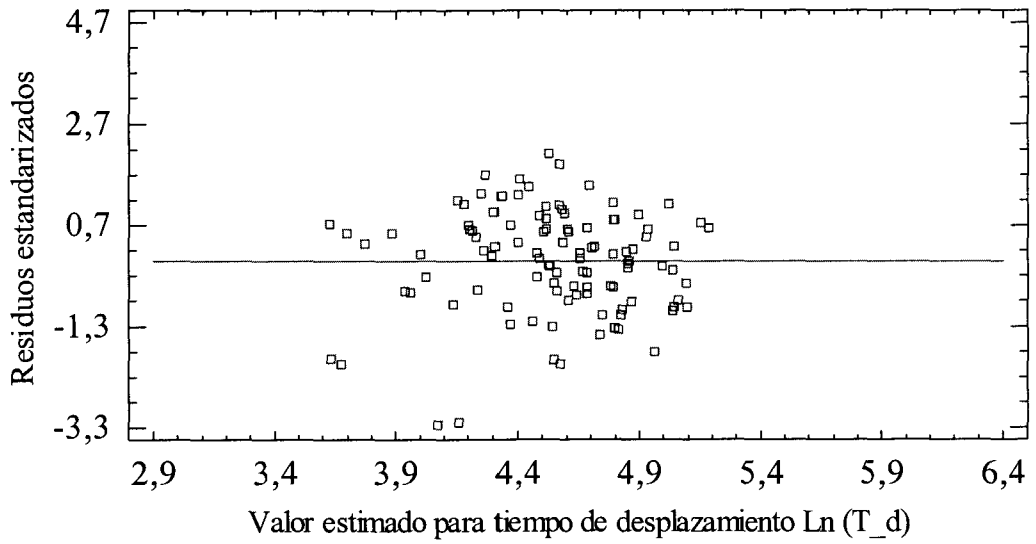


Figura 10. Gráfico de residuos del modelo 5 para tiempo de desplazamiento.

El gráfico de residuos para el modelo 5, muestra que la dispersión de los residuos con respecto al valor cero es homogénea, aceptándose el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad.

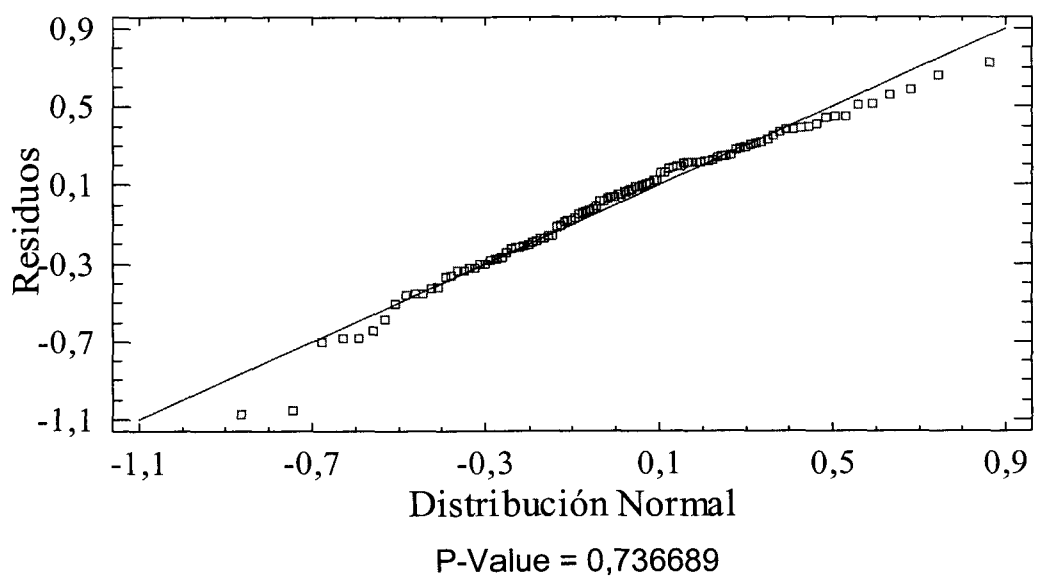


Figura 11. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 5 para tiempo de desplazamiento.

De acuerdo al análisis gráfico y al valor-p obtenido, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente para el modelo 5.

Cuadro 17. Análisis de regresión del modelo 6 para tiempo de desplazamiento.

Dependent variable: Ln (T_d)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	3,2206	0,133695	24,0891	0,0000
D	0,029896	0,0107402	2,78357	0,0064
Ln (s)	0,64631	0,111403	5,80154	0,0000
m	0,0389505	0,00808918	4,81513	0,0000

Cuadro 18. Análisis de varianza del modelo 6 para tiempo de desplazamiento.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	12,9666	3	4,32219	35,31	0,0000
Residual	12,4843	102	0,122395		
Total (Corr.)	25,4508	105			

R-squared = 50,9475 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 49,5048 percent
Standard Error of Est. = 0,34985
Mean absolute error = 0,274561
Durbin-Watson statistic = 1,98575

Para el modelo 6 de tiempo de desplazamiento T_d, tanto la constante del modelo como los coeficientes de regresión son significativos. Además, existe un incremento en el R^2 aj con respecto al modelo 5.

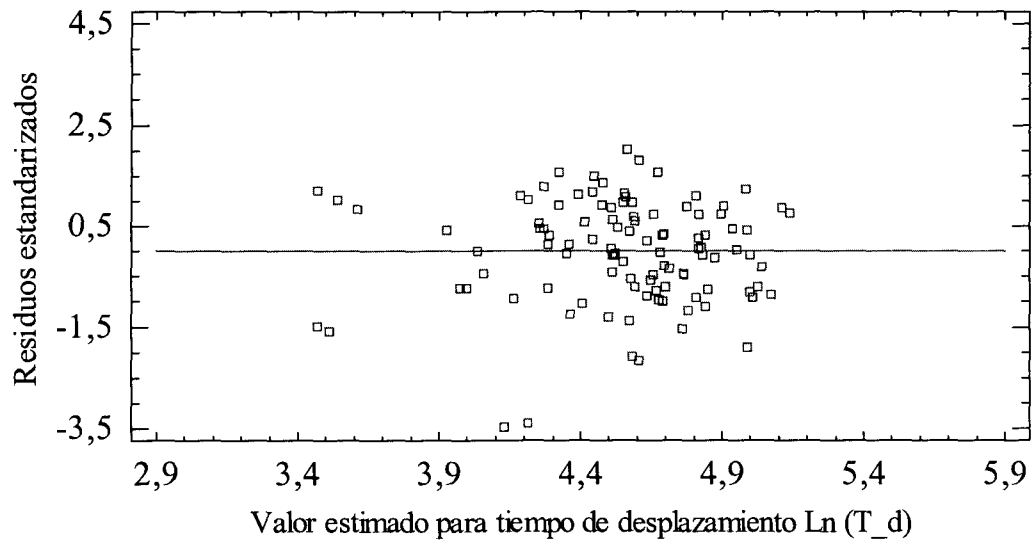


Figura 12. Gráfico de residuos del modelo 6 para tiempo de desplazamiento

El gráfico de residuos para el modelo 6, muestra que la dispersión de los residuos con respecto al valor cero es homogénea, aceptándose el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad.

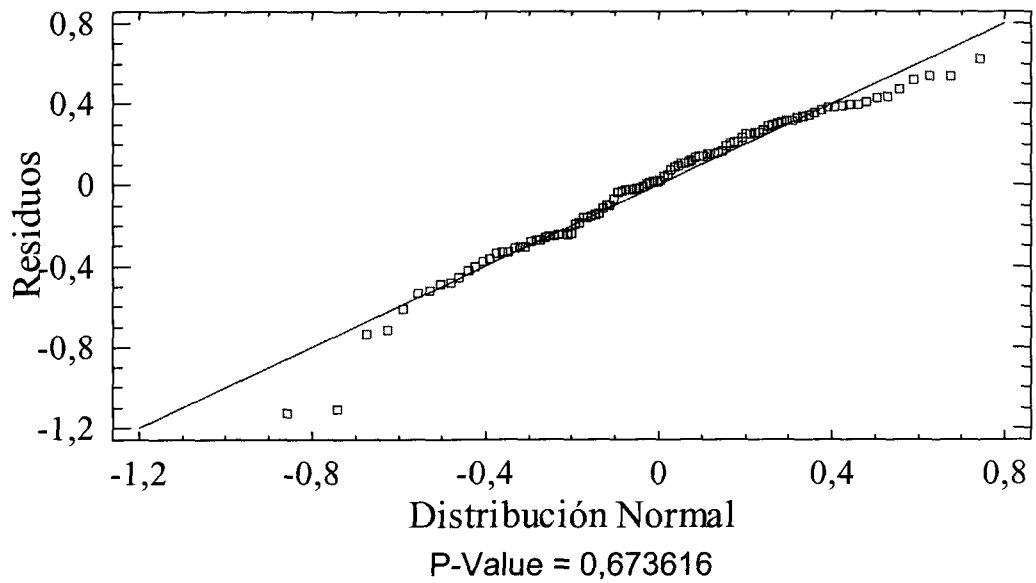


Figura 13. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 6 para tiempo de desplazamiento

Para el modelo 6, de acuerdo al análisis gráfico y al valor-p obtenido, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 19. Análisis de regresión del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.

Dependent variable: Ln (T_d)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	2,81881	0,162234	17,375	0,0000
m	0,0397368	0,00775806	5,122	0,0000
s	0,218211	0,0430101	5,07348	0,0000
Ln (D)	0,339764	0,080083	4,24265	0,0000

Cuadro 20. Análisis de varianza del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	13,8885	3	4,62951	40,84	0,0000
Residual	11,5623	102	0,113356		
Total (Corr.)	25,4508	105			

R-squared = 54,5701 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 53,2339 percent
Standard Error of Est. = 0,336683
Mean absolute error = 0,267818
Durbin-Watson statistic = 1,88555

Para el modelo 7 de tiempo de desplazamiento T_d, tanto la constante del modelo como los coeficientes de regresión son significativos. Además, existe un incremento en el R^2 aj con respecto al modelo 6.

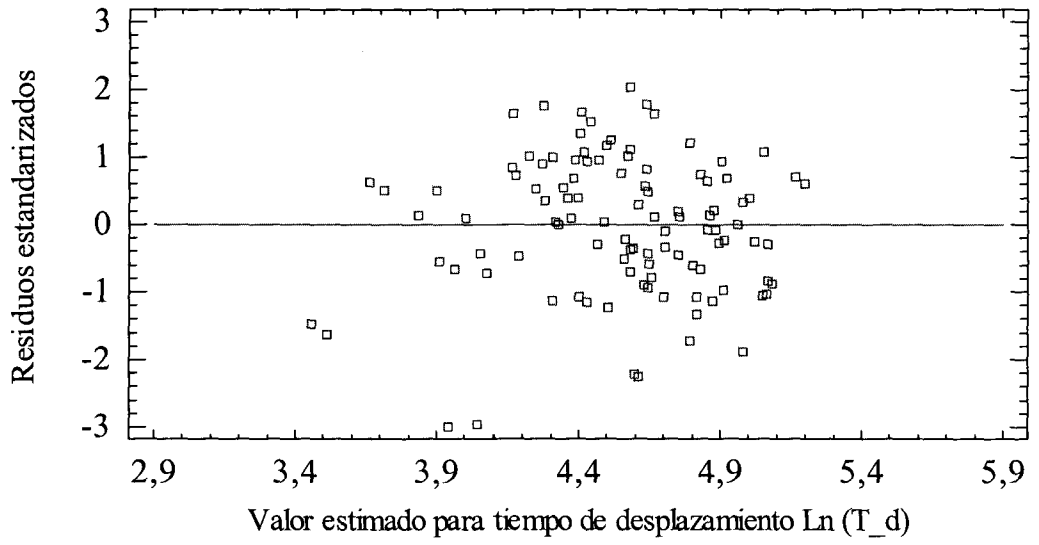


Figura 14. Gráfico de residuos del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.

El gráfico de residuos para el modelo 7, muestra que la dispersión de los residuos con respecto al valor cero es homogénea, aceptándose el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad.

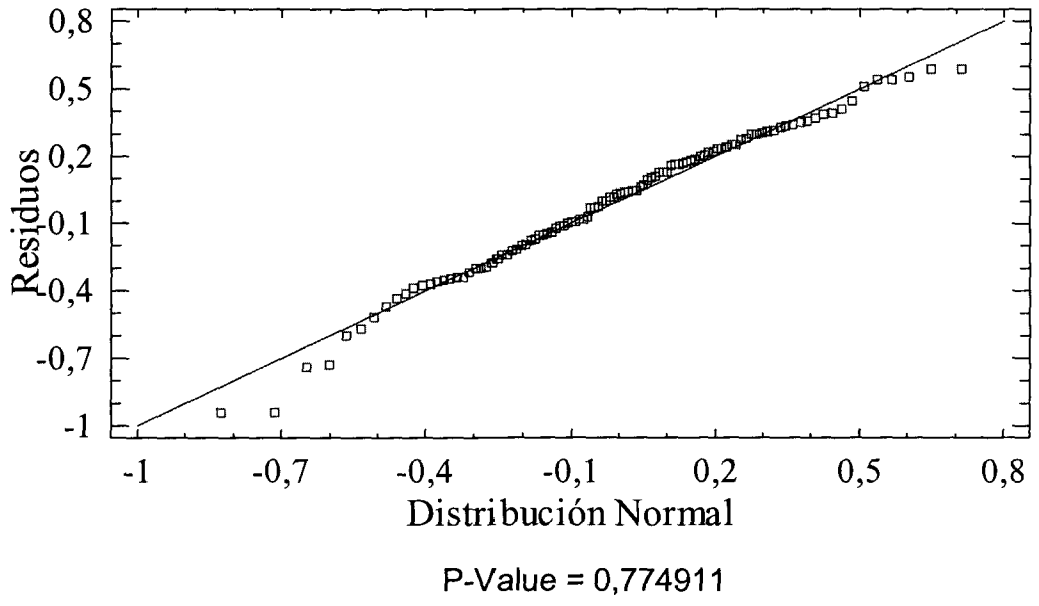


Figura 15. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 7 para tiempo de desplazamiento.

Para el modelo 7, de acuerdo al análisis gráfico y al valor-p obtenido, el supuesto de normalidad de los residuos se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 21. Análisis de regresión del modelo 8 para tiempo de desplazamiento.

Dependent variable: Ln (T_d)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	2,47315	0,193847	12,7583	0,0000
Ln (m)	0,353141	0,0704091	5,01556	0,0000
s	0,213568	0,0432607	4,93678	0,0000
Ln (D)	0,33013	0,0808039	4,08557	0,0001

Cuadro 22. Análisis de varianza del modelo 8 para tiempo de Desplazamiento.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	13,7904	3	4,5968	40,21	0,0000
Residual	11,6604	102	0,114318		
Total (Corr.)	25,4508	105			

R-squared = 54,1845 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 52,837 percent
Standard Error of Est. = 0,338109
Mean absolute error = 0,27145
Durbin-Watson statistic = 1,83614

Para el modelo 8 de tiempo de desplazamiento T_d, tanto la constante del modelo como los coeficientes de regresión son significativos. Además, el R^2 aj disminuye con respecto al modelo 7.

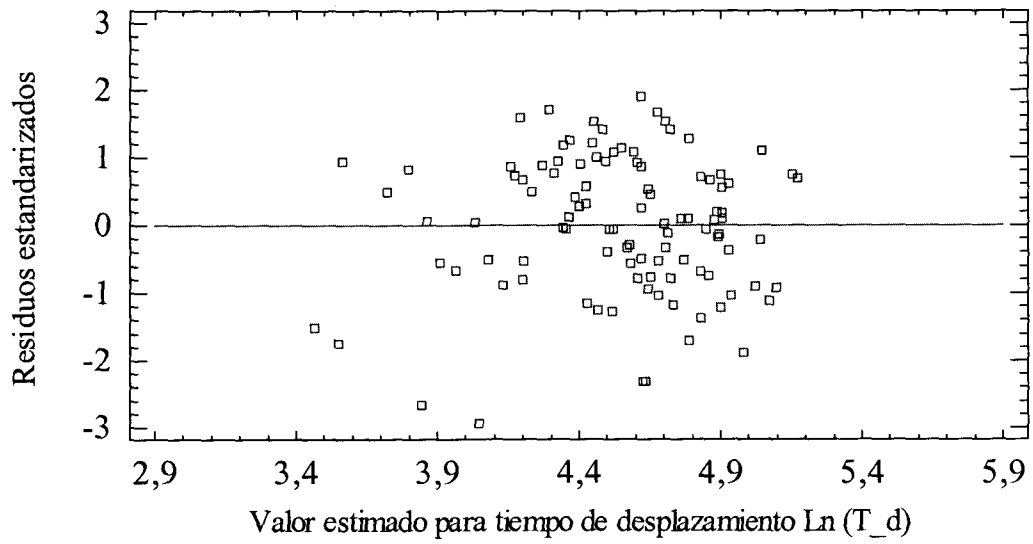


Figura 16. Gráfico de residuos del modelo 8 para tiempo de desplazamiento

El gráfico de residuos para el modelo 8, muestra que la dispersión de los residuos con respecto al valor cero es homogénea, aceptándose el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad.

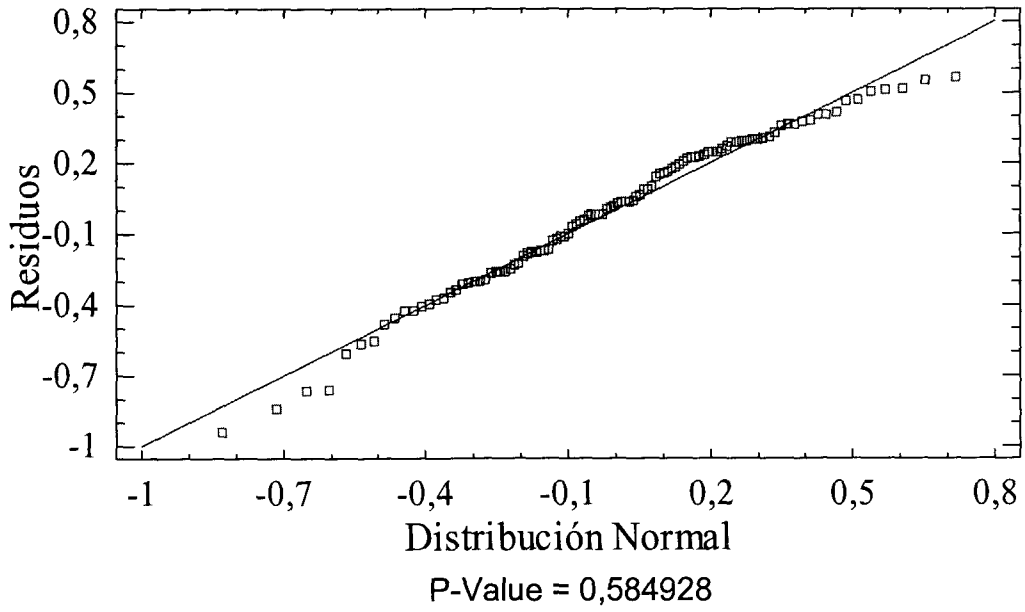


Figura17. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 8 para tiempo de Desplazamiento.

Para el modelo 8, de acuerdo al análisis gráfico y al valor-p obtenido, el supuesto de normalidad de los residuos se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 23. Resumen estadístico de las variables utilizadas en el ajuste de modelos para tiempo de desplazamiento.

	T_d	s	m	D
n	106	106	106	106
Media	103,889	3,19811	9,90566	7,08585
Varianza	1918,93	0,712758	18,8101	11,9509
Desviación estándar	43,8056	0,84425	4,33706	3,45701
Mínimo	19,8	1,0	3,0	1,9
Máximo	223,8	5,0	20,0	20,2
Rango	204,0	4,0	17,0	18,3

APÉNDICE 3. Ajuste de modelos para tiempo de volteo

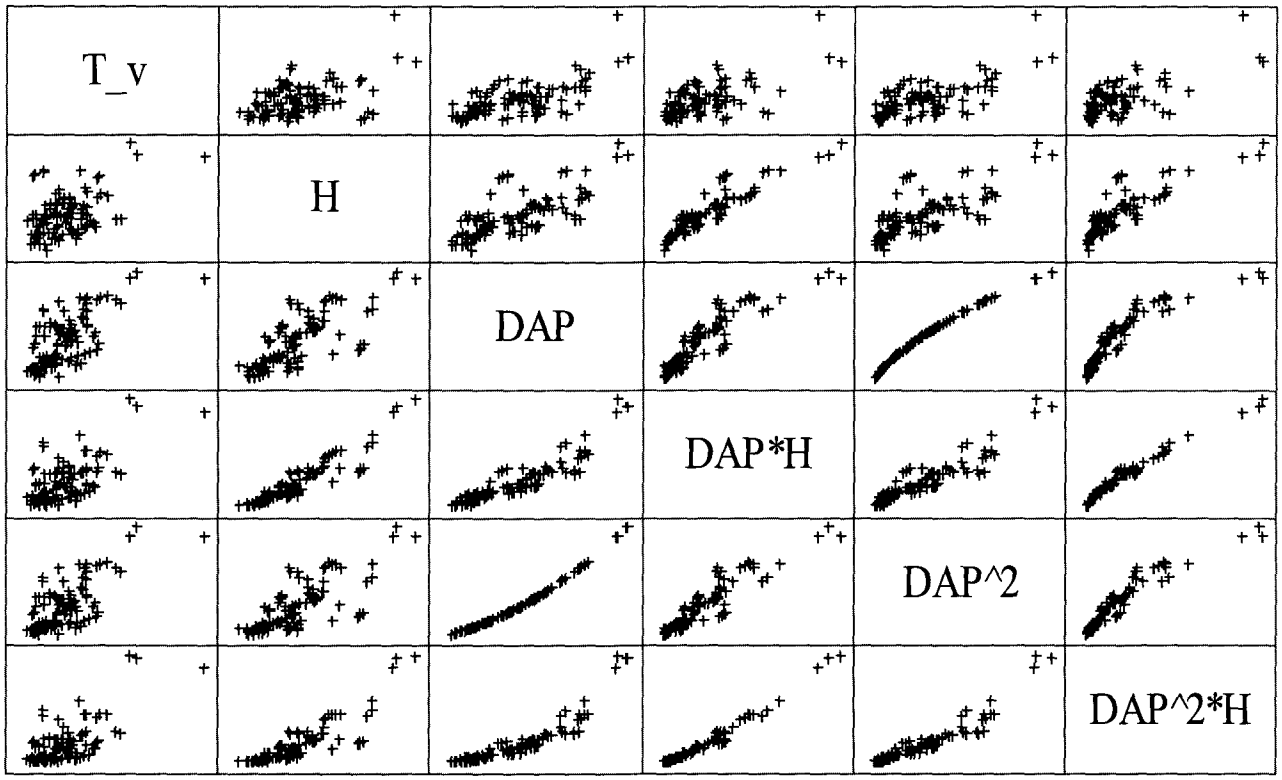


Figura18. Gráficos bidimensionales correspondientes al ajuste de modelos para tiempo de volteo.

De acuerdo al análisis gráfico de la relación lineal entre las posibles variables explicativas para el tiempo de volteo T_v, se aprecia que la relación T_v - DAP posee una mejor relación lineal. Además, parece existir una relación lineal entre DAP y H.

Para este caso las transformaciones del tipo logarítmicas, no presentaron mayores correlaciones que las variables originales.

Cuadro 24. Matriz de correlación asociada al ajuste de modelos para tiempo de volteo.

	T_v	H	DAP	DAP*H	DAP^2
T_v		0,4918	0,6931	0,6495	0,7183
H	0,4918		0,7347	0,9248	0,7402
DAP	0,6931	0,7347		0,8977	0,9871
DAP*H	0,6495	0,9248	0,8977		0,9227
DAP^2	0,7183	0,7402	0,9871	0,9227	
DAP^2*H	0,6879	0,8487	0,8888	0,9821	0,9354

	DAP^2*H
T_v	0,6879
H	0,8487
DAP	0,8888
DAP*H	0,9821
DAP^2	0,9354

De la matriz de correlación se desprende que existe relación lineal entre DAP y H. Además, la variable DAP^2 en la que mejor se ajusta, bajo este análisis, a la variable dependiente T_v. La combinación DAP^2*H, que es usada generalmente para representar el volumen del árbol, presenta una baja relación con el tiempo de volteo, en comparación con DAP^2.

Cuadro 25. Análisis de regresión del modelo 1 para tiempo de volteo.

Dependent variable: T_v

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	2,12054	1,42562	1,48745	0,1399
H	0,765623	0,132929	5,75962	0,0000

Cuadro 26. Análisis de varianza del modelo 1 para tiempo de volteo.

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	810,65	1	810,65	33,17	0,0000
Residual	2541,44	104	24,4369		
Total (Corr.)	3352,08	105			

R-squared = 24,1834 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 23,4544 percent
Standard Error of Est. = 4,94337
Mean absolute error = 3,7036
Durbin-Watson statistic = 1,70424

El análisis de regresión da cómo resultado que el parámetro del modelo es estadísticamente significativo, al contrario de lo ocurrido con el intercepto. Además, el R^2 aj posee un valor muy bajo.

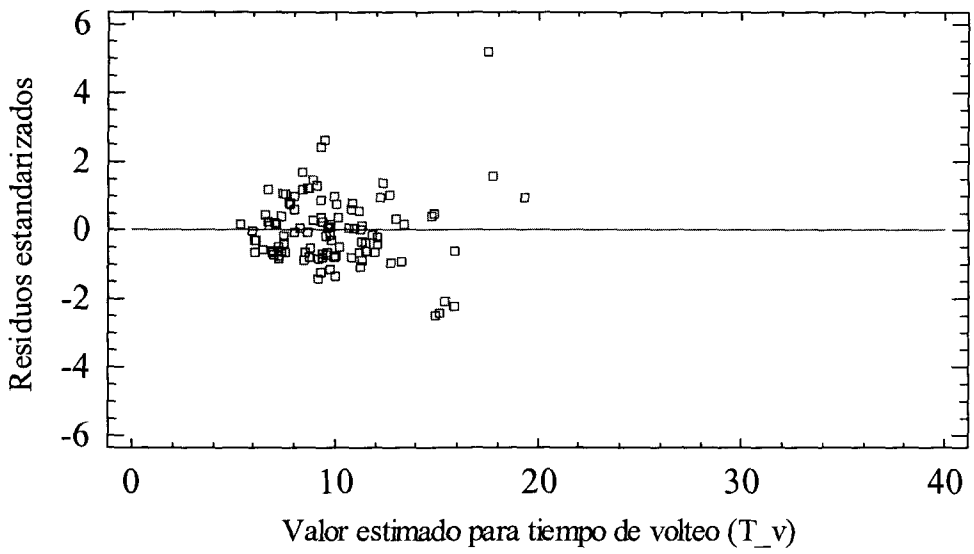
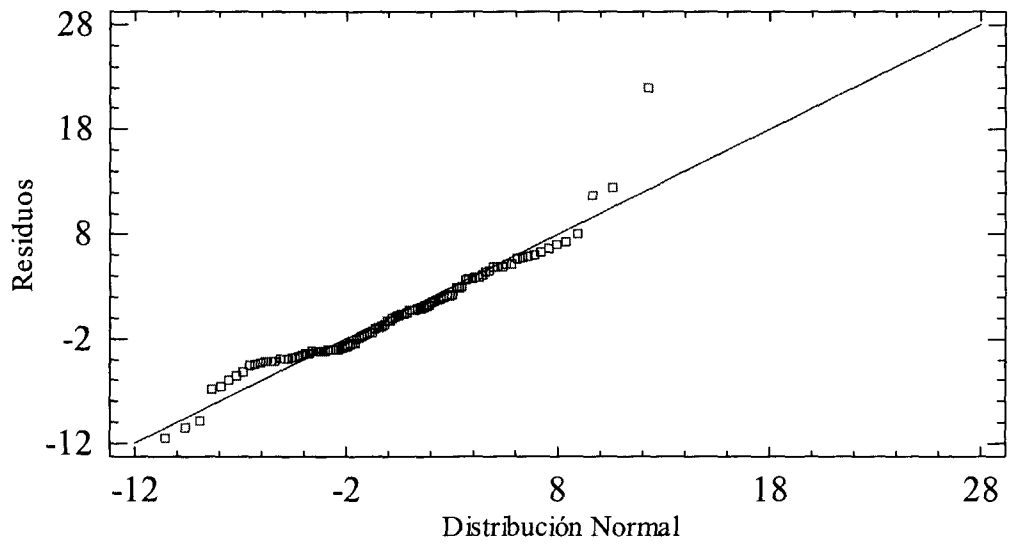


Figura 19. Gráfico de residuos del modelo 1 para tiempo de volteo.

El gráfico de residuos para el modelo 1 de tiempo de volteo, muestra una dispersión cónica con respecto al valor cero, no cumpliendo con el supuesto de homocedasticidad. Además, se aprecia la presencia de un dato atípico con un residuo superior a 5.



P-Value = 0,333917

Figura 20. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 1 para tiempo de Volteo.

El supuesto de normalidad de los residuos, se cumple satisfactoriamente para este modelo, de acuerdo al análisis gráfico y valor-p obtenido.

Cuadro 27. Análisis de regresión del modelo 2 para tiempo de volteo.

Dependent variable: T_v

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-2,34908	1,30622	-1,79838	0,0750
DAP	0,994084	0,101378	9,8057	0,0000

Cuadro 28. Análisis de varianza del modelo 2 para tiempo de volteo.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1610,32	1	1610,32	96,15	0,0000
Residual	1741,76	104	16,7477		
Total (Corr.)	3352,08	105			

R-squared = 48,0394 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 47,5398 percent
Standard Error of Est. = 4,0924
Mean absolute error = 2,84937
Durbin-Watson statistic = 1,74972

El análisis de regresión para este modelo, da cómo resultado que el coeficiente de éste es estadísticamente significativo, al contrario de lo ocurrido con len intercepto. Además, el R^2 aj registra un incremento con respecto al modelo 1.

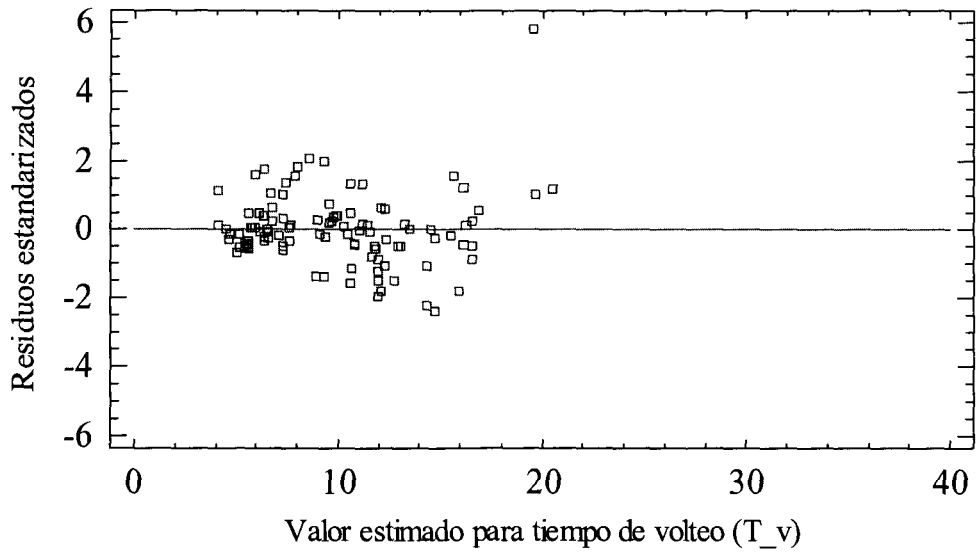
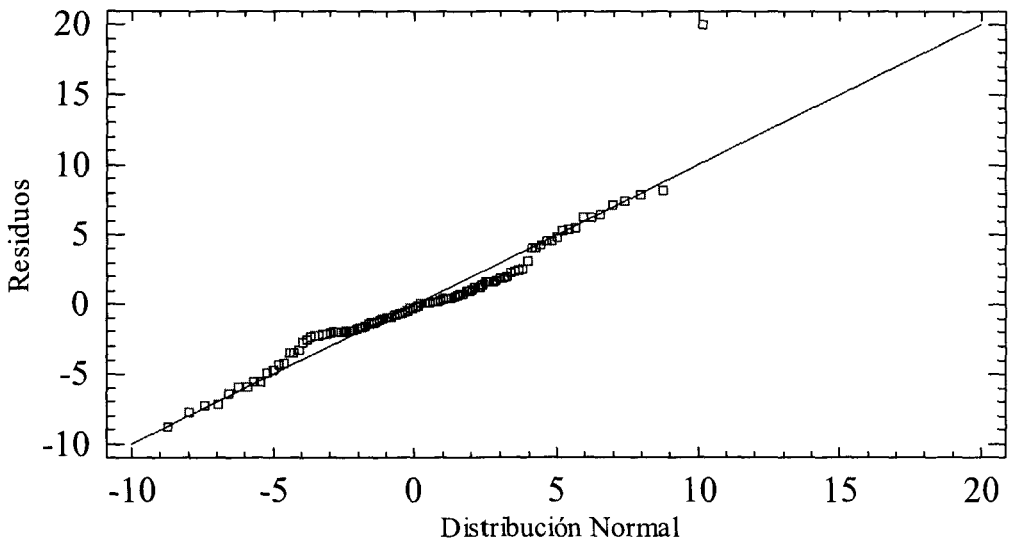


Figura 21. Gráfico de residuos del modelo 2 para tiempo de volteo.

Para este caso los residuos se comportan de forma homogénea con respecto al valor cero, cumpliendo con el supuestote homocedasticidad. Sin embargo, se observa la presencia de un dato muy alejado del resto.



P-Value = 0,180764

Figura 22. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 2 para tiempo de volteo.

Al observar la distribución de los puntos sobre el gráfico y el valor-p obtenido, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente para este modelo.

Cuadro 29. Análisis de regresión del modelo 3 para tiempo de volteo.

Dependent variable: T_v

Parameter	Estimate	Error	Standard Statistic	T P-Value
CONSTANT	3,56615	0,70958	5,02572	0,0000
DAP^2	0,0378627	0,00359571	10,53	0,0000

Cuadro 30. Análisis de varianza del modelo 3 para tiempo de volteo.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1729,71	1	1729,71	110,88	0,0000
Residual	1622,38	104	15,5998		
Total (Corr.)	3352,08	105			

R-squared = 51,6009 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 51,1355 percent
Standard Error of Est. = 3,94966
Mean absolute error = 2,82054
Durbin-Watson statistic = 1,756

El análisis de regresión muestra que tanto la constante del modelo como el parámetro de éste, son estadísticamente significativos. Además, existe un aumento en el valor del R^2 aj con respecto al modelo 2.

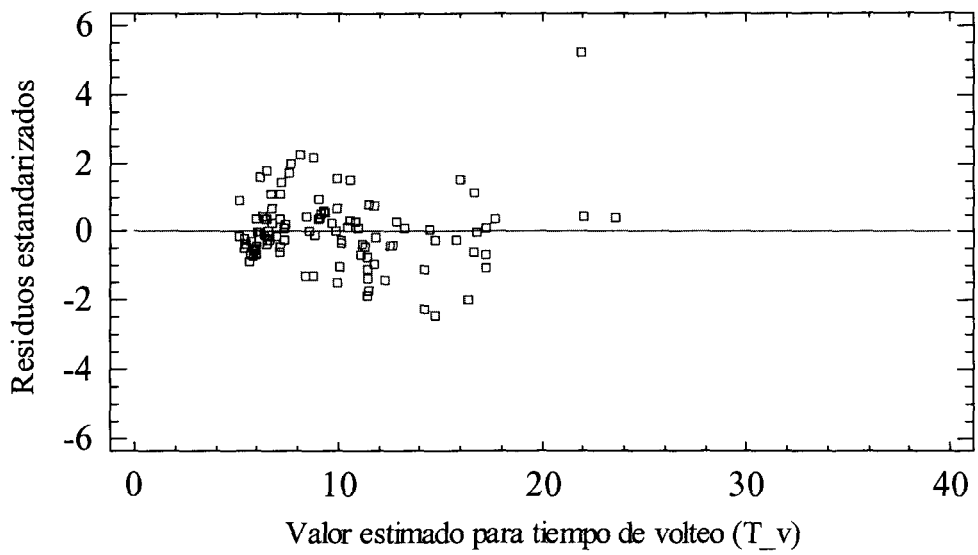
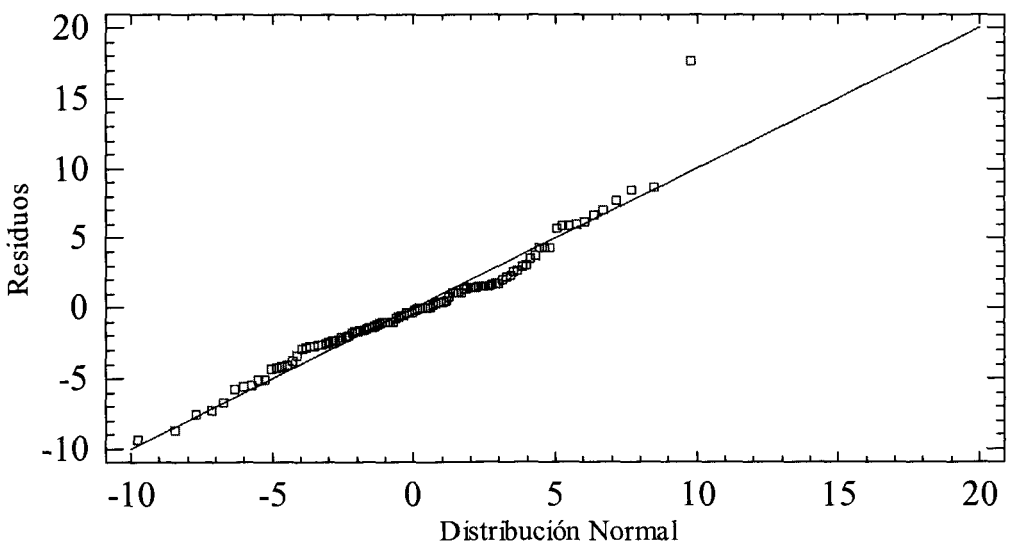


Figura 23. Gráfico de residuos del modelo 3 para tiempo de volteo.

Para este caso de la distribución de los residuos del modelo 3, se comportan de forma homogénea con respecto al valor cero, cumpliendo con el supuestote homocedasticidad. Sin embargo, se observa la presencia de un dato muy alejado del resto.



P-Value = 0,124213

Figura 24. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 3 para tiempo de volteo.

Al observar el gráfico y el valor-p obtenidos para el modelo 3, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 31. Análisis de regresión del modelo 4 para tiempo de volteo.

Dependent variable: T_v

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	4,32994	0,760014	5,69719	0,0000
DAP*H	0,0411029	0,00471843	8,71115	0,0000

Cuadro 32. Análisis de varianza del modelo 4 para tiempo de volteo.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1414,08	1	1414,08	75,88	0,0000
Residual	1938,01	104	18,6347		
Total (Corr.)	3352,08	105			

R-squared = 42,185 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 41,6291 percent
Standard Error of Est. = 4,31679
Mean absolute error = 3,25963
Durbin-Watson statistic = 1,58877

El análisis de regresión muestra que tanto la constante del modelo como el parámetro de este modelo, son estadísticamente significativos. Sin embargo, existe una disminución en el valor del R^2 aj con respecto al modelo 3.

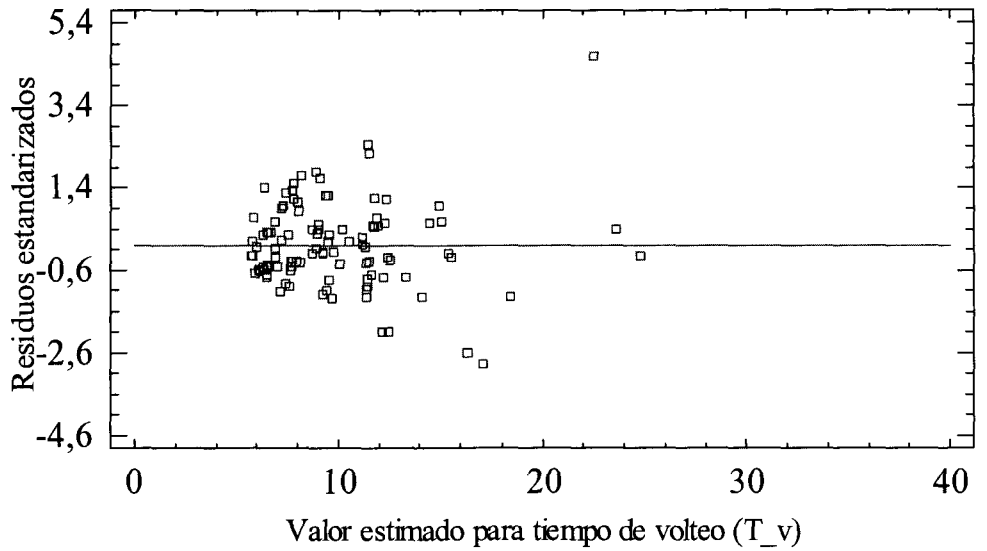
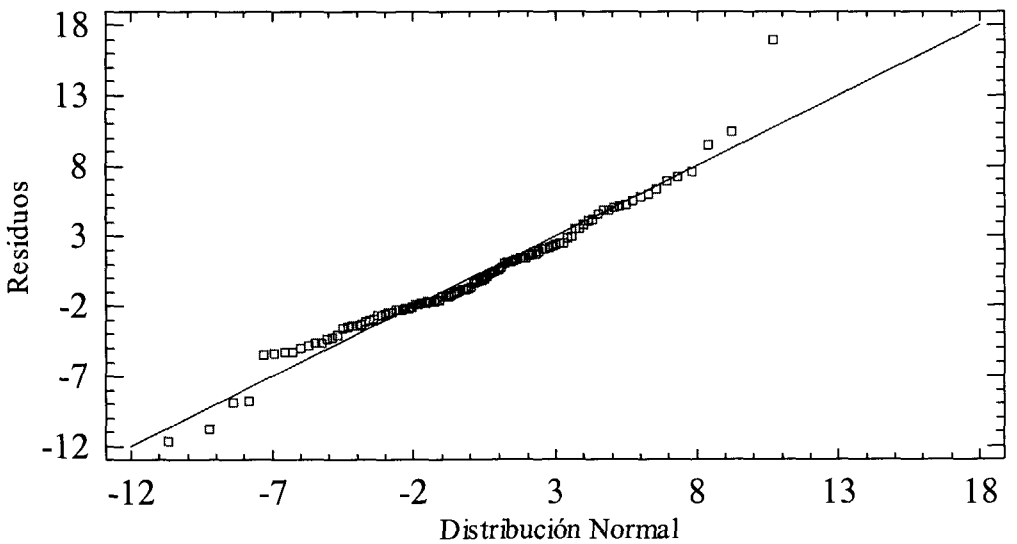


Figura 25. Gráfico de residuos del modelo 4 para tiempo de volteo.

El gráfico de residuos para el modelo 4 de tiempo de volteo, muestra una dispersión cónica con respecto al valor cero, no cumpliendo con el supuesto de homocedasticidad.



P-Value = 0,675305

Figura 26. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 4 para tiempo de volteo.

Al observar el gráfico y el valor-p obtenidos para el modelo 4, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 33. Análisis de regresión del modelo 5 para tiempo de volteo.

Dependent variable: T_v

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	6,0605	0,56045	10,8136	0,0000
DAP^2*H	0,00193274	0,000199987	9,66436	0,0000

Cuadro 34. Análisis de varianza del modelo 5 para tiempo de volteo.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1586,04	1	1586,04	93,40	0,0000
Residual	1766,04	104	16,9812		
Total (Corr.)	3352,08	105			

R-squared = 47,3151 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 46,8085 percent
Standard Error of Est. = 4,12082
Mean absolute error = 3,18561
Durbin-Watson statistic = 1,58745

El análisis de regresión muestra que tanto la constante del modelo como el parámetro de este modelo, son estadísticamente significativos. Además, del análisis de varianza se desprende que existe relación lineal entre las variables.

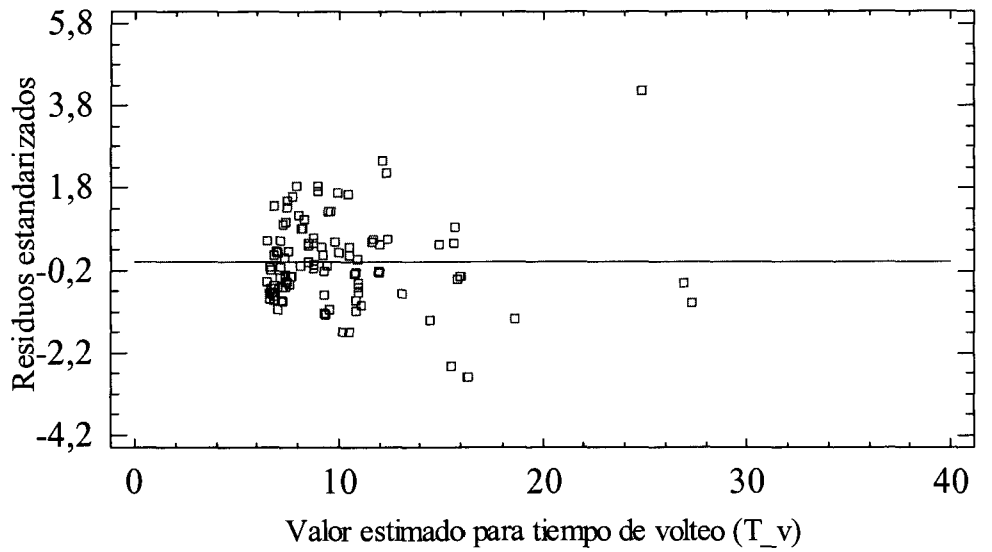
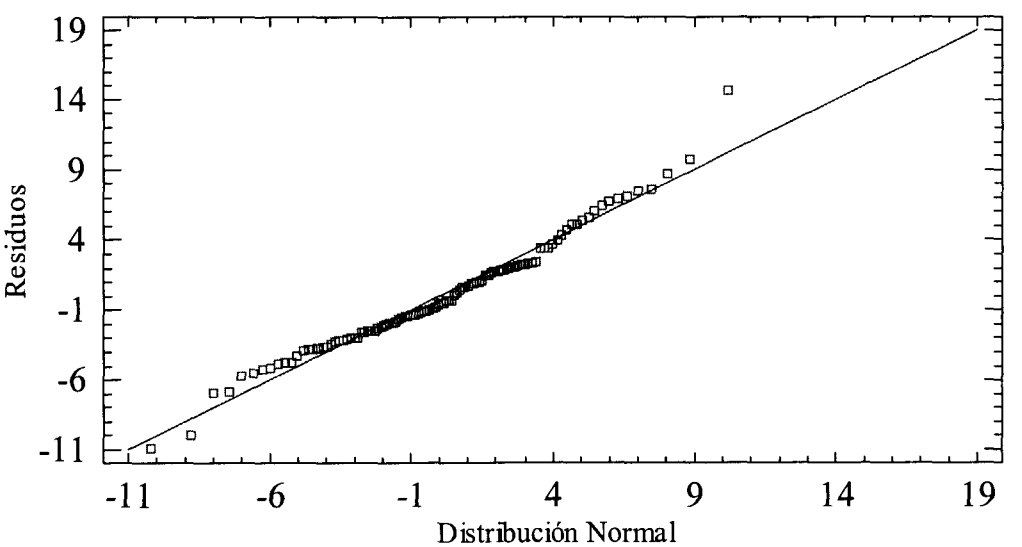


Figura 27. Gráfico de residuos del modelo 5 para tiempo de volteo.

El gráfico de residuos para el modelo 5 de tiempo de volteo, muestra una dispersión cónica con respecto al valor cero, no cumpliendo con el supuesto de homocedasticidad.



P-Value = 0,552665

Figura 28. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 5 para tiempo de volteo.

Al observar el gráfico y el valor-p obtenidos para el modelo 5, el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 35. Resumen estadístico de las variables utilizadas en el ajuste de modelos para tiempo de volteo.

	T_v	H	DAP
n	106	106	106
Media	9,85189	10,0981	12,2736
Varianza	31,9246	13,1709	15,5195
Desviación estándar	5,65019	3,62917	3,93948
Mínimo	2,3	4,2	6,5
Máximo	39,5	22,5	23,0
Rango	37,2	18,3	16,5

APÉNDICE 4. Ajuste de modelos para tiempo de desrame y trozado

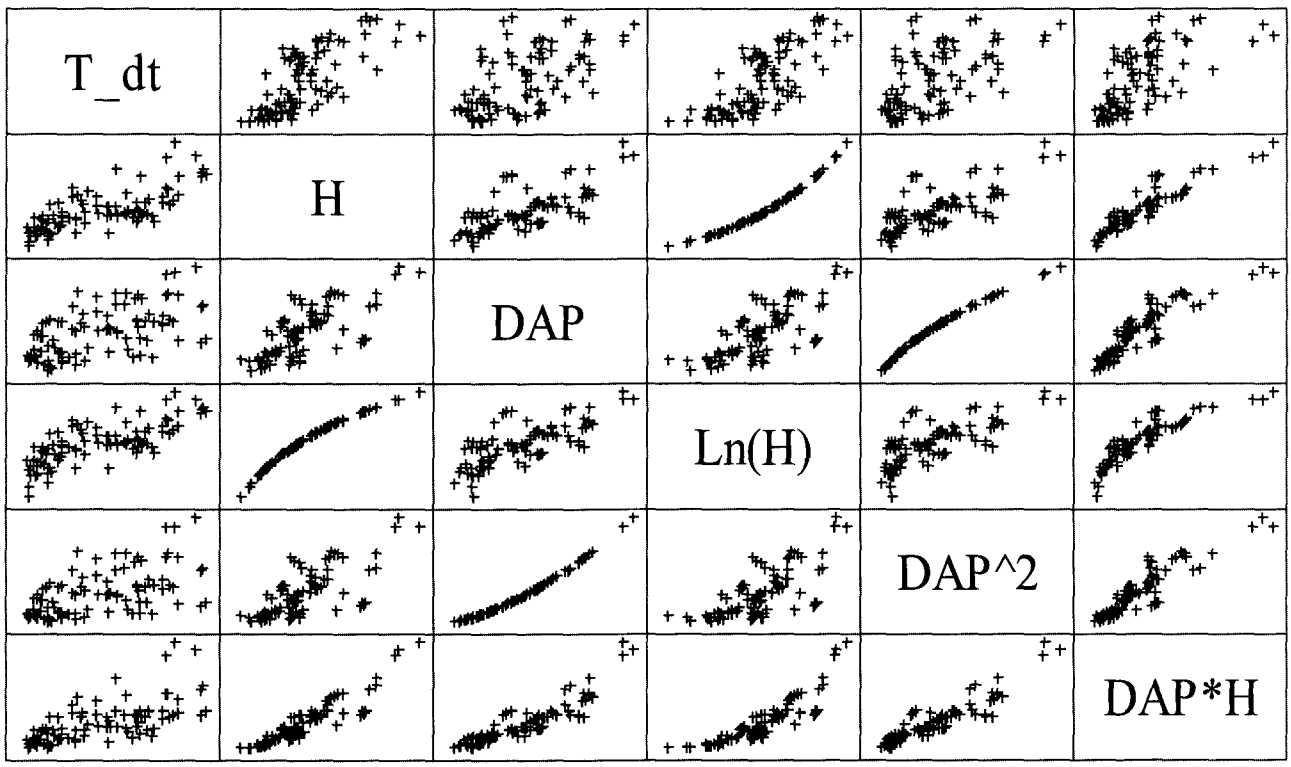


Figura 29. Gráficos bidimensionales correspondientes al ajuste de modelos para tiempo de desrame y trozado.

Al observar los gráficos de dispersión, la variable altura del árbol (H), muestra una mejor relación lineal con la variable T_dt, en comparación con la variable DAP. Además, la transformación de tipo logarítmica aplicada a la variable H, parece dar mejores resultados que la variable original.

Cuadro 36. Matriz de correlación asociada al ajuste de modelos para tiempo de desrame y trozado.

	T_dt	H	DAP	LOG(H)	DAP^2
T_dt		0,7366	0,5828	0,7473	0,5693
H	0,7366		0,7033	0,9756	0,7138
DAP	0,5828	0,7033		0,7107	0,9875
LOG(H)	0,7473	0,9756	0,7107		0,6989
DAP^2	0,5693	0,7138	0,9875	0,6989	
DAP*H	0,6718	0,9178	0,8894	0,8725	0,9159

	DAP*H
T_dt	0,6718
H	0,9178
DAP	0,8894
LOG(H)	0,8725
DAP^2	0,9159

De la matriz de correlación se desprende que la variable Ln (H), presenta la mayor correlación con respecto a la variable de interés.

Cuadro 37. Análisis de regresión del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.

Dependent variable: T_dt

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-4,19269	1,80216	-2,32648	0,0222
H	1,69099	0,16185	10,4479	0,0000

Cuadro 38. Análisis de varianza del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	3438,36	1	3438,36	109,16	0,0000
Residual	2897,9	92	31,4989		
Total (Corr.)	6336,26	93			

R-squared = 54,2649 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 53,7677 percent
Standard Error of Est. = 5,61239
Mean absolute error = 4,76416
Durbin-Watson statistic = 1,4702

El análisis de regresión muestra que tanto la constante como el coeficiente de este modelo, son estadísticamente significativos. Además, del análisis de varianza se desprende que existe relación lineal entre las variables.

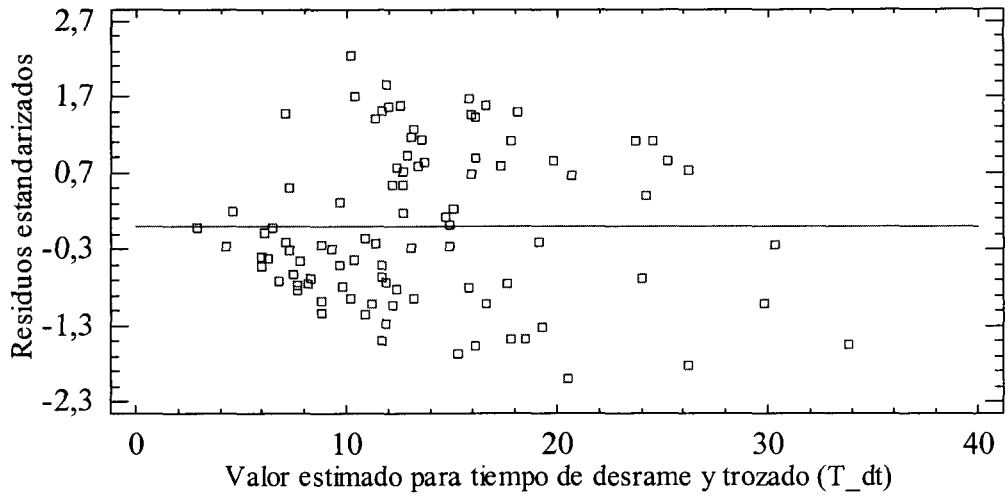
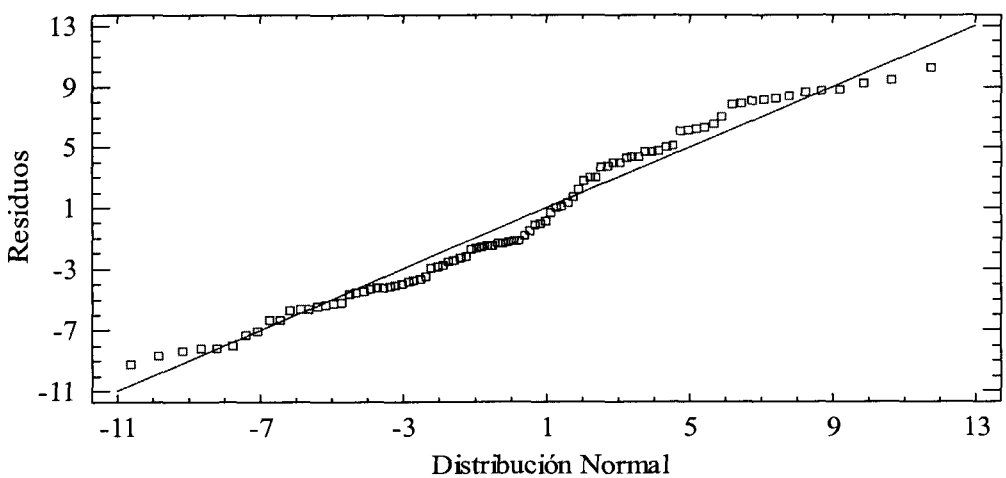


Figura 30. Gráfico de residuos del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.

De acuerdo a la distribución de los residuos con respecto al valor cero, se puede afirmar que se cumple con el supuesto de homocedasticidad. Además, se puede constatar que no existen valores tan alejados del promedio.



P-Value = 0,283509

Figura 31. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 1 para tiempo de desrame y trozado.

De acuerdo al gráfico y valor-p obtenido, el modelo cumple el supuesto de normalidad.

Cuadro 39. Análisis de regresión del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.

Dependent variable: T_dt

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-29,5042	4,04003	-7,30297	0,0000
Ln (H)	18,7442	1,7378	10,7862	0,0000

Cuadro 40. Análisis de varianza del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	3538,29	1	3538,29	116,34	0,0000
Residual	2797,97	92	30,4128		
Total (Corr.)	6336,26	93			

R-squared = 55,8419 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 55,3619 percent
Standard Error of Est. = 5,51478
Mean absolute error = 4,67919
Durbin-Watson statistic = 1,36938

Con respecto al modelo 1, se observa una aumento en el coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj).

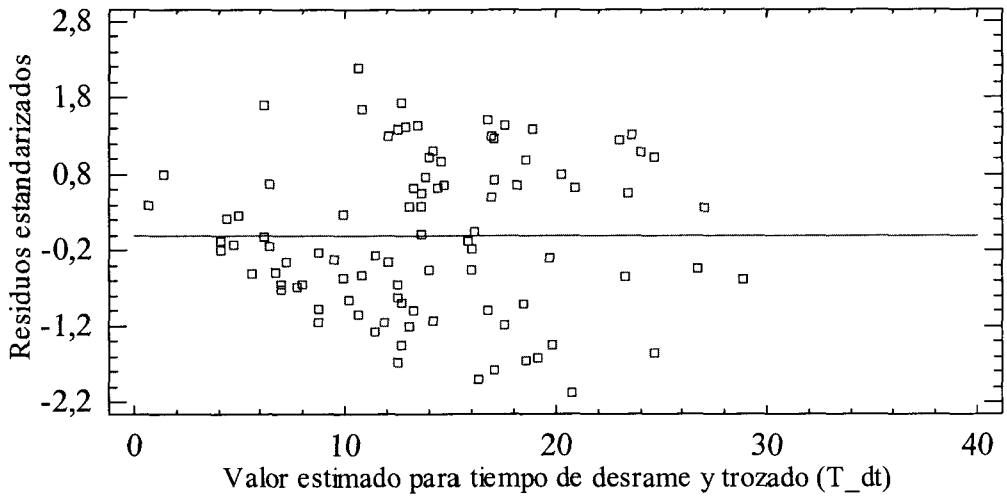
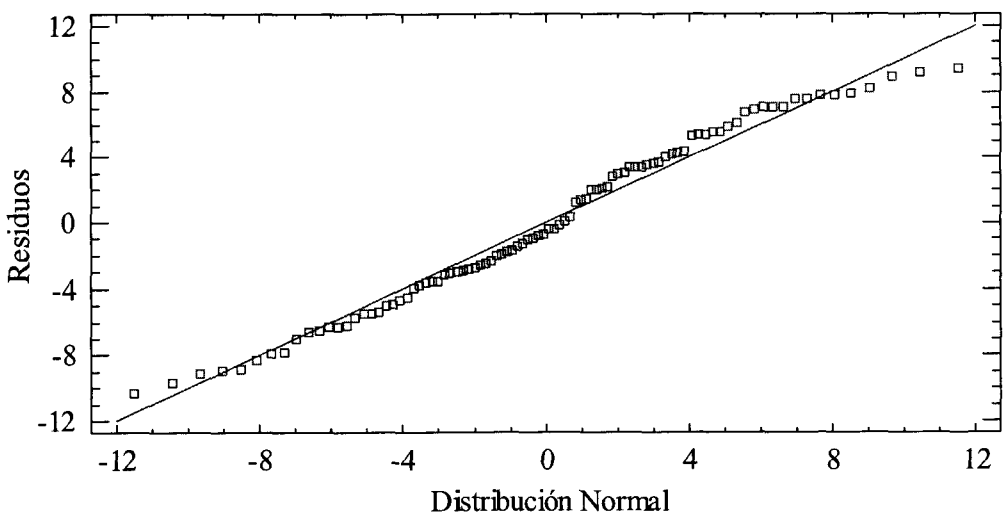


Figura 32. Gráfico de residuos del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.

De acuerdo a la distribución de los residuos con respecto al valor cero, se puede afirmar que se cumple con el supuesto de homocedasticidad.



P-Value = 0,693679

Figura 33. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 2 para tiempo de desrame y trozado.

Para el modelo 2 el supuesto de normalidad se cumple satisfactoriamente.

Cuadro 41. Análisis de regresión del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.

Dependent variable: T_dt

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	4,78339	1,19922	3,98874	0,0001
DAP*H	0,0615171	0,0070716	8,69919	0,0000

Cuadro 42. Análisis de varianza del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	2859,7	1	2859,7	75,68	0,0000
Residual	3476,57	92	37,7888		
Total (Corr.)	6336,26	93			

R-squared = 45,1322 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 44,5358 percent
Standard Error of Est. = 6,14726
Mean absolute error = 5,21803
Durbin-Watson statistic = 1,56415

Con respecto al modelo 2, se observa una disminución en el coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj). Sin embargo, al incorporar la variable DAP, el parámetro del modelo y el intercepto, siguen siendo estadísticamente significativos.

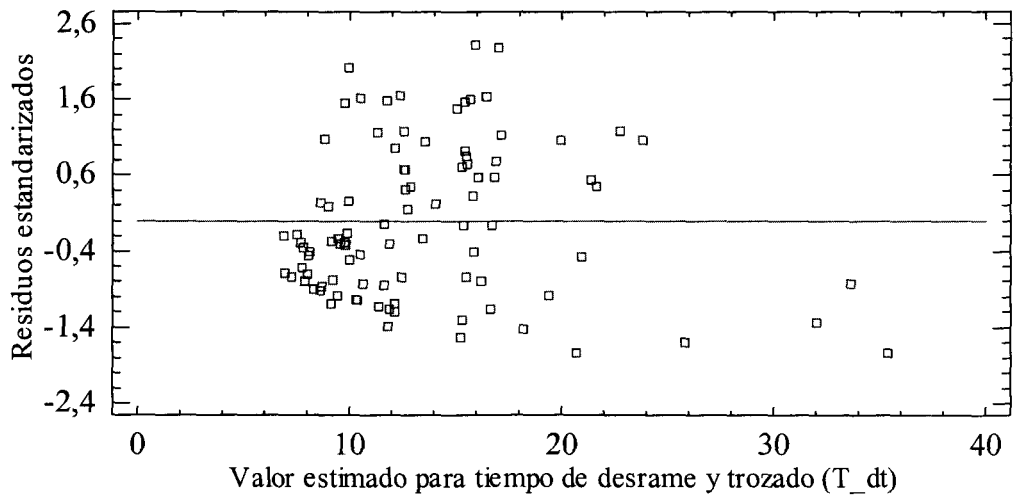


Figura 34. Gráfico de residuos del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.

El gráfico de residuos correspondiente a este modelo, presenta un comportamiento heterocedastico, distribuyéndose de forma cónica alrededor del valor cero.

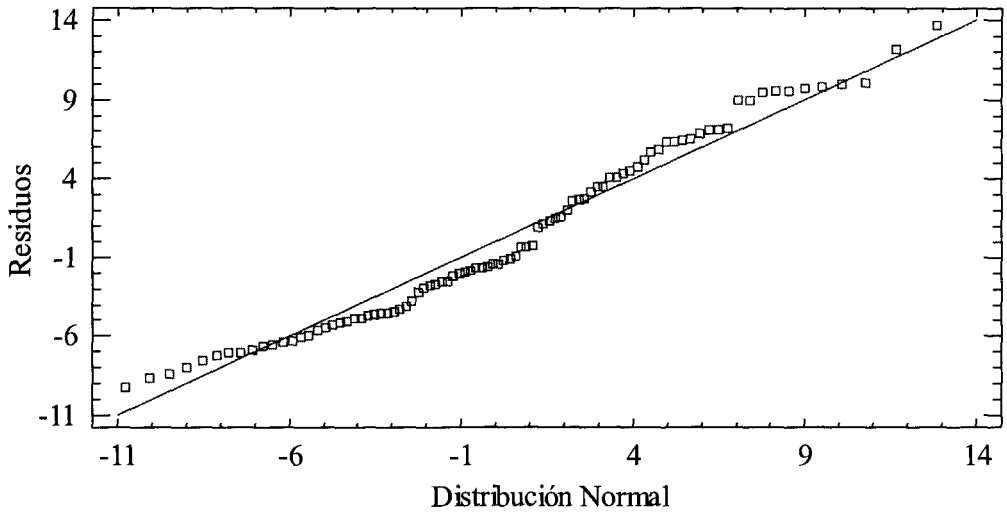


Figura 35. Gráfico de Normalidad de los residuos del modelo 3 para tiempo de desrame y trozado.

De acuerdo al valor-p obtenido, y a la distribución de los residuos sobre la línea, se cumple el supuesto de normalidad.

APÉNDICE 5. Ajuste de función de distribución de probabilidad para tiempo de preparación del sitio de volteo.

Ajuste realizado por medio de la prueba de bondad de ajuste K-S, en base a un total de 79 observaciones y para un nivel de significancia del 5 %. ($\alpha = 0,05$).

Cuadro 43. Valores obtenidos para el ajuste de funciones de distribución de probabilidades para tiempo de preparación del sitio de volteo T_p.

Distribución	Estadístico K-S.	Valor-p
Beta	0,152	0,046
Exponencial	0,114	0,234
Weilbull	0,103	0,348
Gamma	0,114	0,234
Normal	0,21	0,000
Lognormal	**0,0852**	**0,585**
Log-Logistic	0,103	0,345
Logistic	0,178	0,011

La media de la distribución Lognormal está dada por:

$\lambda = EXP\ (m\ + 1/2\ \sigma^2)$

Donde:

λ: media de la distribución

m: logaritmo de la media de los datos

σ: logaritmo de la desviación estándar de los datos

Para la muestra en estudio: m = 1.62172 y σ = 0.9319