



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA AGROFORESTAL

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE RECURSOS NATURALES Y TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

Trabajo Final de Graduación sometido al Tribunal del Área Académica Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE ARRASTRE UTILIZANDO BÚFALOS DE AGUA
(*Bubalus bubalis*) EN EL APROVECHAMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES,
LIMÓN, COSTA RICA.**

Ing. Verónica Villalobos Barquero

Cartago, Costa Rica

Diciembre, 2016

Hoja de Aprobación del Trabajo Final de Graduación

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal del Área Académica Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.

Miembros del Tribunal



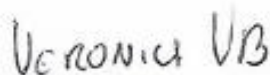
Ing. Alejandro Meza Montoya. MAE
Profesor tutor



Ing. Mario Guevara Bonilla. Msc
Lector



Ing. Roel Campos Rodríguez. Ph.D
Presidente del Tribunal
Coordinador del Área Académica Agroforestal



Ing. Verónica Villalobos Barquero
Sustentante

Dedicatoria

A las personas más importantes en mi vida, a mi familia.

Porque con el amor, el apoyo y los consejos que he recibido por parte de cada uno de ellos, he podido ir cumpliendo cada una de mis metas.

Roxana, Carlos, Luis Carlos, Josué, Rebeca y Megan. Los amo!

Pocas cosas en la vida generan tanta satisfacción como lograr el éxito. Esforzarse y finalmente conseguir lo que nos proponemos, nos llena de satisfacción personal.

Porque para conseguir el éxito sólo debes encontrar el lugar dentro de ti donde nada es imposible. Deepak Chopra

Agradecimientos

Agradecida infinitamente con la vida por las oportunidades que me da cada día. Por poner en mi camino a personas esenciales, profesionales importantes y amigos indispensables que han aportado para poder ir cumpliendo mis sueños.

Gracias Pedro, por ser uno de los pilares en este proceso, por caminar a mi lado o incluso adelante, sujetando mi mano, cuando estuve cansada. Gracias por su sacrificio y por su apoyo incondicional, especialmente durante estos dos años. ¡Te amo!

Quiero agradecer a mi tutor, Alejandro Meza Montoya, por las tantas oportunidades que me ha dado, por el camino que me ha mostrado y por la confianza que ha puesto en mí. Gracias por creer en mí y por ayudarme a superar los obstáculos a los que me he enfrentado durante este proceso y durante el ejercicio de mi profesión. Gracias Ale por no ser un jefe, sino un líder.

También quiero agradecer a todos los profesionales que participaron en este proceso como profesores de la Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, por formarme y prepararme para enfrentarme a los nuevos retos como una Máster. Gracias por su dedicación y su esfuerzo.

Además, quiero agradecer a los administrativos del Área Académica Agroforestal, por el espíritu de colaboración con el que me atendieron cada vez que necesité ayuda., y a la Escuela de Ingeniería Forestal por el apoyo recibido durante estos dos años.

Gracias a los colaboradores en el campo: Memo, María, Rodrigo, Toño, y todos aquellos que hicieron que la toma de datos fuera posible a pesar de las condiciones adversas que muchas veces se presentaron, gracias por su disponibilidad. Gracias al profesor Edgar Ortíz Malavasi, por apoyarme con el análisis estadístico de los datos durante el desarrollo del objetivo específico 3 de este trabajo, sin su guía este trabajo no hubiera sido posible.

Y finalmente quiero agradecer a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento del proyecto sobre el cual se enmarca este trabajo de graduación: *Valoración y promoción de la utilización de búfalos de agua en labores de aprovechamiento de plantaciones forestales.*

Índice general

Hoja de Aprobación del Trabajo Final de Graduación	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Índice de figuras.....	ix
Índice de anexos.....	x
Resumen.....	xi
Abstract	xii
Capítulo 1. Introducción.....	13
OBJETIVOS	14
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos.....	14
Hipótesis.....	15
Capítulo 2. Marco teórico.	15
Producción de madera reforestada: etapa de arrastre.	15
Tecnologías utilizadas para el arrastre de madera de plantaciones forestales.	16
Uso de animales en labores agroforestales: consideraciones y regulaciones.	17
Definiciones:.....	17
Modelos de Regresión.....	19
Capítulo 3. Marco metodológico.....	20
3.1 Enfoque y tipo de investigación.	20
3.2 Marco espacial y temporal.....	20
3.3 Sistematización de los objetivos.	21
3.3.1 Objetivo específico 1.	21
1. Sitio de estudio.....	21
2. Ciclo productivo de la etapa de arrastre de madera.....	21
3. Rediseño de la etapa de arrastre de madera.	22
3.3.2 Objetivo específico 2.	22
1. Determinación de la eficiencia de la etapa de arrastre	22
2. Determinación de la producción de la etapa de arrastre	23
3. Determinación de variables de interés	23
3.3.3 Objetivo específico 3.	24

1. Análisis de los datos	24
2. Modelos de regresión	25
Capítulo 4. Resultados.....	27
4.1 Objetivo específico 1.....	27
1. Sitio de estudio.....	27
2. Ciclo productivo de la etapa de arrastre.....	28
3. Rediseño de la etapa de arrastre de madera de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua.....	36
4.2 Objetivo específico 2.....	39
1. Eficiencia de la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua.....	40
2. Producción de la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua.....	43
3. Variables de interés dentro de la evaluación de la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua.....	45
4.3 Objetivo específico 3.....	46
1. Análisis de los datos	46
2. Modelos de regresión	50
<i>Validación</i>	55
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	57
Conclusiones	57
Recomendaciones	58
Capítulo 6. Bibliografía	59
Capítulo 7. Anexos.....	63

Índice de cuadros

Cuadro 1. Diferencias entre los métodos utilizados durante el arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	29
Cuadro 2. Distribución promedio del tiempo en una jornada de trabajo mediante la utilización del método de arrastre cadenas, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	34
Cuadro 3. Distribución promedio del tiempo en una jornada de trabajo mediante la utilización del método de sulky, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	35
Cuadro 4. Tratamientos aplicados por finca evaluada durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	40
Cuadro 5. Resumen promedio de las jornadas evaluadas en cada una de las fincas durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	41
Cuadro 6. Prueba de Bonferroni para los datos de producción (m ³ /h) obtenida por finca durante el arrastre de madera de plantaciones forestales, Limón, Costa Rica. 2016.	47
Cuadro 7. Prueba de Bonferroni para los datos de producción (m ³ /hora) obtenida mediante dos métodos de extracción durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.	48
Cuadro 8. Prueba de Bonferroni para los datos de producción (m ³ /hora) obtenida mediante la utilización de dos búfalos durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.	49
Cuadro 9. Estadísticos resumen obtenidos para las ecuaciones con mejor ajuste al predecir la producción (m ³ /h) del tratamiento silvicultural raleo, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica.	52
Cuadro 10. Estadísticos resumen obtenidos para las ecuaciones con mejor ajuste al predecir la producción (m ³ /h) durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	54

Índice de figuras.

Figura 1. Localización de las fincas evaluadas. Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.....	27
Figura 2. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método de cadena. Limón, Costa Rica. 2016.	28
Figura 3. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método del sulky. Limón, Costa Rica. 2016.	28
Figura 4. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método del pipante. Limón, Costa Rica. 2016.	29
Figura 5. Ciclo de producción típico del arrastre de madera utilizando búfalos de agua en plantaciones forestales. Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.	30
Figura 6. Implementos utilizados por el búfalo de agua durante la operación de arrastre en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	31
Figura 7. Movimiento de la etapa de arrastre definido como viaje vacío, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento forestal. Limón, Costa Rica. 2016.	32
Figura 8. Amarre de trozas utilizando a) cadenas y b) sulky en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	32
Figura 9. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método del sulky. Limón, Costa Rica. 2016.	36
Figura 10. Patio diseñado para el acopio de madera durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	38
Figura 11. Comportamiento de la eficiencia en función de la distancia arrastrada durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	42
Figura 12. Producción (m ³ /h) obtenida por finca durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	43
Figura 13. Comportamiento de la producción (m ³ /hora) en función de la distancia durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.....	50
Figura 14. Valores observados de producción (m ³ /h) para las variables de a) volumen por jornada, b) distancia de arrastre y c) duración total de la jornada, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	53
Figura 15. Supuesto de normalidad de los residuos para para el desarrollo de la ecuación que mejor estime la producción durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	53
Figura 16. Valores observados de producción (m ³ /h) para las variables de a) volumen por jornada, b) distancia de arrastre y c) duración total de la jornada, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.	55

Figura 17. Supuesto de normalidad de los residuos para para el desarrollo de la ecuación que mejor estime la producción durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016. 55

Índice de anexos.

Anexo 1. Formulario que contiene los movimientos definidos que componen el ciclo productivo de la etapa de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 63

Anexo 2. Producción obtenida mediante el tratamiento silvicultural: raleo durante la evaluación de 21 jornadas de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 64

Anexo 3. Producción obtenida mediante el tratamiento silvicultural: tala rasa durante la evaluación de 42 jornadas de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 65

Anexo 4. Variables determinadas durante la evaluación de los ciclos de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 67

Anexo 5. Análisis estadístico correspondiente a la evaluación de las 5 fincas en estudio durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 68

Anexo 6. Análisis estadístico correspondiente a la evaluación de los dos métodos de arrastre utilizados durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 69

Anexo 7. Análisis estadístico correspondiente a la evaluación de los dos búfalos de agua utilizados durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 70

Anexo 8. Comportamiento de la producción ($m^3/hora$) obtenida encada uno de los tratamientos silviculturales aplicado, en función de la distancia, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 71

Anexo 9. Estadísticos generados para el modelo de regresión escogido para estimar la producción ($m^3/hora$) obtenida bajo el tratamiento silvicultural raleo, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 72

Anexo 10. Estadísticos generados para el modelo de regresión escogido para estimar la producción ($m^3/hora$) obtenida bajo el tratamiento silvicultural tala rasa, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 73

Anexo 11. Validación de los modelos de regresión desarrollados para estimar la producción ($m^3/hora$) obtenida bajo dos tratamientos silviculturales: raleo y tala rasa, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 74

Resumen

Se recolectaron datos de la etapa de arrastre durante el aprovechamiento de plantaciones forestales de melina (*Gmelina arborea*) pertenecientes a pequeños productores ubicados en la región de Sahara, Bataán, en la provincia de Limón. Los sitios evaluados fueron cinco, estos se han denominado Finca I, Finca II, Finca III, Finca IV y Finca V. Además, la evaluación se realizó para dos tratamientos silviculturales distintos: **raleo y tala rasa**.

Se realizó una caracterización del sitio en estudio. La etapa de arrastre fue descrita con el fin de señalar los movimientos productivos e improductivos que componen el ciclo de arrastre de madera de plantaciones forestales con la utilización de búfalos de agua. Dentro de los movimientos observados destacaron “elevar carga” y “acomodo del Sulky” ya que consumieron un alto porcentaje del total de la jornada y que se presentan como movimientos improductivos; siendo estos movimientos diferentes a los movimientos escogidos utilizados durante la evaluación del arrastre de madera con bueyes. El movimiento que más porcentaje consumió fue “viaje cargado” con un 20,08% para el caso de raleo y un 19,61% para el caso de tala rasa.

Una vez identificados los movimientos que conforman el ciclo productivo, se determinó la eficiencia promedio lo que dio como resultado un 58,11 % que si es comparada contra la eficiencia de los bueyes resulta ligeramente menor (59,72%), destacando que para el arrastre de madera con bueyes es necesario una yunta, es decir, dos animales; mientras que cuando el arrastre de madera se realiza con búfalos, se utiliza solamente un animal, por lo tanto es una de las ventajas principales de los búfalos sobre los bueyes.

Además de la eficiencia, se determinó una producción promedio de 1,66 m³/h para el tratamiento silvicultural raleo y de 2,18 m³/h para la tala rasa, datos muy similares a los obtenidos mediante la utilización de una yunta de bueyes (1,90 m³/h) pero muy inferiores al compararlos contra los datos obtenidos durante el arrastre de madera utilizando un tractor de oruga (7,83 m³/h).

Una vez analizados los datos, se procedió a desarrollar un modelo de regresión que permitiera estimar la producción de manera confiable para el tratamiento silvicultural de a) raleo y b) tala rasa, los cuales se presentan a continuación:

a) $Producción = 1,633 + 0,154 * Volumen\ por\ jornada\ (m^3) - 0,002 * Distancia\ de\ arrastre - 0,109 * Duración\ total\ de\ la\ jornada,$ con un R² de 93,2%.

b) $Producción = 5,042 + 0,199 * Volumen\ por\ jornada\ (m^3) - 0,001 * Distancia\ de\ arrastre - 0,275 * Duración\ total\ de\ la\ jornada - 0,041 * Eficiencia\ (%)$, con un R² de 86,7%.

Ambos modelos fueron validados de manera que pudieran ser utilizados con confiabilidad y precisión para estimar la producción en plantaciones forestales con condiciones similares a las mencionadas en este trabajo.

Palabras clave: Modelos de regresión, búfalos de agua, métodos de extracción.

Abstract

Data were collected during trawling operations at melina (*Gmelina arborea*) forest plantations harvest. The plantations belong to small producers located in the Sahara region, Bataán, province of Limón. Five sites were evaluated, denominated Finca I, Finca II, Finca III, Finca IV and Finca V. The evaluation was made for two different silvicultural treatments: Thinning and Clear Cut.

An initial site characterization was carried out. The trawling stage was described in order to indicate the productive and unproductive operations that make up the forest trawling cycle of forest plantations using water buffaloes. Within the observed movements "load lift" and "Sulky arrangement" consumed a high percentage of the total of the day and that they appear as unproductive movements; such movements are different to those chosen used during the wood trawling evaluation using oxen. The operation allocating most time was "loaded trip" with 20.08% for thinning operations and 19,61% when operating at clear-cut.

Once the production cycle movements were identified, average efficiency was determined, resulting in a 58.11%, which if compared to oxen efficiency, is seen slightly lower (59,72%). It must be indicated that for the use of oxen a yoke is necessary (two animals); while wood trawling using buffaloes, only one animal is used being one of the main advantages over oxen.

In addition to efficiency, an average yield of 1,66 m³/h was estimated for the thinning silvicultural treatment and 2,18 m³/h for clear cut, which were very similar data obtained using a yoke with oxen (1,90 m³/h). However much lower when compared to trawling using a Caterpillar tractor (7,83 m³/h).

Once the data were analyzed, a regression model was developed to allow reliable yield estimation for the silvicultural treatments of a) thinning and b) clear cut. Both, presented below:

a)
$$\text{Yield} = 1,633 + 0,154 * \text{Volume per day (m}^3\text{)} - 0,002 * \text{Trawling distance} - 0,109 * \text{daily shift duration, (R}^2\text{ of 93,2 \%.)}$$

b)
$$\text{Yield} = 5,042 + 0,199 * \text{Volume per day (m}^3\text{)} - 0,001 * \text{Trawling distance} - 0,275 * \text{daily shift duration} - 0,041 * \text{Efficiency (\%)}, (\text{R}^2\text{ of 86,7\%).}$$

Both models were validated so that they could be used with reliability and precision to estimate the yielding forest plantations with conditions similar to those mentioned in this work.

Key words: regression models, water buffalos, extraction methods.

Capítulo 1. Introducción

La reforestación comercial se inició en Costa Rica en el año de 1979, mediante un proceso de incentivos basados en beneficios fiscales para compañías contribuyentes (Barrantes, 2000), lo que generó el surgimiento de una gran cantidad de nuevas empresas forestales, muchas de las cuáles desconocían completamente el sector en el que estaban incursionando. Esto provocó que algunas de las empresas que utilizaron los incentivos para reforestar, desaparecieran con el paso de los años, dejando en el mercado solamente a las empresas que realmente tenían interés en consolidarse en el sector forestal.

Hoy en día, la mayoría de los proyectos de reforestación plantados hace más de cuatro décadas ya fueron aprovechados parcial o totalmente, ya que el aprovechamiento forestal es uno de los pasos fundamentales para lograr la producción de madera reforestada. Dentro del aprovechamiento forestal destacan cuatro grandes etapas: corta, arrastre, troceo y carga.

La etapa de arrastre consiste en el traslado de la madera, desde el lugar de corta, hasta los patios de carga. Esta etapa requiere de mucha planificación para lograr la eficiencia requerida con el fin de obtener bajos costos y un mínimo impacto (Meza-Montoya, 2004). Existen diferentes métodos para realizar el arrastre de madera, pero es la tracción animal uno de los más conocidos y empleados.

El uso de bueyes en Costa Rica data de los tiempos de la colonia (Cordero, Frisk y Dykstra, 1995), sin embargo el uso de animales en labores de aprovechamientos forestales se da principalmente por el bajo costo de adquisición o de mantenimiento y no por el reconocimiento de las características y ventajas que poseen para trabajar en el campo. Por otra parte, el uso de búfalos de agua ha sido implementado en Costa Rica sin ninguna planificación ni estudio que identifique las ventajas y bondades de este animal.

Los primeros búfalos en Costa Rica llegaron en el año 1974 gracias a una importación que hizo la Junta de Administración Portuaria y de Desarrollo Económico de la Vertiente Atlántica (JAPDEVA). Para esa ocasión, se incorporó un hato compuesto por 18 hembras y 2 machos de la raza bufalipso. No obstante para el año 2009, la población bufalina era de

aproximadamente 1300 cabezas (Rosales, 2011). Los búfalos actualmente se encuentran distribuidos a lo largo del territorio nacional por la versatilidad en trabajos de arado, arrastre de madera, tiro de carretas cargadas con palma aceitera, leña o madera, los subproductos que genera como leche, carne y queso, además de la capacidad de adaptación que han tenido.

Es importante recalcar que el esfuerzo por promover el uso de animales entrenados para realizar labores forestales no pretende sustituir la tecnología mecanizada, por el contrario, busca lograr una combinación entre las funciones que realiza cada tecnología dentro del sistema de aprovechamiento forestal, para disminuir en gran medida los posibles daños causados a la cubierta vegetal (suelo y árboles remanentes), con lo que se garantiza el bienestar de los animales y se logra aumentar la eficiencia y en la producción total.

Con el fin de realizar una adecuada planificación de las labores de aprovechamiento, este trabajo pretendió evaluar y caracterizar detalladamente la etapa de arrastre de madera reforestada mediante la utilización de búfalos de agua dentro del sistema de aprovechamiento de plantaciones forestales.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua en el sistema de aprovechamiento forestal de plantaciones ubicadas en Limón, Costa Rica.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua en el sistema de aprovechamiento forestal de plantaciones.
2. Evaluar técnicamente el uso de búfalos de agua en labores de arrastre en el aprovechamiento forestal de plantaciones.
3. Desarrollar la o las ecuaciones de regresión que mejor se ajusten al predecir la producción (m^3/h) a partir de datos obtenidos en campo.

Hipótesis

Hipótesis del investigador: existe al menos un modelo de estimación que pueda utilizarse con confiabilidad y precisión en la estimación de la producción de madera proveniente de plantaciones forestales de melina.

Hipótesis estadística: no existe ningún modelo de estimación que pueda utilizarse con confiabilidad y precisión en la estimación de la producción de madera proveniente de plantaciones forestales de melina.

Capítulo 2. Marco teórico.

Producción de madera reforestada: etapa de arrastre.

Las plantaciones forestales han sido parte importante en el uso de la tierra desde hace varias décadas y seguirán aumentando en los próximos años, tanto para la producción de madera con fines industriales como para la generación de servicios, especialmente la recuperación de tierras degradadas (Prado, 2015). En la mayoría de los casos, las plantaciones se comportan como monocultivos: edad uniforme y misma especie, lo que facilita el manejo y la cosecha al final del turno.

El fin último de las plantaciones forestales es alcanzar los objetivos de producción que permitan obtener la mejor rentabilidad para el productor, en concordancia con buenas prácticas de manejo que garanticen la conservación de los suelos, la protección de los cursos de agua, fauna y la belleza escénica, entre otras (Sotomayor, Helmke, y García, 2002), mediante un aprovechamiento sostenible. Según Evans (1998), los datos procedentes de las diversas regiones del mundo indican que las plantaciones pueden ser sostenibles desde el punto de vista del rendimiento de madera, en cualquier situación, considerando los avances en los paquetes tecnológicos que mejoran la silvicultura y el aprovechamiento de la madera reforestada.

El aprovechamiento es una de las etapas más importantes de la producción de madera. Según Prado (2015) existe una relación directa entre la pérdida de productividad y las malas prácticas de cosecha, de ahí que disminuya la fertilidad del suelo y las posibilidades de cosechas posteriores. Por las condiciones lluviosas, las pequeñas áreas reforestadas y las

condiciones de pendientes presentes en Costa Rica, las tecnologías utilizadas durante las cosechas de madera se reducen a tractores agrícolas y animales. Cándano, Vidal, Pinto y Machado (2004) destacan las ventajas del uso de animales sobre la tecnología mecanizada como por ejemplo: daños mínimos a la cubierta vegetal, menos compactación del suelo y bajos costos de adquisición. Por lo que esto justifica la importancia del estudio y promoción de la utilización de los búfalos de agua en las labores de arrastre dentro del aprovechamiento de madera reforestada.

Tecnologías utilizadas para el arrastre de madera de plantaciones forestales.

La extracción o transporte primario de madera producida en plantaciones forestales en Costa Rica se ha realizado a lo largo de los años principalmente por medio de tecnologías mecanizadas como el tractor agrícola, el tractor de oruga o el tractor forestal articulado (*skidder*). Por otra parte y debido a las características de clima y pendiente propias del país, se ha utilizado además la tracción animal, como bueyes y caballos, en este caso los búfalos son una tecnología relativamente nueva en las tareas de tiro y tracción.

Costa Rica históricamente ha utilizado a los caballos en el transporte de personas y como animales de tiro, sin embargo para el transporte de productos y para labores agroforestales los bueyes han sido el principal método utilizado. Por ejemplo, Cordero *et al.* (1995) relacionan el uso de bueyes con el transporte del café desde el Valle Central hasta Puntarenas para su exportación.

La sustitución de la fuerza animal inicia con la construcción del primer ferrocarril en Costa Rica, y en labores agrícolas inicia en los años 1950 cuando se empezaron a mecanizar dichas labores (Cordero *et al.*, 1995) Pero es realmente a partir de la década de 1980 que los tractores empiezan a tomar fuerza en las labores agroforestales (Cándano *et al.*, 2004).

Un estudio realizado por Chirwing (1994) muestra que para el año 1961 la fuente principal de trabajo era representada por animales los cuales aportaban al menos el 70% del requerimiento total, mientras que el trabajo manual figuraba en segundo puesto con 23%. En 1991 el puesto de fuente principal lo tenían los motores eléctricos, con 31% del total, seguido por la contribución de los animales de trabajo con 25% y en tercer lugar los tractores con 20%.

Además del auge de la tecnología mecanizada, a inicios de los 80's aparece en Costa Rica el búfalo de agua (Rosales, 2011). Según Torres (2009), el búfalo puede arrastrar una

carga de hasta seis veces su peso corporal; estas cargas pueden ser movilizadas por un lapso de tres a cuatro horas continuas o de seis a ocho horas diarias con intervalos de descanso.

Existen muchos lugares en el mundo donde la fuerza animal tradicional ha sido reemplazada por la tracción mecanizada, no obstante, existirán muchas situaciones donde será difícil ver a los productores teniendo la capacidad de adoptar la tecnología mecanizada (Arriaga, Castelán y Velázquez, 2003), principalmente por las limitaciones económicas que caracterizan a los pequeños productores y por los altos costos de adquisición de la maquinaria.

Sin aras de demostrar si la fuerza animal es mejor que la tracción mecanizada o viceversa, el objetivo de su utilización debe ser claro: aumentar la producción de la actividad forestal y disminuir los costos en cada una de las etapas del aprovechamiento de la madera reforestada.

Uso de animales en labores agroforestales: consideraciones y regulaciones.

Los animales representan una parte importante dentro de las actividades agroforestales en Costa Rica, estando presente tanto en las labores agrícolas como en labores forestales. Sin embargo, su utilización como tecnología para arrastrar, arar, tirar o cargar, etc, no siempre se ha visto regulada dentro de estos sistemas. De esta manera, se resumen algunos conceptos y definiciones que regulan la utilización de animales dentro de las tareas de campo.

Definiciones:

- ✓ Protección animal: concepto relacionado tanto a animales domésticos como a animales salvajes y tiene por objeto la protección de la fauna dentro de un concepto de conservación ambiental sin ningún fin de lucro (León-Guzmán, 2006).
- ✓ Bienestar animal: las nociones de bienestar animal tienen que ver con aquellos animales que representan una utilidad para el hombre, frecuentemente de naturaleza económica (León-Guzmán, 2006).
- ✓ Declaración sobre *Bienestar Animal*: Un animal está en buenas condiciones de bienestar si (según indican pruebas científicas) está sano, cómodo, bien alimentado,

en seguridad, puede expresar formas innatas de comportamiento y si no padece sensaciones desagradables de dolor, miedo o desasosiego (Organización Mundial de Sanidad Animal, 2015).

Para el caso específico de Costa Rica, es necesario mencionar que existe una Ley de “Bienestar Animal”. La Ley de Bienestar de los Animales N.º 7451 existe en Costa Rica desde 1994 (Asamblea Legislativa de Costa Rica, 2016). Esta establece en su Capítulo II, Artículo 3 las condiciones básicas para el bienestar de los animales de trabajo de la siguiente manera: “ a) *Satisfacción del hambre y la sed; b) Posibilidad de desenvolverse según sus patrones normales de comportamiento.; c) Muerte provocada sin dolor y, de ser posible, bajo supervisión profesional; d) Ausencia de malestar físico y dolor; e) Preservación y tratamiento de las enfermedades*”; así como el trato que se les debe dar a los mismos (Capítulo II, Artículo 6).

Existe además el Proyecto de Ley Expediente N.º 18.289 presentado ante la Asamblea Legislativa de Costa Rica en el año 2011 (Asamblea Legislativa de Costa Rica, 2016) y aprobado recientemente en Julio del presente año. En sus párrafos el Proyecto de Ley se enfoca principalmente en aumentar las sanciones y multas contra los que cometan algún acto de crueldad animal (Reformas al Artículo 21 de La Ley N.º 7451). Así mismo, se añade expresamente un único inciso referido a animales de trabajo en Costa Rica: Artículo 21, inciso g) “*Emplee animales en el tiro de vehículos, carruajes y demás implementos de tiro que excedan notoriamente sus fuerzas, o los sobrecargue de peso, o los someta a jornadas de trabajo y esfuerzo excesivas sin darles descanso adecuado, o los fuerce a trabajar en estado de manifiesto deterioro físico, o presentando lesiones severas o enfermedades incapacitantes*”.

El uso de caballos, bueyes y más recientemente búfalos de agua en labores de aprovechamiento forestal representan un método amigable con al ambiente, accesible para el pequeño productor pero sobretodo el método de extracción más viable en las plantaciones forestales actualmente activas en el sector nacional.

Modelos de Regresión.

El análisis de regresión es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación que existe entre distintas variables (Montgomery, Peck y Vining, 2001). Regularmente este análisis se realiza por medio de modelos de regresión. Según Ortiz-Malavasi (2006), un modelo es una abstracción o una representación simplificada de la realidad, que normalmente es utilizado para explicar y anticipar el comportamiento de sistemas aún más complejos; por otra parte, un estudio realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en los años ochenta, define un modelo matemático como un conjunto de ecuaciones o gráficos que muestran las relaciones cuantitativas y cualitativas entre las variables en estudio.

Los modelos de regresión elaborados para plantaciones forestales han sido utilizados para probar hipótesis silviculturales como respuesta a tratamientos, para mostrar la biomasa y la tasa de producción de una plantación, han servido para predecir y estimar el crecimiento de los árboles en una plantación o bosque natural y para predecir el volumen presente en una plantación, entre otros usos (FAO, 1980; Ortiz-Malavasi, 2006).

Existen diferentes etapas a seguir para la obtención del modelo de regresión óptimo, Hughell (1990) menciona las siguientes:

1. Obtener, organizar y depurar la información: una vez tomados los datos de campo se procede al análisis de los mismos por medio de tablas de Excel con el objetivo de identificar valores “atípicos” que afecten la tendencia de los datos.
2. Graficar los datos: el objetivo principal de esta fase es observar la tendencia de los datos a través de los gráficos de puntos con el fin de identificar el o los posibles modelos a utilizar.
3. Escoger el o los mejores modelos de regresión.
4. Validar el modelo seleccionado: es necesario separar un 10% de los datos de cada tratamiento a utilizar para proceder con la validación del modelo de regresión seleccionado. Los datos a utilizar para la validación deben ser independientes de los datos que se utilizaron para su creación.
5. Comparar los datos obtenidos por medio del modelo de regresión contra datos similares encontrados en la literatura.

La escogencia del modelo que mejor se ajuste a la ecuación del cálculo de producción va a depender, entre otras variables, del Coeficiente de determinación (R^2), del Coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajust) y del Error estándar de la muestra (S_{yx}) (Ortiz-Malavasi, 2006). Sin embargo se debe recalcar que independientemente del modelo, si los datos en campo no fueron tomados correctamente, no se tendrá un buen ajuste de los mismos.

Los modelos de regresión para estimar la producción son desarrollados con base en datos de árboles que fueron medidos individualmente mediante métodos costosos como la corta. La toma de datos de volumen en campo conlleva altos costos y tiempo considerable. De ahí la importancia de la utilización de estos modelos que tienen como función principal la predicción de la producción basada en variables de más fácil medición.

Capítulo 3. Marco metodológico.

3.1 Enfoque y tipo de investigación.

La investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo. Se recolectaron datos de campo para su posterior análisis e interpretación. Con estos resultados se identificaron y solventaron problemas y necesidades presentes en la etapa de arrastre de fustes en plantaciones forestales mediante la utilización de búfalos de agua. De forma complementaria, se realizaron actividades de tipo descriptivo que facilitaron el análisis y la discusión de resultados

3.2 Marco espacial y temporal.

Los datos fueron recolectados durante el aprovechamiento de plantaciones forestales de melina (*Gmelina arborea*) pertenecientes a pequeños productores ubicados en la región de Sahara, Bataán, en la provincia de Limón. Los sitios evaluados fueron cinco, y estos se denominan Finca I, Finca II, Finca III, Finca IV y Finca V. Este trabajo se encuentra dentro del marco del proyecto de investigación: “*Valoración y promoción de la utilización de búfalos de agua en labores de aprovechamiento de plantaciones forestales*”, activo actualmente en la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR.

3.3 Sistematización de los objetivos.

3.3.1 Objetivo específico 1.

Caracterizar la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua en el sistema de aprovechamiento forestal de plantaciones.

El detalle de la etapa de arrastre fue descrito con el fin de conocer la forma de trabajo de los productores así como las características de las fincas que fueron evaluadas.

1. Sitio de estudio.

La evaluación de la etapa de arrastre se realizó en cinco fincas pertenecientes a pequeños productores de la región Huetar Caribe de Costa Rica. Específicamente, las fincas se encuentran en la zona de Sahara de Bataán, en la provincia de Limón (figura 1), y pertenecen a productores cuya principal actividad económica es la agricultura. Según datos del Instituto Meteorológico Nacional (2015), la provincia de Limón presenta una temperatura media anual de 25,86°C y una precipitación media anual de 298,25 mm. En esta provincia, el mes de setiembre se considera el más seco y el mes de diciembre el más lluvioso (142 mm y 443 mm anuales respectivamente).

En cada una de las fincas en estudio se tomaron puntos con un instrumento de posicionamiento global (GPS) para la posterior elaboración de un mapa de cada una de ellas. Igualmente se realizaron observaciones de dos tratamientos silviculturales distintos: **el raleo y la tala rasa.**

2. Ciclo productivo de la etapa de arrastre de madera.

Se determinó, por medio de la observación, una serie de movimientos que componen el ciclo productivo de la etapa de arrastre.

Como parte del análisis, los movimientos identificados fueron clasificados en movimientos productivos y movimientos improductivos o atrasos, esto con el objetivo de reconocer los movimientos propios del ciclo productivo de la etapa de arrastre utilizando búfalos de agua. Una vez identificados los movimientos necesarios para el arrastre de madera, cada uno de ellos fue descrito y caracterizado.

Además, para la toma de datos en esta primera fase se realizaron visitas al campo con el objetivo de caracterizar la etapa en evaluación. Se realizaron observaciones de las técnicas de arrastre así como del sistema tecnológico de aprovechamiento utilizado. A su vez, las diferencias entre las técnicas empleadas para el arrastre fueron detalladas.

3. Rediseño de la etapa de arrastre de madera.

Una vez realizado el análisis del trabajo ejecutado durante la etapa de arrastre del sistema de aprovechamiento forestal, se eliminaron ciertos atrasos con el objetivo de simular el grado de aumento en la eficiencia de la etapa, si esto llegara a suceder. Con base en los resultados obtenidos se diseñaron medidas correctivas para la eliminación de dichos atrasos, de manera que con el rediseño de las actividades propias de la etapa de arrastre e inclusive de etapas anteriores o posteriores del sistema de aprovechamiento de madera reforestada, se asegure en el campo altos rendimientos, aumento en la producción y una disminución en los costos.

3.3.2 Objetivo específico 2.

Evaluar técnicamente el uso de búfalos de agua en labores de arrastre en el aprovechamiento forestal de plantaciones.

Este objetivo se desarrolló siguiendo una serie de normas y fórmulas que se detallan a continuación:

1. Determinación de la eficiencia de la etapa de arrastre

Para determinar la eficiencia de la etapa de arrastre se realizó un estudio de tiempos (T) y movimientos (M) utilizando la metodología del Muestreo propuesta por Cordero (1988), que establece realizar observaciones cada dos minutos con el fin de determinar qué porcentaje del tiempo total de una jornada consume cada movimiento. Los movimientos incluidos en esta evaluación fueron elegidos en el desarrollo del objetivo específico número uno de este trabajo.

Asimismo, el cálculo de la eficiencia se realizó por medio de la siguiente fórmula:

$$\% E = \frac{\text{Tiempo productivo}}{\text{Tiempo programado}}, \text{ donde:}$$

Tiempo productivo: número de observaciones de movimientos productivos.

Tiempo programado: total de observaciones de la jornada de trabajo.

2. Determinación de la producción de la etapa de arrastre

Para determinar la producción de la etapa de arrastre, se requiere conocer el volumen y la duración de cada jornada. Por lo que el cálculo del volumen se obtuvo según la siguiente fórmula:

$$\text{Producción (m}^3/\text{h prog)} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Horas programadas}}$$

- ❖ Para determinar el volumen por día se cubicaron, con ayuda de un colaborador, las trozas que fueron arrastradas en cada uno de los ciclos evaluados una vez puesta la o las trozas en el patio de acopio y/o carga. Para dicho cálculo se empleó la fórmula de Smalian de la siguiente manera:

$$V = \frac{\pi}{8} * (d_1^2 + d_2^2) * L, \text{ donde:}$$

V = volumen en metros cúbicos.

d₁ = diámetro en metros medido en la cara mayor de la troza.

d₂ = diámetro en metros medido en la cara menor de la troza.

L = largo de la troza en metros.

- ❖ Las horas programadas o duración de la jornada se obtuvieron del estudio de T y M mediante la diferencia de la hora inicial y la hora final de cada jornada evaluada.

La producción obtenida fue por jornada evaluada, además se trabajó con una producción promedio de todas las jornadas estudiadas.

3. Determinación de variables de interés

Distancia: los valores de distancia fueron calculados por medio de un GPS marca GARMIN. Se muestreó la totalidad de las principales pistas de saca y de arrastre y se georreferenció cada fuste así como el patio de carga hasta donde son arrastrados con el objetivo de calcular cada distancia.

Pendiente: la pendiente en cada uno de los ciclos de arrastre fue medida con ayuda de un clinómetro marca Suunto.

3.3.3 Objetivo específico 3.

Desarrollar la o las ecuaciones de regresión que mejor se ajusten al predecir la producción (m³/h) a partir de datos obtenidos en campo.

En este objetivo se generó un modelo de regresión de manera que se predijera la producción de la etapa de arrastre a partir de variables de fácil medición. Por ejemplo la distancia de arrastre, el volumen, la duración total del ciclo, la eficiencia y el número de fustes arrastrados, las cuales fueron analizadas por medio del programa SPSS Statistics Base con un 95% de confianza ($\alpha = 0,05$).

1. Análisis de los datos

Se construyó una tabla en Excel con las variables de distancia de arrastre, número de fustes arrastrados, duración total de la jornada, duración efectiva de la jornada, pendiente, volumen, peso, eficiencia y producción, esto con el objetivo de buscar la correlación entre ellas y se lograr una ecuación con el ajuste adecuado. Después se creó una tabla que contuviera cada uno de los ciclos de producción así como otra tabla con las jornadas evaluadas, eso sí, separando siempre los resultados por tratamiento silvicultural aplicado.

Por medio de gráficos de dispersión entre variables, fueron localizados y corregidos puntos atípicos de manera que se obtuviera una base de datos depurada. Los gráficos fueron analizados con el objetivo de observar el comportamiento de las variables para tratar de identificar alguna curva que guiara la creación y escogencia de uno o varios modelos.

La correlación de las variables se verificó por medio de un diagrama de dispersión en el que cada punto trazado representó un par de valores observados por las variables independiente y dependiente. El valor de la variable independiente "X", fue trazado en relación con el eje horizontal y el valor de la variable dependiente "Y", en relación con el eje vertical (Jiménez, 2012). La relación que muestren las variables podrá ser una relación Lineal positiva, lineal negativa o no lineal entre otras.

Para el caso de las correlaciones Lineales, las variables son analizadas con el coeficiente de Person, mientras que si se presenta una correlación no lineal, las variables son

analizadas con el coeficiente de Spearman; en ambos casos se recurre al programa SPSS Statistics Base.

Además de la correlación, los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (ANDEVA) fueron estudiados.

La distribución de los datos fue analizada por medio de una prueba de Shapiro-Wilks modificado para verificar su normalidad, para la cual se plantearon dos hipótesis: H_0 : los datos siguen una distribución normal y H_a : los datos no siguen una distribución normal. Si los datos siguen una distribución normal se emplea estadística paramétrica, de lo contrario se considera la estadística no paramétrica, para el análisis estadístico en esta etapa se recurrió al programa Infostat con un 95% de confianza ($\alpha = 0,05$).

Para probar la homogeneidad de las varianzas de cada una de las variables se recurrió a un Análisis de Varianza (ANDEVA), el cual buscó probar las siguientes hipótesis: H_0 : las varianzas de los datos son iguales y H_a : las varianzas de los datos son diferentes.

Se verificó por medio de pruebas estadísticas si existía o no diferencias entre: a) tratamiento silvicultural aplicado, b) método de arrastre utilizado y c) búfalo utilizado para el arrastre de madera de plantaciones.

2. Modelos de regresión

Para la construcción de los modelos de regresión que estimen producción se procedió a utilizar la metodología propuesta por Hughell (1990).

Este trabajo buscó la generación de un modelo utilizando los promedios de los datos obtenidos en cada una de las jornadas evaluadas en campo y para cada uno de los tratamientos silviculturales aplicados dentro de las fincas. Para lograr la validación de el/los modelos, desde un inicio se trabajó únicamente con un 75% de los datos obtenidos en cada uno de los tratamientos silviculturales aplicados, es decir, se separó un 25% de los datos correspondiente a 5 jornadas en el caso del raleo y 10 jornadas en tala rasa, para realizar la validación.

Las ecuaciones de mejor ajuste fueron estudiadas definiendo los posibles modelos de regresión los cuales consideraron las variables cuantitativas. Para medir la calidad del ajuste del modelo escogido se consideraron variables como el coeficiente de variación, el coeficiente de determinación R^2 y el coeficiente de determinación ajustado entre otras.

Una vez generados y escogidos los modelos, se procedió a verificar los supuestos más importantes de la regresión: la normalidad de los residuos y la varianza constante de cada una de las variables, buscando probar las mismas hipótesis descritas en el apartado de Análisis de datos.

Como paso final se ejecutó la validación de cada uno de los modelos. Según Arango, Rivera y Granobles (2000), la validación es la aprobación, a través de procedimientos estadísticos adecuados, de un nivel aceptable de confianza, de tal modo que las interpretaciones para el sistema real efectuadas a partir de las inferencias obtenidas con el modelo de simulación, sean correctas; en otras palabras, es el proceso para determinar si un modelo de regresión verdaderamente representa de uno u otro modo la realidad.

Para la validación se utilizó la fórmula del % de sesgo que establece que su resultado debe de encontrarse en un intervalo de +- 2% (Jiménez, 2012). La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\% \text{Sesgo: } \frac{\Sigma(\text{Valores Observados} - \text{Valores Estimados})}{\Sigma \text{Valores Observados}} * 100$$

Además se realizó una prueba de Wilcoxon mediante el programa Infostat de manera que se lograra verificar las siguientes hipótesis: H_0 : la Σ de los valores observados es igual a la Σ de los valores estimados y H_a : la Σ de los valores observados es diferente a la Σ de los valores estimados.

Durante el proceso de validación deben tenerse siempre en cuenta los siguientes aspectos (Alder, 1980):

- Los modelos de predicción se aproximarán más a la realidad a medida que se incrementen los esfuerzos en la recolección de datos y en la construcción del propio modelo.
- En algún momento, el esfuerzo involucrado para obtener más datos o para crear un modelo estadísticamente más sólido es más costoso que, la mejora marginal garantizada por las predicciones del modelo.
- Los modelos forestales no tienen un grado uniforme de error sobre el intervalo completo del comportamiento que predicen pero pueden ser más o menos precisos en diferentes intervalos de las variables que predicen.

En conclusión, se eligieron los modelos que predijeron de forma más confiable los datos de producción en cada uno de los tratamientos silviculturales, tanto para los datos obtenidos durante el raleo como para los datos obtenidos durante la tala rasa.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Objetivo específico 1.

Caracterizar la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua en el sistema de aprovechamiento forestal de plantaciones.

1. Sitio de estudio

Las plantaciones forestales de las fincas en donde se realizó el muestro, es decir, Finca I, Finca II, Finca III, Finca IV y Finca V, fueron establecidas entre el año 2008 y 2011. Así mismo fueron cosechadas completamente al momento de esta evaluación. Las plantaciones forestales se cosecharon durante los meses de abril a diciembre del año 2015 y los meses de enero y febrero del año 2016, y presentaron un volumen promedio por árbol de 0,291 m³, un diámetro promedio de 25,27 cm y una altura comercial promedio de 10,98 m.

Las cinco fincas en las que se trabajó fueron utilizadas, antes de ser reforestadas, para el cultivo de banano, la figura 1 muestra la ubicación de los terrenos.

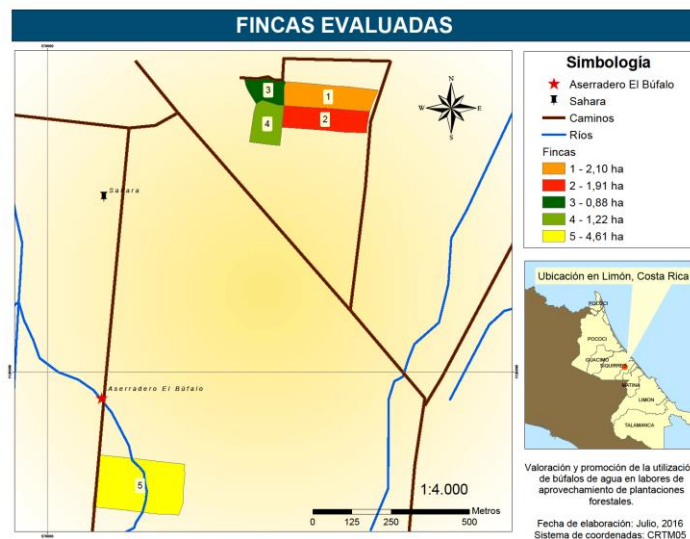


Figura 1. Localización de las fincas evaluadas. Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.

2. Ciclo productivo de la etapa de arrastre.

En ambos tratamientos silviculturales, el raleo y la tala rasa, se observó la técnica que utilizaron los “bufaleros” para arrastrar la madera desde la plantación hasta un patio de acopio o bien el patio final de carga, y se determinaron los movimientos necesarios para la disposición final de la madera en dichos patios.

La operación de arrastre de madera al momento de la evaluación fue realizada mediante tres métodos: método de cadenas (figura 2), mediante el sulky (figura 3) y arrastre con pipante (figura 4). El primer método es el más común por su facilidad y simplicidad, consistió en el arrastre de la madera utilizando únicamente la fuerza del animal. Mediante éste método las trozas arrastradas van siempre y casi en su totalidad en contacto con el suelo, por lo que se crea una fricción que dificulta en alguna medida el arrastre.



Figura 2. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método de cadena. Limón, Costa Rica. 2016.

El segundo método de arrastre emplea una especie de arco maderero llamado sulky que eleva la parte frontal del fuste o troza para evitar la fricción y por tanto facilitar la operación de arrastre. Con la utilización del sulky el animal es capaz de arrastrar mayor cantidad de trozas e incluso arrastrar en distancias más largas que con el método de cadenas.



Figura 3. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método del sulky. Limón, Costa Rica. 2016.

Por último, el tercer método es menos común y es utilizado normalmente cuando el terreno está muy lodoso; con éste método se arrastra poca cantidad de trozas y de menor tamaño.



Figura 4. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método del pipante. Limón, Costa Rica. 2016.

El método más utilizado fue el de las cadenas, seguido por el sulky y por último el pipante el cual se empleó más como un método demostrativo. El cuadro 1 muestra las ventajas y desventajas del uso de cada uno de estos métodos de arrastre.

Cuadro 1. Diferencias entre los métodos utilizados durante el arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Método de arrastre	Ventajas de uso	Desventajas de uso
Cadenas	De fácil utilización.	Solo puede arrastrar uno o dos fustes a la vez.
	Simple y de bajo costo.	Posible mayor impacto en el suelo.
Sulky	Elimina la fricción entre la troza y el suelo.	No se puede utilizar en suelos con condiciones muy lodosas.
	Ideal para arrastrar fustes por largas distancias.	Mayor costo de adquisición que las cadenas o incluso que el pipante.
Pipante	Ideal para condiciones con muchas lluvias y lodo.	Método poco tradicional.
	Menor impacto en el suelo ya que no rompe mientras arrastra.	La capacidad de arrastre se resume a pocos m ³ .

Los movimientos realizados durante la etapa de arrastre mediante los métodos descritos anteriormente fueron clasificados en movimientos productivos y movimientos improductivos o atrasos, de manera que la unión de ellos conformara el ciclo productivo de arrastre de

madera mediante la utilización de búfalos de agua. El formulario creado luego de la observación (anexo 1) fue utilizado tanto para el tratamiento de raleo como para el tratamiento de tala rasa. Asimismo, los movimientos seleccionados en él fueron utilizados para ejecutar la evaluación técnica de los búfalos de agua que fue realizada empleando la metodología de tiempos y movimientos propuesta por Cordero (1988) y descrita en el capítulo anterior.

Dentro de la etapa de arrastre, que es la segunda de cuatro etapas básicas que componen el sistema de aprovechamiento de madera reforestada (corta, arrastre, troceo y carga), existen además una serie de operaciones a las que llamaremos movimientos productivos, que interactúan entre sí para lograr buenos rendimientos y bajos costos de producción. El esquema siguiente muestra las sub etapas establecidas, que junto con los movimientos improductivos conforman el ciclo de arrastre. En este caso, el ciclo es definido como: “viaje vacío” del búfalo, “amarre” de la/las trozas a arrastrar, “viaje cargado” desde la plantación hasta el patio de acopio o bien desde un patio de acopio hasta el patio de carga y por último “soltar” la carga en el destino final. Esto además de todas las observaciones de los movimientos improductivos mencionados en el anexo 1.

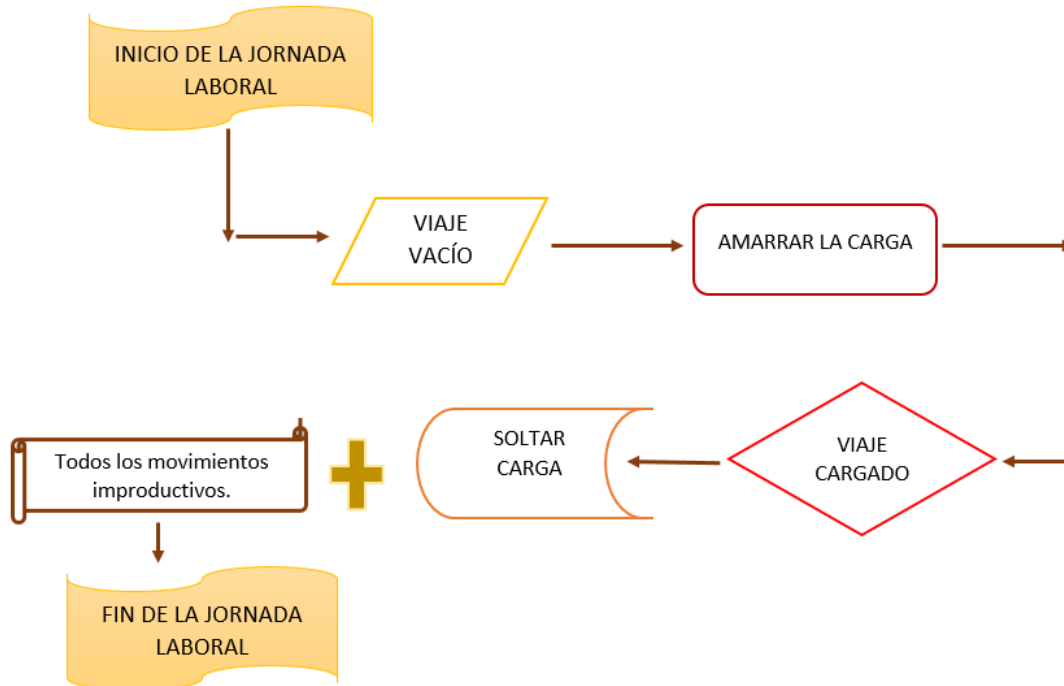


Figura 5. Ciclo de producción típico del arrastre de madera utilizando búfalos de agua en plantaciones forestales. Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.

Preparación del animal de trabajo

La jornada de trabajo inicia todos los días con la búsqueda del animal. A diferencia de los bueyes que caminan largas distancias en búsqueda de alimento de calidad, los búfalos prefieren permanecer en manada y alimentarse de cualquier tipo de pasto. A pesar de esto, no siempre el animal está cerca de donde se realizan las labores de aprovechamiento por lo que, antes de iniciar la jornada, el bufalero debe ir por el animal. Una vez que el búfalo está en el lugar de trabajo se procede a colocarle los aditamentos que le permitirán arrastrar la madera. Normalmente estos implementos quedan escondidos en la plantación ya que no tienen un valor de adquisición muy elevado. Dentro de los implementos que utiliza el búfalo se encuentra la pechera, el freno, el sillín, el balancín y las cadenas.



Figura 6. Implementos utilizados por el búfalo de agua durante la operación de arrastre en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Viaje vacío

El ciclo productivo comienza con el desplazamiento del búfalo desde un punto dispuesto para acopiar madera hacia el sitio de corta de los árboles dentro de la plantación. Se define como el momento en el que el animal se traslada sin ninguna carga arrastrada como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Movimiento de la etapa de arrastre definido como viaje vacío, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento forestal. Limón, Costa Rica. 2016.

Durante la evaluación, tanto para el tratamiento de raleo como para el tratamiento de tala rasa, el búfalo mantuvo un porcentaje promedio constante de 17,48% y 17,53% del total de la jornada. Tal y como se muestra en el cuadro 2.

Amarre de la carga

Una vez que el animal llega a la base del árbol cortado o bien al patio desde donde recogerá la troza, se procede a amarrarla (figura 8). Los resultados obtenidos mostraron porcentajes elevados para este movimiento productivo, principalmente para el tratamiento de raleo (11,92%, cuadro 2) ya que cuando se utilizó el método de cadenas, el hecho de que las trozas estuvieran posadas completamente sobre el suelo obstaculizó el paso de las cadenas por debajo de ellas para realizar el amarre.



Figura 8. Amarre de trozas utilizando a) cadenas y b) sulky en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

En el caso del método de arrastre utilizando el Sulky, el porcentaje del total de la jornada que correspondió al “amarre” fue de sólo un 6,27% (cuadro 3), lo que explica especialmente porque las trozas dispuestas para el arrastre con este método tuvieron un previo acomodo, garantizando que las mismas quedaran elevadas del suelo, para facilitar la entrada del sulky en el patio y a la vez el amarre de las trozas.

Viaje cargado

Este movimiento correspondió al momento en el que el animal halaba una o más trozas, ya sea por el método de las cadenas o por el método del Sulky. La evaluación señaló evidencias de malas prácticas de cosecha, lo que dificultó la operación de la etapa de arrastre, por ejemplo, la corta en pocas ocasiones se realizó de manera dirigida lo que impidió que el arrastre de la troza pudiera hacerse sujetándola por la cara mayor, esto generó mayor dificultad para el animal durante el arrastre de la madera. Como era de esperarse, este movimiento productivo fue el que consumió mayor tiempo del total de la jornada, con un 20,08% y un 19,61% según los diferentes tratamientos como se evidencia en el cuadro 2.

El tratamiento de raleo presentó mayor duración en este movimiento ya que el recorrido que debía hacer el animal dentro de las plantaciones dificultaba en gran medida el arrastre. Por ejemplo, el bufalero debe asegurar que los árboles elegidos para la cosecha final no presenten ningún tipo de daño producto del arrastre de los fustes del raleo, por lo tanto el “viaje cargado” dentro de una plantación con árboles remanentes consumirá siempre mayor tiempo a diferencia de que se hiciera en una plantación que está siendo aprovechada en su totalidad.

Soltar la carga

El último movimiento productivo realizado por el animal para lograr la disposición final de la madera, es “soltar” la carga. El cuadro 2 muestra datos promedio de todas las jornadas evaluadas mediante el método de cadenas y el porcentaje que consumió cada uno de los movimientos.

Cuadro 2. Distribución promedio del tiempo en una jornada de trabajo mediante la utilización del método de arrastre cadenas, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Movimientos del sistema	Tratamiento silvicultural: RALEO		Tratamiento silvicultural: TALA RASA	
	Duración (horas)	Porcentaje (%)	Duración (horas)	Porcentaje (%)
Movimientos Productivos				
Viaje vacío	1,31	17,48	1,08	17,53
Amarre	0,89	11,92	0,54	8,86
Viaje cargado	1,50	20,08	1,20	19,61
Soltar	0,61	8,17	0,43	6,92
Total movimientos productivos	4,31	57,65	3,25	52,93
Movimientos improductivos				
Descanso de los búfalos	0,09	1,25	0,11	1,86
Descanso del Bufalero	0,27	3,54	0,29	4,77
Elevar carga	0,07	0,98	0,07	1,16
Acomodar patio	0,22	2,97	0,29	4,77
Desrame o troceo	0,05	0,72	0,04	0,68
Esperar	0,02	0,30	0,26	4,31
Limpiar pista	0,01	0,19	0,03	0,48
Colocar aditamentos al búfalo	0,38	5,09	0,35	5,62
Alimentación	2,04	27,27	1,38	22,46
Carga pegada	0,00	0,04	0,06	0,95
Total atrasos	3,17	42,35	2,89	47,07
TOTAL	7,48	100,00	6,14	100,00

A diferencia del anterior, es el movimiento productivo el que menos tiempo del total de la jornada consumió ya que la acción de soltar se limita a quitar el nudo de las cadenas o del sulky y dejar caer la troza en el patio. Además del análisis realizado a los movimientos ejecutados con el método de cadenas, se decidió presentar los resultados del análisis del método del sulky por separado, para mostrar las diferencias entre ambos métodos.

El cuadro 3 presenta los resultados obtenidos en donde se observa, que contrario al método de cadenas, los movimientos improductivos superan los movimientos productivos del sistema. Sobresale, en el arrastre de madera con Sulky, un nuevo movimiento improductivo pero necesario llamado “acomodo del sulky”, en el que, precisamente, el arco o sulky debe ser acomodado para poder proceder con el amarre.

Cuadro 3. Distribución promedio del tiempo en una jornada de trabajo mediante la utilización del método de sulky, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Movimientos del sistema	Duración promedio de la jornada (horas)	Porcentaje promedio (%)
Movimientos Productivos		
Viaje vacío	1,19	15,72
Amarre	0,48	6,27
Viaje cargado	1,38	18,16
Soltar	0,39	5,14
Total movimientos productivos	3,44	45,29
Movimientos improductivos		
Descanso de los búfalos	0,10	1,29
Descanso del Bufalero	0,35	4,64
Elevar carga	0,26	3,39
Acomodar patio	0,30	3,89
Desrame o troceo	0,04	0,53
Esperar	0,17	2,20
Limpiar pista	0,01	0,13
Colocar aditamentos al búfalo	0,44	5,83
Acomodo del sulky	0,39	5,08
Alimentación	2,04	26,91
Carga pegada	0,06	0,82
Total atrasos	4,15	54,71
TOTAL	7,59	100

La movilización del sulky en reversa consumió un 5,08% del total de la jornada, lo que lo convierte en el segundo mayor de los movimientos improductivos. Igualmente, el movimiento que consumió el mayor porcentaje del tiempo improductivo fue la “alimentación” y se debió a que dentro de este tiempo se contemplan aquellas “horas sol” establecidas de diez am a la una pm, en las que el búfalo, por ser un animal de agua, no trabaja. Según Simón y Galloso (2008) los búfalos para controlar la temperatura corporal usan los baños y revolcaderos, pero también pueden termorregularse a la sombra, por lo que en horas en donde el sol incide de manera más directa, los búfalos se vuelven vulnerables, y bajan los rendimientos en gran medida.

A diferencia de la experiencia obtenida en la evaluación del arrastre de madera utilizando bueyes como fuerza de arrastre, los búfalos de agua presentan otros movimientos que

componen el ciclo productivo, dentro de los que destacó “Elevar carga”. El yugo con el que trabajan los bueyes facilita el arrastre de la madera disminuyendo la fricción al elevar la troza del suelo de manera inmediata, mientras que en el caso del búfalo de agua lo que se utilizó para elevar la troza del suelo fue el “sulky”, sin embargo fue necesario, luego del amarre de la troza, un segundo “re-amarre” para lograr que la troza se elevara cierta altura y así lograr disminuir la fricción (figura 9).



Figura 9. Arrastre de fustes de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua con el método del sulky. Limón, Costa Rica. 2016.

Para el método de cadenas, este nuevo movimiento representó un total de 0,98% y 1,16% según los dos tratamientos utilizados, sin embargo para el método del sulky, el porcentaje del tiempo consumido por el mismo movimiento fue de 5,08%, lo que lo convierte en un dato importante que debe ser eliminado a corto plazo.

3. Rediseño de la etapa de arrastre de madera de plantaciones forestales utilizando búfalos de agua.

Dentro de los movimientos improductivos que surgen en el ciclo productivo de arrastre de madera de plantaciones forestales, existen atrasos innecesarios que deben ser eliminados o disminuidos con el objetivo de aumentar la eficiencia y la producción, así como disminuir los costos e impactos a un menor tiempo. A continuación se presentan las recomendaciones más adecuadas para optimizar la etapa de arrastre evaluada.

❖ Planificación del sistema.

El sistema de aprovechamiento de madera reforestada está compuesto por cuatro etapas básicas que están articuladas entre sí de manera que juntas logren los objetivos de producción. La etapa de arrastre representa la segunda de ellas y su correcto funcionamiento depende de la ejecución de la primera etapa: el volteo.

Se propone para la etapa de volteo, que el sierrero encargado aplique técnicas de trabajo en el campo que incrementen la producción y faciliten la siguiente etapa. Algunas de ellas son:

- Dirigir la caída de los árboles manera que el arrastre pueda ejecutarse siempre con la cara mayor del fuste hacia adelante.
- Separar las operaciones de corta y arrastre en el tiempo y en el espacio, de manera que al llegar el búfalo tenga al menos el material para trabajar la jornada, disminuyendo atrasos por espera.
- Prever que la cantidad de árboles volteados sean suficientes para que la actividad de arrastre no se detenga.

❖ Planificación de la etapa de arrastre.

Una vez controlados algunos aspectos externos a la etapa de arrastre y con el objetivo de mejorar el trabajo a realizar, la etapa de arrastre debe ser planificada incluso antes de iniciar con el aprovechamiento forestal. Los caminos deben de ser previamente diseñados, tanto las pistas de arrastre secundarias como las pistas de arrastre primarias deben de ser identificadas en campo, para disminuir el recorrido del animal, los tiempos de cada ciclo y la densidad de caminos (daño al ambiente), entre otras cosas, aspectos que se traducen en un consecuente aumento de la eficiencia y la producción. Además de la planificación de caminos, se debe destinar un área lo suficientemente grande para el acopio de la madera arrastrada, que le permita al animal realizar las labores de acomodo y soltar la carga de manera satisfactoria. El patio de acopio propuesto debe tener un acomodo de las trozas en “espina de pescado” como se observa en la figura 10, asegurando la salida de las trozas al momento del arrastre. También debe tener un espacio suficiente entre cada una de las columnas de acopio de manera que el animal pueda entrar, acomodarse y salir del patio sin ningún problema.



Figura 10. Patio diseñado para el acopio de madera durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Se propone igualmente, que dentro del patio de acopio los fustes arrastrados en una primera fase descansen sobre una troza previamente colocada de manera perpendicular, de tal forma que las eleve del suelo y facilite a la vez el amarre de las mismas. De esta manera, se asegura que movimientos improductivos como “acomodo del sulky” o “elevar carga” disminuyan dentro del ciclo productivo, y se garanticen producciones mayores. Siempre en el patio de acopio, si el fuste a arrastrar es de grandes dimensiones y representa un peso muy elevado para el animal, se dimensionará en tamaños menores para que al patio de carga llegue sólo lo útil, y se deje en el campo las secciones curvas o dañadas.

El arrastre deberá hacerse mediante la técnica de dos fases con el fin de aumentar la eficiencia de cada una de las jornadas. Las distancias cortas, desde el punto de corta hasta un patio de acopio, deberán hacerse en una primera fase mediante la utilización del método de las cadenas, mientras que si el arrastre se realizará en distancias mayores, de un patio de acopio hasta el patio de carga o bien desde el punto de corta directamente hasta el patio de carga, se deberá utilizar el método del Sulky.

Una vez que los fustes se encuentran en el patio de carga se debe prever que la operación de carga no atrase la operación de arrastre, es decir, en el patio debe existir un lugar para que el búfalo vaya soltando la madera y debe existir otro lugar, ya saturado de madera, en el que se pueda ir realizando simultáneamente la operación de carga.

❖ Capacitación.

La calidad con la que se ejecuten cada una de las labores dentro del sistema de aprovechamiento definirá en gran medida el éxito que obtendrá dicha operación. Será necesario que las cuadrillas que laboran junto con el bufalero y los búfalos, reciban una capacitación de buenas prácticas de aprovechamiento forestal con la finalidad de mejorar aspectos técnicos pertinentes a cada una de las etapas que conforman dicho sistema.

Es importante que el sierrero comprenda la importancia de la corta dirigida y del incremento en eficiencia y producción que una buena operación de tala genera. Una vez que el fuste esté volteado, aspectos como un adecuado desrame o un dimensionado correcto deben de estar claros para los operadores de las motosierras. El dimensionado de las trozas requiere de mucha precisión de manera que no se desperdicie madera o de lo contrario, que el búfalo no arrastre madera que posteriormente no va a ser útil porque no cumple con las dimensiones establecidos o porque va dañada.

Si luego del volteo las pistas de arrastre previamente establecidas quedan obstruidas con la presencia de ramas, los operarios deberán realizar una limpieza, y se debe de comprender la significancia que acciones como esas tienen en las etapas posteriores. Las pistas principales y secundarias limpias permitirán un libre tránsito del animal, y disminuirá la duración en los movimientos de “viaje vacío” y “viaje cargado”, con el consecuente aumento de la cantidad de ciclos que el búfalo de agua podría realizar si las pistas estuvieran obstruidas.

4.2 Objetivo específico 2.

Evaluar técnicamente el uso de búfalos de agua en labores de arrastre en el aprovechamiento de plantaciones forestales.

Se recolectaron los datos de dos tratamientos silviculturales: el raleo y la tala rasa. El primer tratamiento estuvo presente en las Finca I, II, III y IV, mientras que la tala rasa fue aplicada en las Finca I, III, IV y V (ver cuadro 4). El aprovechamiento de las plantaciones de melina inició, en todas las fincas a excepción de la Finca V, con la aplicación de un raleo. Primero se realizó el raleo en la Finca I, luego la Finca II, seguidamente la Finca III y por último la finca IV. Posterior al primer año de haber iniciado con los raleos, por decisión de los propietarios de la madera se procedió a aprovechar la totalidad de la madera que había en cada una de las fincas con la excepción de la finca II. De esa manera, se inició la tala rasa

en la Finca I, luego la Finca III, posteriormente la Finca IV y se incluyó además la Finca V que no había sido considerada dentro del tratamiento de raleo. Por esta razón, los resultados obtenidos fueron analizados por separado para cada uno de los tratamientos silviculturales.

Según los datos que muestra el cuadro 4, para el primer tratamiento (raleo) se muestrearon un total de 20 jornadas, mientras que para el segundo tratamiento (tala rasa) se evaluaron un total de 40 jornadas. En ambos casos se muestrearon la suficiente cantidad de ciclos para realizar los análisis estadísticos.

Cuadro 4. Tratamientos aplicados por finca evaluada durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Tratamiento silvicultural aplicado	Finca evaluada	Método de arrastre utilizado	Número de jornadas evaluadas	Número de ciclos evaluados
RALEO	Finca I	cadena sulky	10	261
	Finca II	cadena sulky	7	193
	Finca III	cadena sulky	2	52
	Finca IV	cadena sulky	1	21
TALA RASA	Finca I	cadena sulky	3	48
			3	65
	Finca III	cadena sulky	3	50
	Finca IV	cadena sulky	8	142
	Finca V	cadena sulky	12	251
			11	125

1. Eficiencia de la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua.

Mediante un estudio de tiempos y movimientos utilizando el método del muestreo propuesto por Cordero (1988), se tomaron datos de eficiencia y producción en cada una de las fincas evaluadas. El cuadro 5 muestra un resumen de los resultados de la evaluación, separados según el tratamiento silvicultural empleado.

Independientemente del tratamiento, el porcentaje de la eficiencia muestra una disminución conforme aumenta la cantidad de fustes arrastrados, lo que indica una disminución en el rendimiento del animal al final de una misma jornada. No se puede afirmar que las primeras horas del día fueron más productivas que la tarde porque el rendimiento del animal depende en su mayoría de factores externos como las condiciones climáticas, por lo tanto si la tarde registró lluvias existe la posibilidad de que el búfalo hubiese sido mucho más productivo en la tarde.

Cuadro 5. Resumen promedio de las jornadas evaluadas en cada una de las fincas durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Tratamiento silvicultural	Finca	Fustes arrastrados	Distancia de arrastre	Eficiencia (%)	Duración total de la jornada (h)	Duración efectiva de la jornada (h)	Volumen por jornada (m ³)	Producción (m ³ /h.prog)	Producción (m ³ /h.efec)
RALEO	I	28	118,57	58,03	6,97	3,74	7,40	1,15	2,01
	II	29	113,68	58,19	7,16	3,86	7,72	1,16	2,02
	III	30	90,82	58,19	7,11	3,86	7,66	1,18	2,04
	IV	42	102,14	57,42	8,53	4,90	8,19	0,96	1,67
TALA RASA	I	29	105,37	58,50	6,87	3,71	7,63	1,20	2,07
	III	28	86,27	57,36	6,97	3,67	7,98	1,24	2,20
	IV	27	148,56	60,46	7,35	4,14	7,04	1,05	1,72
	V	26	137,75	56,79	7,03	3,68	7,26	1,12	2,01

Isuiza, López y Pezo (1996) señalan que los búfalos de agua pueden trabajar con una eficiencia óptima por seis horas al día con lapsos en los que el animal pueda refrescarse y que después de esta cantidad de horas los rendimientos tienden a disminuir; si se comparan los resultados obtenidos la jornada que mayor duración tuvo (8,53 h) estuvo relacionada con una de las eficiencias más bajas, lo que coincide con los resultados presentados por Isuiza *et al.*

Otro aspecto que afectó de manera directa la eficiencia fue la distancia de arrastre. Como se muestra en la figura 11, la distancia ideal para el arrastre de madera mediante la

utilización de búfalos de agua está entre los 100 metros y los 120 metros, a mayores distancias la eficiencia empieza a decaer, razón por la cual los rendimientos del animal disminuyen. Es decir, independientemente del tratamiento silvicultural aplicado, el búfalo no debería de arrastrar distancias mayores a 130 metros de manera consecutiva en una misma jornada.

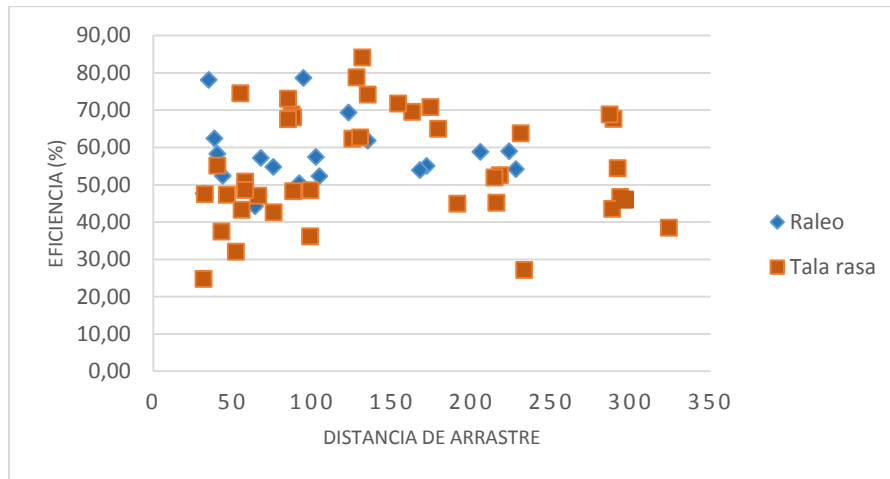


Figura 11. Comportamiento de la eficiencia en función de la distancia arrastrada durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Cuando se vuelve una necesidad arrastrar largas distancias, el proceso deberá hacerse bajo la técnica de arrastre en dos fases de manera que la eficiencia del búfalo no se vea afectada. El sulky, por conocimientos generados por los productores a lo largo de los años de trabajo con búfalos, es más utilizado por los bufaleros de la zona cuando las distancias de arrastre superan los 100 metros y la carga que se lleva es de hasta cuatro fustes, mientras que las cadenas son más utilizadas en una primera fase cuando las distancias son más cortas y la carga no supera los dos fustes completos.

En comparación con los bueyes y según los datos reportados por Villalobos-Barquero y Meza-Montoya (2016) para ese animal, la eficiencia obtenida durante el arrastre de madera con búfalos de agua (58,11%) fue ligeramente menor que la obtenida mediante la utilización de bueyes (59,72%), destacando que para el arrastre de madera con bueyes es necesario una yunta, es decir, dos animales; mientras que cuando el arrastre de madera se realiza con búfalos, se utiliza solamente un animal siendo esa una de las ventajas principales de los búfalos sobre los bueyes. En cuanto a tractores forestales, Quinchuela (2015) reporta una eficiencia de 76,73% para condiciones de trabajo similares a las expuestas en esta evaluación.

Los datos de eficiencia obtenidos en esta evaluación para el arrastre de madera con búfalos de agua se encuentran dentro del rango de eficiencia típico para dicha operación, ya que, como lo señala Conway (1982), la eficiencia característica de una operación de madereo con animales raramente supera el 75%.

La planificación de las actividades de cada una de las etapas del sistema de aprovechamiento de madera reforestada es una fase importante si se desea maximizar la eficiencia. La disminución de los tiempos no productivos durante el ciclo de arrastre logrará aumentar los tiempos efectivos de trabajo, lo que finalmente se traducirá en un incremento en la producción.

2. Producción de la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua.

El estudio de rendimientos es la relación de los tiempos totales (tanto los productivos como los no productivos) con los volúmenes extraídos. Dicho cálculo se expresa en metros cúbicos por hora ($m^3/hora$) lo que da como resultado una producción por hora, día o mes. La producción promedio para cada una de las fincas evaluadas según el tratamiento silvicultural aplicado se muestra en la figura 12.

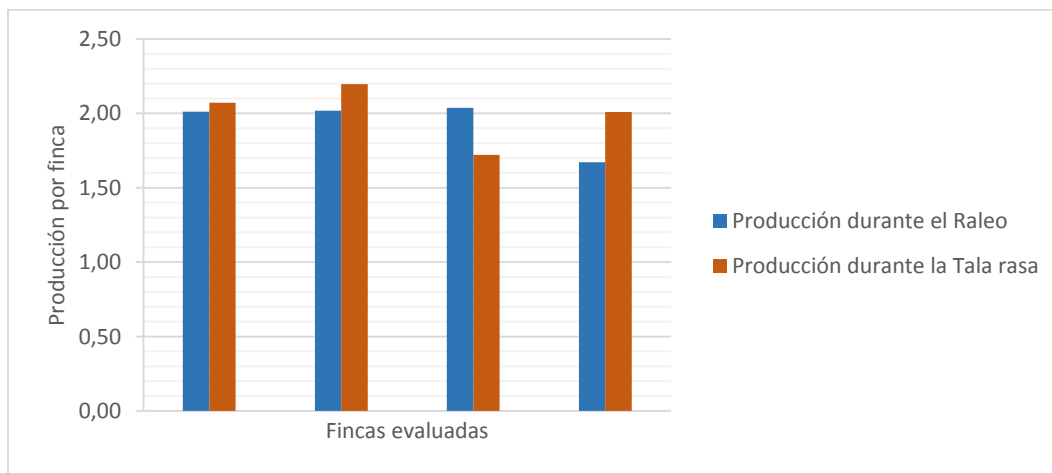


Figura 12. Producción (m^3/h) obtenida por finca durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Los datos alcanzados bajo el tratamiento de tala rasa fueron superiores a los obtenidos bajo el tratamiento de raleo, esto a pesar de que el volumen promedio por jornada en ambos tratamientos fue muy similar, es decir de $7,51 m^3$ y $7,41 m^3$ para raleo y tala rasa respectivamente (Ver anexo 2 y 3).

La producción promedio más alta fue de 2,46 m³/h, ésta correspondió al análisis de 24 jornadas evaluadas en la Finca V bajo el tratamiento silvicultural de tala rasa. En esta finca, el volumen promedio por jornada fue de 7,99 m³ (ver anexo 3), dato que se encuentra por encima del promedio de volumen registrado para las otras tres fincas. El incremento del volumen en la Finca V es explicado por la diferencia de edades de siembra entre las fincas, al ser la Finca V la primera en haber sido reforestada fue la finca en la que los árboles, al momento del aprovechamiento, presentaron diámetros mayores.

La menor producción (1,56 m³/h) se presentó en la Finca I, la cual fue aprovechada bajo el primer tratamiento. De las cuatro fincas aprovechadas bajo el tratamiento de raleo, la Finca I mostró la menor cantidad de fustes arrastrados con un promedio de 35 (anexo 2), lo que provocó a su vez que la cantidad de m³ arrastrados fuera la menor de todas las fincas.

La poca diferencia entre los volúmenes extraídos en cada uno de los tratamientos silviculturales aplicados se debió a que el aprovechamiento final se realizó menos de un año después de haberse realizado el raleo, de manera que los fustes presentaron diámetros promedio muy similares tanto en raleo como en tala rasa.

La producción promedio obtenida durante esta evaluación para el arrastre de madera con búfalos fue de 1,66 m³/h para el tratamiento silvicultural de raleo y de 2,18 m³/h para la tala rasa (anexo 2 y 3 respectivamente), mientras que los datos de producción promedio reportados para el arrastre con bueyes y con tractor de oruga fueron de 1,90 m³/h y 5,82 m³/h (Cordero, 1989) y de 1,48 m³/h y 7,83 m³/h (Daniluk, 1996). Las comparaciones, al igual que en el caso de la eficiencia, muestran una producción muy similar entre búfalos y bueyes, y bastante desventaja si se confrontan los animales con la tecnología mecanizada.

Por otro lado, el alto volumen de extracción que se puede alcanzar con la tecnología mecanizada es compensado, cuando se trabaja con animales, con las ventajas de desplazamiento en condiciones adversas en donde una maquinaria no podría funcionar. Tanto los bueyes como los búfalos de agua son capaces de acceder a lugares con pendientes pronunciadas, terrenos lodosos y fincas con canales y drenajes amplios, mientras que los tractores de oruga o los skidder requerirían de grandes movimientos de tierra y horas de trabajo con el consecuente impacto para poder acceder a esos mismos sitios.

Otro aspecto que influye en la producción es la velocidad con que se puedan desempeñar los animales, de manera que puedan realizar la mayor cantidad de ciclos por hora, por lo

que la planificación es también muy importante antes de iniciar con el aprovechamiento forestal.

La producción al igual que la eficiencia al final de una jornada, dependen en gran medida de la no presencia de tiempos improductivos, de manera que el arrastre de madera se concentre en aquellos movimientos necesarios para la disposición final de la madera en los patios de carga o patios finales.

3. Variables de interés dentro de la evaluación de la etapa de arrastre de madera utilizando búfalos de agua.

Para la evaluación de cada una fincas, fueron calculadas variables como distancia de arrastre y pendiente. En cuanto a la primera variable se obtuvo un rango amplio en el que los fustes fueron arrastrados. La distancia promedio más corta fue de 31,50 metros correspondiente a fustes localizados muy cerca de cada uno de los patios de acopio, mientras que la distancia de arrastre promedio más larga fue de 323,70 metros, realizada en la Finca V en la que el patio de acopio se encontraba sumamente lejos del patio dispuesto para la carga final de la madera. A pesar de que el arrastre fue realizado en dos fases, con el objetivo de disminuir la distancia de arrastre, el establecimiento del patio de acopio se realizó muy adentro de la plantación que se estaba aprovechando, lo que ocasionó largos trayectos entre uno y otro patio al realizarse la segunda fase del arrastre.

La segunda variable considerada de interés para la evaluación de la etapa de arrastre fue la pendiente. Antes de iniciar con la toma de datos la topografía fue considerada como una variable importante ya que la pendiente es uno de los elementos que más incide en la selección del método de arrastre y en la productividad que se obtendrá al finalizar el aprovechamiento. No obstante, ninguna de las fincas seleccionadas para la evaluación presentó alguna pendiente pronunciada. Los valores de -3% y +6% fueron los más extremos, razón por la cual no se pudo determinar su influencia en los datos obtenidos para la variable de producción.

4.3 Objetivo específico 3.

Determinar la ecuación de regresión que mejor se ajuste al predecir la producción (m³/h) a partir de datos obtenidos en campo.

Los resultados obtenidos fueron analizados con el objetivo de identificar la relación entre varias variables independientes y que esta relación explicara el comportamiento de una variable dependiente que en este caso fue la “producción”.

1. Análisis de los datos

Una vez digitados los datos, se creó una base original con cada uno de los ciclos evaluados, en cada una de las jornadas y bajo cada uno de los tratamientos silviculturales aplicados. Esto significó un total de 1208 ciclos, obtenidos durante la evaluación de 60 jornadas (las variables evaluadas se muestran en el anexo 4), en un total de cinco fincas estudiadas (cuadro 4). La base de datos fue depurada con el objetivo de eliminar todas aquellas observaciones identificadas como “*outliers*” o “valores atípicos”.

Es importante mencionar que por tratarse de arrastre con animales, el comportamiento de cada uno de los ciclos siempre fue diferente. Por la gran cantidad de datos recolectados y por la variabilidad existente entre cada uno de los ciclos, se tomó la decisión de trabajar con un promedio de los ciclos recolectados en una misma jornada (un día de trabajo), es decir, se pasó de 1208 ciclos a 60 jornadas de las cuales 20 pertenecieron al tratamiento silvicultural raleo mientras que las restantes pertenecieron a las jornadas en donde se evaluó la tala rasa. Los datos promedio de cada una de las jornadas se presentan en los anexos 2 y 3.

El análisis de los datos inició determinando si existía o no diferencia estadística entre: 1) tratamiento silvicultural aplicado (anexo 5), 2) método de arrastre utilizado (anexo 6) y 3) búfalos de agua utilizados para el arrastre (anexo 7).

Se probó la normalidad de todos los datos provenientes de las jornadas de trabajo por medio de la prueba Shapiro-Wilks la cual arrojó un *p-value* de 0,0061 con lo que se rechaza la H_0 y se concluye que los datos no siguen una distribución normal, esto como consecuencia de la alta variabilidad que muestran las variables.

1) Tratamiento silvicultural.

Se ejecutó un análisis de varianza de manera que se pudiera comprobar la homogeneidad de las varianzas de ambos grupos de datos. Se obtuvo *p-value* de 0,0096 lo que indica que las varianzas son diferentes. Posteriormente se utilizó estadística no paramétrica y se realizó una prueba de Kruskal-Wallis, resultados que coinciden con los obtenidos en el ANDEVA (*p-value*: 0,0212), lo que sugiere que sí existe diferencia entre las fincas evaluadas. Como último paso se corrió una prueba de Bonferroni (cuadro 6) con el objetivo de identificar entre cuales de las fincas existía diferencia.

Cuadro 6. Prueba de Bonferroni para los datos de producción (m³/h) obtenida por finca durante el arrastre de madera de plantaciones forestales, Limón, Costa Rica. 2016.

Finca evaluada	Tratamiento silvicultural	Medias	n	E.E
I	Raleo	1,56 ^A	10	0,17
IV	Raleo	1,67 ^{AB}	1	0,53
IV	Tala rasa	1,76 ^{AB}	8	0,19
III	Raleo	1,77 ^{AB}	2	0,37
II	Raleo	1,78 ^{AB}	7	0,20
III	Tala rasa	2,05 ^{AB}	3	0,30
I	Tala rasa	2,21 ^{AB}	6	0,21
V	Tala rasa	2,34 ^B	23	0,11

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los resultados mostrados en el cuadro 1 sugieren que la Finca V con el tratamiento de tala rasa y la Finca I con el tratamiento de raleo fueron las fincas donde se presentó mayor variabilidad y entre el resto de las fincas existió diferencia pero no relevante. Además, se observó que precisamente las Finca I (raleo) y V (tala rasa) son las de menor y mayor producción (m³/hora) respectivamente, debido a que en la Finca I (raleo) se arrastró una menor cantidad de fustes durante todas las jornadas evaluadas, mientras que en la Finca V (tala rasa) la cantidad de fustes y los diámetros obtenidos fueron mayores, lo que generó un aumento en la producción. Otro aspecto influyente fue que el estudio inició con el aprovechamiento de la Finca I (raleo), y concluyó, año y medio después, con el aprovechamiento de la Finca V (tala rasa).

Por otro lado los datos de las medias sugieren la formación de dos grupos con características similares: el primero con las fincas en las que se aplicó raleo y el segundo

con las fincas en las que se ejecutó la tala rasa. Los datos de mayor producción fueron los de tala rasa.

2) Método de arrastre.

Considerando que existen únicamente dos grupos de datos, se procedió a realizar una prueba F para igualdad de varianzas basada en dos muestras en la que se obtuvo un *p-value* de 0,0723 demostrando que las varianzas de ambos grupos de datos son iguales, esto fue corroborado con una prueba de Kruskal-Wallis (*p-value* de 0,7136). Por último se corrió una prueba de Bonferroni de manera que se lograran visualizar la poca diferencia entre las medias de ambos grupos de datos. Los resultados se muestran en el cuadro 7.

Cuadro 7. Prueba de Bonferroni para los datos de producción (m³/hora) obtenida mediante dos métodos de extracción durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.

<u>Método de arrastre utilizado</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E</u>
Cadenas	2,04 ^A	46	0,16
Sulky	1,91 ^A	14	0,09

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los datos sugieren que estadísticamente no existió diferencia entre la utilización de uno u otro método de arrastre, ya que las condiciones casi planas de terreno, plantación y clima fueron muy homogéneas originando poca variabilidad entre los métodos utilizados. Sin embargo Guzmán y Zambrana (2009) mencionan que la utilización del sulky podría conllevar grandes beneficios para el animal cuando las distancias de arrastre son largas, ya que eleva la troza del suelo, disminuyendo la fricción al momento del arrastre.

3) Búfalos de agua utilizados para el arrastre.

Los datos fueron recolectados con dos animales distintos: Búfalo 1 y Búfalo 2. La prueba F para igualdad de varianzas mostró un *p-value* de 0,9368 lo que señala que ambos grupos de datos poseen varianzas iguales. Se recurrió a la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (*p-value* 0,2698) con lo que se corroboró los datos de la prueba paramétrica F. El cuadro 8 muestra los resultados de la prueba de Bonferroni

en donde se observa que las medias de ambos grupos son estadísticamente iguales.

Cuadro 8. Prueba de Bonferroni para los datos de producción (m³/hora) obtenida mediante la utilización de dos búfalos durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.

<u>Búfalo utilizado para el arrastre</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E</u>
Búfalo 1	2,06 ^A	47	0,08
Búfalo 2	1,81 ^A	13	0,16

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El búfalo más utilizado fue Caracol. Este animal presentó un peso de 900 kg, una edad de trece años y una experiencia aproximada en el arrastre de madera de diez años, mientras que Benzon se caracterizó por ser un animal joven de aproximadamente cuatro años, un peso de 600 kg y una experiencia en el arrastre de madera de dos años. Las diferencias físicas entre ambos búfalos no se visualizaron en el Test de Bonferroni debido a que la fuerza que presentó Caracol al arrastrar madera, fue compensada con la velocidad que mostró Benzon. Un animal tan pesado como Caracol, arrastró trozas de mucho volumen pero en un gran lapso de tiempo; Benzon por su parte, arrastró trozas menos pesadas en un lapso de tiempo corto, por lo que al final de la jornada la cubicación de la madera puesta en el patio de acopio fue similar para ambos animales.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado anteriormente guían la búsqueda del modelo de regresión ya que se exponen las variables y las agrupaciones adecuadas para el mejor ajuste de los modelos.

Durante el desarrollo del modelo de regresión fue completamente necesario la agrupación de los datos obtenidos para cada uno de los tratamientos silviculturales aplicados, no así para los métodos de arrastre ni para los búfalos utilizados en donde se sugirió desarrollar el modelo sin hacer distinción entre dichos grupos de datos.

Una vez clara la línea de investigación se procedió a realizar diagramas de dispersión para visualizar el comportamiento de la producción en función de las variables de distancia (metros), eficiencia (%), volumen (m³), duración total de la jornada (h) y número de fustes arrastrados. A continuación se presenta únicamente el diagrama obtenido para la variable independiente “distancia de arrastre” ya que se consideró como la variable más influyente

en el arrastre de madera con búfalos de agua. La producción en función de la distancia fue graficada para la totalidad de las jornadas (figura 13), y para las jornadas separadas por cada uno de los tratamientos silviculturales, raleo y tala rasa, según se sugirió al concluir el análisis estadístico.

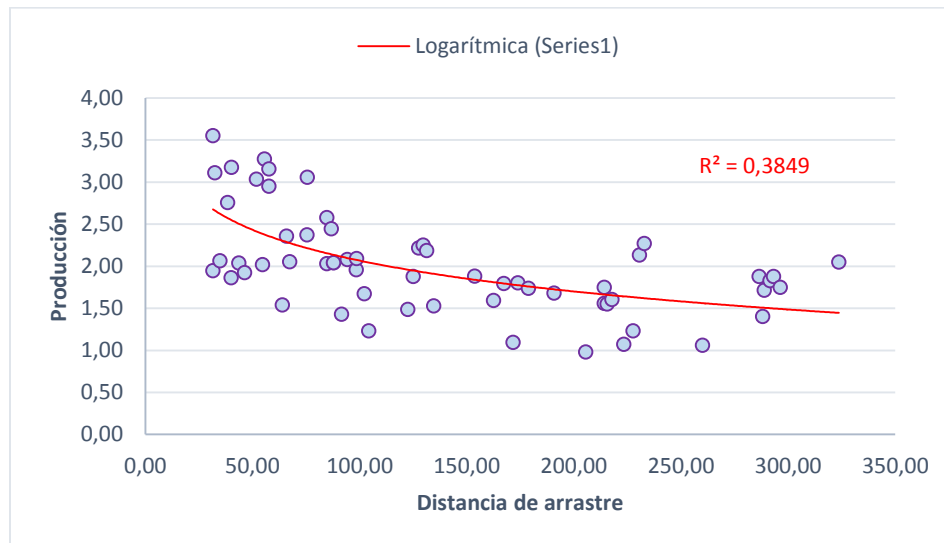


Figura 13. Comportamiento de la producción ($m^3/hora$) en función de la distancia durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica. 2016.

Al momento de graficar la totalidad de las jornadas se obtuvo un R^2 ajustado de 38,49%, calificado como bajo si se desea predecir una variable que sea dependiente a la distancia, sin embargo cuando los datos de jornadas se graficaron separados por tratamiento silvicultural aplicado, el R^2 ajustado aumentó en ambos casos.

El ajuste de la variable “producción” en función de la distancia aumentó significativamente cuando únicamente se tomaron los valores del tratamiento silvicultural raleo, este pasó de 38,49% a 66,20% (anexo 8) indicando una mayor correlación entre las variables en estudio. De igual manera, el R^2 aumentó cuando se graficaron los valores de tala rasa por separado (60,99%, anexo 8). En ambos casos la correlación entre la variable dependiente “producción” y la independiente “distancia de arrastre” fue mejor, lo cual dio respaldo a la conclusión señalada en el análisis estadístico de los datos.

2. Modelos de regresión

El desarrollo de los modelos de regresión que mejor se ajustaron al predecir la producción se realizó por medio del programa SPSS Statistics. Siguiendo con la estrategia planteada

según el análisis estadístico de los datos, se determinó el mejor modelo para el conjunto de datos de producción obtenidos durante el raleo (a) y se definió otro modelo para el conjunto de datos de producción obtenidos durante la tala rasa (b).

Conjuntamente los supuestos de la regresión lineal múltiple (De la Fuente, 2011) fueron verificados. Las hipótesis de linealidad, homocedasticidad e independencia fueron contrastadas a través de un análisis de gráfico que enfrentó los valores de los residuos contra los valores ajustados, la linealidad, la homocedasticidad y la independencia fueron comprobadas por medio de diagramas de dispersión parcial para cada una de las variables independiente; con esto se elimina el efecto que pudieran tener otras variables y se muestra únicamente la relación entre las variables representadas. Mientras que la hipótesis de normalidad se comprobó a través de una prueba de Shapiro-Wilks que se realizó a los residuos de cada una de las variables.

La validación de los modelos fue realizada utilizando un conjunto de datos previamente aislados para dicho efecto. Para validar los modelos desarrollados con el conjunto de datos de raleo se utilizaron cinco jornadas de trabajo, mientras que para la validación de la tala rasa se utilizaron diez jornadas: en ambos casos correspondió a un 25% del total de los datos utilizados en cada uno de los tratamientos.

- a) Generación de un modelo de regresión para un conjunto de datos obtenidos durante un raleo.

Se seleccionaron los dos mejores modelos que predijeran con mayor exactitud la producción (m^3/h) obtenida durante un aprovechamiento forestal bajo el tratamiento silvicultural raleo. En el primer modelo seleccionado las variables “eficiencia” y “distancia de arrastre” resultaron no significativas a pesar de que el R^2 fue mejor que en el segundo modelo, por lo que se excluyó la variable “eficiencia” y se volvió a correr el modelo para verificar los resultados. El cuadro 9 muestra los nuevos resultados que corresponden al modelo matemático número dos en el que tanto los parámetros como el modelo fueron altamente significativos ($p\text{-value}<0,05$)

Cuadro 9. Estadísticos resumen obtenidos para las ecuaciones con mejor ajuste al predecir la producción (m³/h) del tratamiento silvicultural raleo, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica.

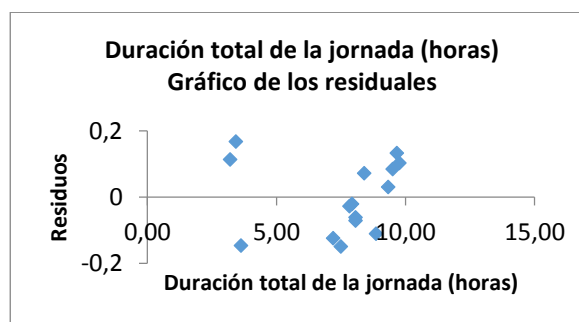
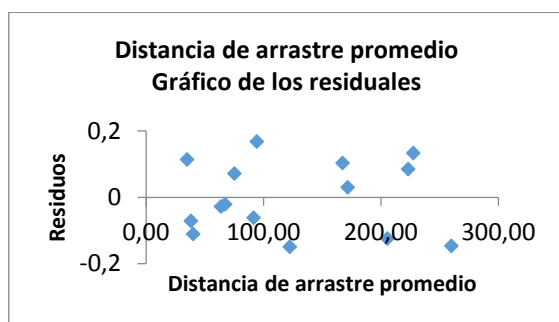
MODELO	ECUACIÓN	VARIABLES INTRODUCIDAS	SIGNIFICANCIA	R ² (%)
1	2,891 + 0,179*V - 0,001*D - 0,191*Dt - 0,016*E	Volumen (m ³)	0,000	95
		Distancia de arrastre (metros)	0,067	
		Duración total de la jornada (h)	0,000	
		Eficiencia (%)	0,190	
2	1,633 + 0,154*V - 0,002*Dt - 0,109*D	Volumen (m ³)	0,000	93,2
		Distancia de arrastre (metros)	0,000	
		Duración total de la jornada (h)	0,000	

La ecuación:

$$\text{Producción} = 1,633 + 0,154 * \text{Volumen por jornada (m}^3\text{)} - 0,002 * \text{Distancia de arrastre} - 0,109 * \text{Duración total de la jornada.}$$

fue la que mejor ajuste presentó, a partir de los datos obtenidos mediante el tratamiento silvicultural raleo, para estimar la producción a partir del volumen, la distancia y la duración total de la jornada, variables consideradas de fácil medición dentro del sector forestal ya que son básicas dentro del estudio de plantaciones forestales.

Una vez obtenido el modelo, se verificaron los supuestos de la regresión de la siguiente manera: la linealidad y la homocedasticidad por medio de gráficos de dispersión mientras que la normalidad de los residuos se verificó a través de una prueba de Shapiro-Wilks. Las tres variables independientes presentaron varianza constante, lo que comprueba valores distribuidos de manera constante a lo largo de la muestra.



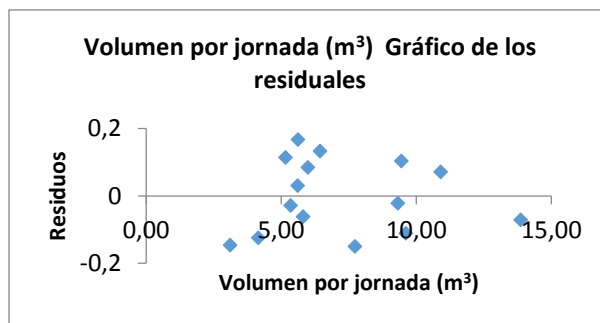


Figura 14. Valores observados de producción (m^3/h) para las variables de a) volumen por jornada, b) distancia de arrastre y c) duración total de la jornada, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

La prueba de normalidad fue aplicada a los residuos obteniendo un *p-value* de 0,1385 señalando que los datos son normales, cumpliendo con el tercer supuesto de los modelos de regresión.

Shapiro-Wilks (modificado)

<u>Variable</u>	<u>n</u>	<u>Media</u>	<u>D.E.</u>	<u>W*</u>	<u>p(Unilateral D)</u>
<u>Residuos</u>	<u>raleo 15</u>	<u>0,00</u>	<u>0,11</u>	<u>0,89</u>	<u>0,1385</u>

Figura 15. Supuesto de normalidad de los residuos para para el desarrollo de la ecuación que mejor estime la producción durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

- b) Generación de un modelo de regresión para un conjunto de datos obtenidos durante una tala rasa.

Para el caso del segundo tratamiento silvicultural aplicado durante el desarrollo de este trabajo se eligieron los dos modelos de regresión con mejor ajuste, mostrados en el cuadro 10. Durante el análisis del primer modelo se pudo observar que la variable independiente “fustes arrastrados” no fue significativa, lo que quiere decir que no aportará nada al modelo por lo que se decidió eliminar dicha variable y volver a correr el programa. Los resultados del segundo modelo mostraron un R^2 ajustado más bajo, sin embargo todas las variables incluidas resultaron altamente significativas, lo que quiere decir que la producción, en este caso, está correlacionada altamente con el volumen, la distancia de arrastre de los fustes, la duración total de la jornada y con la eficiencia de la misma y que las variables antes mencionadas explican en un 86,7% la variabilidad de la producción.

Cuadro 10. Estadísticos resumen obtenidos para las ecuaciones con mejor ajuste al predecir la producción (m³/h) durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

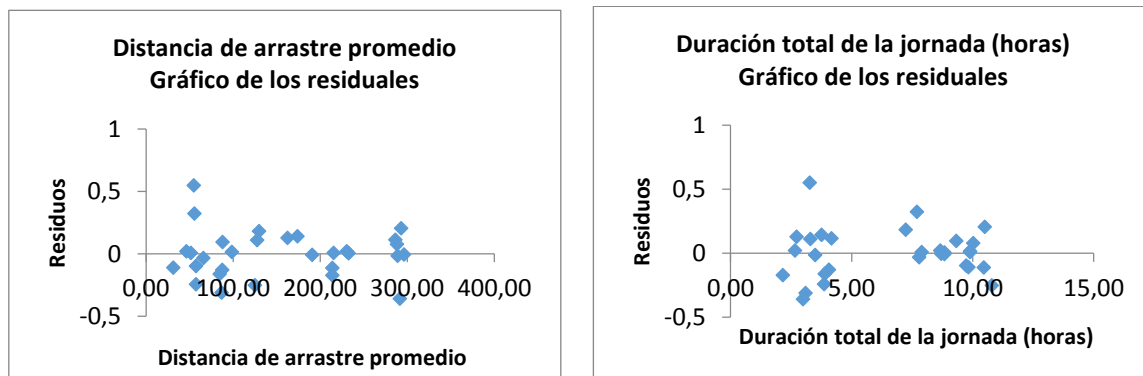
MODELO	ECUACIÓN	VARIABLES INTRODUCIDAS	SIGNIFICANCIA	R ² (%)
1	4,845 + 0,219*V - 0,002*D - 0,252*Dt - 0,037*E - 0,013*Fa	Volumen (m ³)	0,000	89,2
		Distancia de arrastre (metros)	0,002	
		Duración total de la jornada (h)	0,000	
		Eficiencia (%)	0,000	
		Fustes arrastrados	0,117	
2	5,042 + 0,199*V - 0,001*Dt - 0,275*D - 0,041*E	Volumen (m ³)	0,000	86,7
		Distancia de arrastre (metros)	0,006	
		Duración total de la jornada (h)	0,000	
		Eficiencia (%)	0,000	

La ecuación:

$$\text{Producción} = 5,042 + 0,199 \cdot \text{Volumen por jornada (m}^3\text{)} - 0,001 \cdot \text{Distancia de arrastre} - 0,275 \cdot \text{Duración total de la jornada} - 0,041 \cdot \text{Eficiencia (\%)}$$

fue la que indicó la mejor correlación entre las variables para el grupo de datos obtenido mediante el tratamiento silvicultural tala rasa.

Según se muestra en la figura 16, la varianza de cada una de las variables incluidas dentro del modelo fue constante, de igual manera el supuesto de normalidad también se cumplió (figura 17), arrojando un *p-value* de 0,7671 que certifica la normalidad de los residuos del modelo seleccionado.



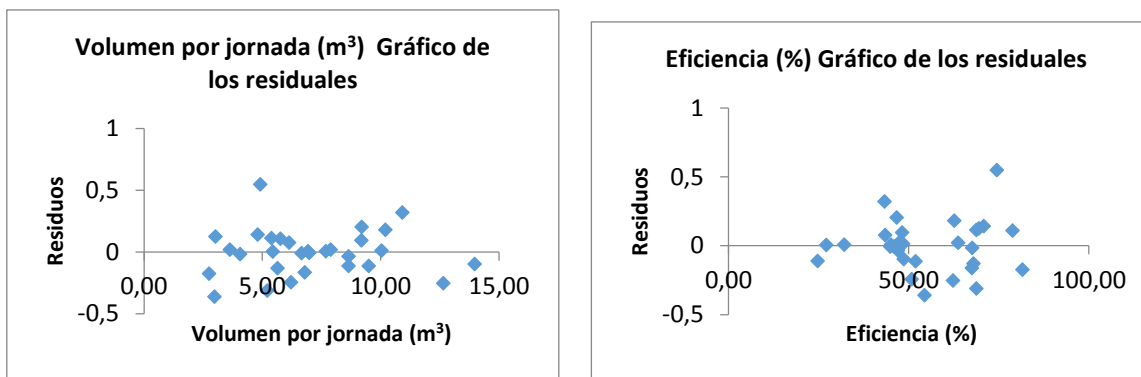


Figura 16. Valores observados de producción (m^3/h) para las variables de a) volumen por jornada, b) distancia de arrastre y c) duración total de la jornada, durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Residuos tala rasa	30	0,00	0,19	0,97	0,7671

Figura 17. Supuesto de normalidad de los residuos para para el desarrollo de la ecuación que mejor estime la producción durante la operación de arrastre con búfalos en un aprovechamiento de plantaciones forestales. Limón, Costa Rica. 2016.

Además de las variables nombradas en los modelos expuestos anteriormente, se consideraron variables como la pendiente del terreno (para este caso fue casi nula), la duración efectiva de la jornada y el número de fustes arrastrados, no obstante resultaron no significativas por lo que no fueron incluidas durante el análisis.

Validación

Según Jiménez (2012), todo modelo de estimación concluye con la validación del mismo, siendo la recolección de datos y la construcción los dos primeros pasos. La validación puede mostrar debilidades del modelo, lo cual conducirá a mejorar su estructura o bien a la necesidad de recolectar más datos en campo.

La importancia de la validación se centra en que los modelos de producción, una vez validados, se convierten en una herramienta importante para el estudio y la caracterización de aspectos económicos, productivos y técnicos de un sistema de producción de madera reforestada.

Para realizar la validación se recurrió a los datos previamente asilados y dispuestos para esta tarea, mismos que no fueron incluidos en la construcción de los modelos. Se verificó

el porcentaje de sesgo tanto para a) el modelo escogido para los datos de raleo como para b) el modelo generado a partir de los datos de tala rasa.

$$\% \text{Sesgo a)} = \frac{-0,14}{8,41} * 100 = -1,66\% \quad \% \text{Sesgo b)} = \frac{0,0019}{22,28} * 100 = 0,0083\%$$

Los porcentajes obtenidos en ambos casos se encuentran dentro del intervalo permitido de sesgo (-2%, +2%) los cuales afirman que un modelo predice de manera correcta una variable. El signo negativo, mostrado en el resultado del primer modelo, indica que se estaría sobreestimando la producción en un 1,66%, ya que la suma de los valores estimados fue mayor que la suma de los valores observados, sin embargo, si se visualizan los resultados del modelo desarrollado para los datos de tala rasa, se puede decir que el modelo es muy bueno y que subestima los cálculos de producción en apenas un 0,008%.

Además, se realizó un test de Wilcoxon de manera que se reforzara la validez de ambos modelos, por lo que se obtuvo en ambos casos un *p-value* de 0,99, lo que señala que la suma de los valores observados es igual a la suma de los valores estimados (anexo 11).

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- ❖ De los movimientos productivos que conforman el ciclo de arrastre, el que mayor tiempo consumió fue “viaje cargado” (19,85%), mientras que “soltar” fue el que menos tiempo consumió del total de la jornada (7,54).
- ❖ La utilización de animales dentro del sistema de cosecha de madera reforestada implica una producción menor pero se incurre en menos costos de operación y en un menor porcentaje de daños al ambiente.
- ❖ Los tiempos productivos alcanzaron un 58,11% lo cual indica una buena efectividad puesto que estudios de este tipo han demostrado que raramente se supra el 75%.
- ❖ La producción obtenida para la operación de arrastre mediante la utilización de búfalos de agua fue similar (2,01 m³/h) a la obtenida cuando se utilizaron bueyes (1,90 m³/h); y ambas producciones fueron inferiores a las producciones obtenidas cuando se utilizó tecnología mecanizada (7,83 m³/h).
- ❖ Una buena elección del método de extracción, así como una adecuada planificación pueden reducir los daños causados al medio ambiente producidos por el aprovechamiento forestal de plantaciones.
- ❖ El mejor modelo encontrado para la estimación de la producción basado en variables de fácil medición, obtuvo un R² de 95% para el caso del tratamiento silvicultural raleo y 89,2% para datos obtenidos durante una tala rasa.
- ❖ Los modelos obtenidos durante la evaluación de este trabajo son específicos para la zona de estudio ya que concentra características de clima y terreno muy particulares. Su utilización con otros datos deberá restringirse a plantaciones que cuenten con las características similares a las mencionadas en este trabajo.
- ❖ Por último se concluye que los búfalos de agua representan una buena alternativa y de bajo costo para realizar el arrastre de madera de plantaciones forestales.

Recomendaciones

- Implementar el sistema de aprovechamiento forestal y utilizar búfalos de agua según se señaló en el capítulo 1 de este estudio, con el fin de aumentar la producción y disminuir los costos y el tiempo.
- Proporcionar capacitaciones, charlas técnicas y de motivación dirigida a los operarios involucrados, para lograr disminuir los tiempos improductivos dentro del sistema de aprovechamiento de plantaciones forestales.
- Debido a que cada plantación presenta características distintas incluso al estar establecidas en la misma zona de vida, se recomienda tener precaución al utilizar las ecuaciones desarrolladas para estimar la producción de cada una de las plantaciones de interés.
- Los tiempos no productivos son determinantes dentro de la operación de arrastre de madera, su adecuada clasificación y disminución son primordiales si se desea aumentar la producción y la eficiencia de la operación.
- Evaluar la utilización del búfalo de agua en conjunto con tecnología mecanizada en un sistema combinado que busque mejorar la producción.

Capítulo 6. Bibliografía

- Alder, D. (1980). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos* (No. CIDAB-SD391-F6e-22/2). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Arango, J. P., Rivera, B., y Granobles, J. C. (2000). Elaboración y validación de modelos de estimación de producción lechera en sistemas especializados. *Preparación para publicación Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. Recuperado de <http://www.condesan.org/memoria/COL0500.PDF>
- Arriaga, C., Castelán, O., y Velásquez, L. (2003). Investigación en animales de trabajo para el desarrollo rural. Centro de Investigación en Ciencias Agropecuarias (p. 111). Recuperado de <https://books.google.co.cr/books>
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (2016). Ley N° 7451 de Bienestar de los Animales. 1994. Recuperado de http://www.asamblea.go.cr/Centro_de_informacion/Servicios_Parlamentarios/Leyes%20actualizadas/7451.pdf
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (2016). Proyecto de Ley: Reformas al Código Penal, Ley N.° 4573 y Reformas de la Ley de Bienestar de los Animales, Ley N. °7451. 2011. Recuperado de http://www.asamblea.go.cr/Centro_de_informacion/biblioteca/Centro_Dudas/Lists/Formule%20su%20pregunta/Attachments/305/Expediente%2018298.pdf
- Barrantes, G. (2000). Aplicación de incentivos a la conservación de la biodiversidad en Costa Rica. Costa Rica: Instituto de Políticas para la Sostenibilidad-IPS, Instituto Nacional de Biodiversidad-INBio. Recuperado de http://www2.inbio.ac.cr/estrategia/Estudio_2004/Paginas/PDF
- Cándano, F., Vidal, A., Pinto, A. M., y Machado, C. C. (2004). Evaluación de tres métodos para el arrastre de madera en rodales naturales de *Pinus caribaea var. caribaea*. *Revista Árvore*, 28(3), 373-380. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v28n3/21604>

- Chirwing, J. C. (1994). Los animales de trabajo y sus múltiples aportes al desarrollo agrícola rural. Servicio de producción animal. *División de producción y sanidad animal. FAO, Roma, Italia*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/v8180t/v8180T0p.htm>
- Cordero Quesada, W. (1988). *Utilización del sulky en extracción de madera con bueyes*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago (Costa Rica). Centro de Información Tecnológica. Unidad de Tecnología Apropriada.
- Cordero, W., Frisk, T., y Dykstra, D. (1995). Uso de bueyes en operaciones de aprovechamiento forestal en áreas rurales de Costa Rica. Estudio Monografico de Explotación Forestal (FAO). no. 3. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/v4925s/V4925s00.htm#TopOfPage>
- Conway, S. (1982). *Logging Practices: Principles of Timber Harvesting Systems*. San Francisco - USA: Miller Freeman. 434 pp. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015010218>
- Daniluk, G. (1996). *Sistemas de saca, madereo o desembosque*. Departamento de Producción Forestal y Tecnología de la Madera. Recuperado de: <http://www.fagro.edu.uy/~forestal/cursos/tecmadera/Gustavo/SISTEMAS%20DE%20SACA.pdf>
- De la Fuente, S. (2011). *Regresión Múltiple*. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Recuperado de http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/MULTIVARIANTE/REGRE_MULTIPLE/regresion-multiple.pdf
- Evans, J. (1998). La producción sostenible de madera en las plantaciones forestales. Unasya – No. 192. FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/w7126s/w7126s00.htm#Contents>
- FAO. (1980). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento: con referencia especial a los trópicos*. The Commonwealth Forestry Institute, Reino Unido. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/016/ap354s/ap354s00.pdf>
- Hughell, D. A. (1990). Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en América Central (No. 22). CATIE. Recuperado de <http://bibliotecaorton.catie.ac.cr/>

- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2015). Datos climáticos para la provincia de Limón, Costa Rica. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio>
- Isuiza, M., López, J., y Pezo, R. (1996). Estudio sobre el búfalo de agua en Jenaro Herrera. Instituto de investigaciones de la Amazon. Recuperado de <http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/handle/minam/300/BIV00651.pdf?sequence=1>
- Jiménez, Raúl. (2012). Estadística inferencial II. Regresión lineal simple y múltiple. Instituto Tecnológico de Ensenada. Recuperado de https://www.academia.edu/8137314/Estad%C3%ADstica_Inferencial_II
- León-Guzmán, M. (2006). El bienestar animal en las legislaciones de América Latina. Revista deficiencias veterinarias de la Universidad Nacional, (24). Recuperado de http://www.lascaux.univ-nantes.fr/documents/sources_lascaux/articles/Marlen_Leon_Guzman_Bienestar_Animal_2006_ES.pdf
- Meza-Montoya, A. (2004). El aprovechamiento de plantaciones forestales: un sistema de producción. *Kurú: Revista Forestal*, 1(3), 54-56. Recuperado de <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/565>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., y Vining, G. (2001). *Introducción al análisis de regresión lineal*. Ciudad de México, México: Compañía Editorial Continental. Recuperado de <https://www.scribd.com/doc/77495401/Introduccion-al-Analisis-de-Regresion-Lineal-Tercera-Edicion-Montgomery-Peck-Vining>
- Muñoz, F. (2006). Sistemas de medición utilizados en Costa Rica para calcular volumen de madera en troza y aserrada. *Kurú: Revista Forestal* 3(7), 82-85. Recuperado de <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/531/457>
- Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE). (2015). *Código Sanitario para los Animales Terrestres de la OIE*. Recuperado de <http://www.oie.int/es/bienestar-animal/>
- Ortiz-Malavasi, E. (2006). Rendimiento y Crecimiento. Unidad de apoyo. Escuela de Ingeniería Forestal. *Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago Costa Rica*.

- Prado, J. A. (2015). Las Plantaciones Forestales: más allá de los árboles. Ministerio de Agricultura, Chile. Recuperado de: http://www.corma.cl/_file/material/libroplantforestales.pdf
- Quinchuela, D (2015). Aprovechamiento forestal semi-mecanizado de madera de *Pinus radiata* D. Don (Pino) en plantaciones de la empresa Novopan del Ecuador sa en la parroquia Cebadas, cantón Guamote provincia de Chimborazo. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4259>
- Rosales, R. R. (2011). Situación del búfalo de agua en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 24(5), 19.
- Simón, L., y Galloso, M. (2008). Evaluación del comportamiento productivo de búfalos de río en sistema arborizado y en monocultivo de gramíneas. *Pastos y Forrajes*, 31(2), 1-1. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v31n2/pyf07208.pdf>
- Sotomayor, A., Helmke, E., y García, E. (2002). Manejo y mantención de plantaciones forestales. *Concepción, Chile. INFOR, CORFO (Chile)*. Recuperado de <http://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2015/12/PREFO-Manual-de-Manejo-Forestales-en-Chile.pdf>
- Torres, E. G. (2009). Búfalos: Una Especie Promisoria. Universidad Nacional de Colombia. 5pp. Recuperado de <http://www.produccion-animal.com.ar>
- Villalobos-Barquero, V., y Meza-Montoya, A. (2016). Evaluación de la etapa de arrastre en un aprovechamiento de plantaciones forestales de *Acacia (Acacia mangium)*. San Carlos, Alajuela, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(33), 03-10. Recuperado de <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/2572>

Capítulo 7. Anexos

Anexo 1. Formulario que contiene los movimientos definidos que componen el ciclo productivo de la etapa de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Fecha:	Hora inicio:	Hora final:	% de Eficiencia	Vol promedio (m3)	Vol por jornada (m3)	m3/hr programada	m3/hr efectiva	Búfalo:	Total de observaciones	Tiempo (minutos)	Tiempo (horas)	Observaciones (%)
JORNADA:	Distancia promedio:	Árboles arrastrados:						Bufalero:				
Número de Trozas/ciclo												
Movimientos Productivos												
Viaje vacío									0	0	0,00	0,00
Amarre									0	0	0,00	0,00
Viaje cargado									0	0	0,00	0,00
Soltar									0	0	0,00	0,00
Total por ciclo (observaciones)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Distancia de arrastre												
Movimientos improductivos												
Descanso de los búfalos									0	0	0,00	0,00
Descanso del Bufalero									0	0	0,00	0,00
Re-amarre de la carga									0	0	0,00	0,00
Acomodar patio									0	0	0,00	0,00
Desrame o troceo									0	0	0,00	0,00
Esperar									0	0	0,00	0,00
Limpar pista									0	0	0,00	0,00
Carga pegada									0	0	0,00	0,00
Acomodo									0	0	0,00	0,00
Alimentación									0	0	0,00	0,00
Colocar aditamentos al búfalo									0	0	0,00	0,00
Total por ciclo (observaciones)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
TOTAL (observaciones)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
TOTAL (minutos)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
VOLUMEN POR CICLO (m3)												

Anexo 2. Producción obtenida mediante el tratamiento silvicultural: raleo durante la evaluación de 21 jornadas de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Finca	Tratamiento	Búfalo	Fustes arrastrados	Distancia de arrastre promedio	Eficiencia (%)	Duración total de la jornada (horas)	Duración efectiva de la jornada (horas)	Volumen por jornada (m ³)	Producción (m ³ /h. Progr)	Producción (m ³ /h. Efec)
I	Cadenas	Caracol	27	63,89	44,26	7,83	3,47	5,34	0,68	1,54
I	Cadenas	Caracol	48	31,56	47,62	9,10	4,33	8,43	0,93	1,95
II	Cadenas	Benzon	47	91,58	50,41	8,07	4,07	5,81	0,72	1,43
I	Cadenas	Benzon	28	104,35	52,26	9,57	5,00	6,16	0,64	1,23
II	Cadenas	Benzon	49	43,71	52,40	6,93	3,63	7,40	1,07	2,04
II	Cadenas	Caracol	49	167,35	53,92	9,77	5,27	9,45	0,97	1,79
I	Cadenas	Caracol	37	227,63	54,14	9,67	5,23	6,44	0,67	1,23
II	Cadenas	Caracol	42	75,40	54,76	8,40	4,60	10,91	1,30	2,37
I	Cadenas	Benzon	35	171,67	55,00	9,33	5,13	5,61	0,60	1,09
III	Cadenas	Caracol	38	67,47	57,14	7,93	4,53	9,31	1,17	2,05
IV	Cadenas	Caracol	42	102,14	57,42	8,53	4,9	8,19	0,96	1,67
I	Cadenas	Benzon	58	40,14	58,27	8,87	5,17	9,61	1,08	1,86
II	Cadenas	Benzon	24	205,47	58,80	7,20	4,23	4,14	0,58	0,98
II	Cadenas	Caracol	29	223,36	58,95	9,50	5,60	5,99	0,63	1,07
I	Cadenas	Caracol	42	134,63	61,83	8,03	4,97	7,59	0,94	1,53
II	Cadenas	Caracol	67	38,40	62,40	8,07	5,03	13,87	1,72	2,76
III	Cadenas	Caracol	34	122,52	69,33	7,50	5,20	7,73	1,03	1,49
I	Cadenas	Benzon	23	34,87	78,13	3,20	2,50	5,15	1,61	2,06
I	Cadenas	Caracol	31	94,29	78,64	3,43	2,70	5,61	1,64	2,08
I	Cadenas	Caracol	20	260,00	80,73	3,63	2,93	3,11	0,85	1,06

Anexo 3. Producción obtenida mediante el tratamiento silvicultural: tala rasa durante la evaluación de 42 jornadas de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Finca	Tratamiento	Búfalo	Jornada	Fustes arrastrados	Distancia de arrastre promedio	Eficiencia (%)	Duración total de la jornada (horas)	Duración efectiva de la jornada (horas)	Volumen por jornada (m ³)	Producción (m ³ /h. Progr)	Producción (m ³ /h. Efec)
V tala rasa	Cadenas	Caracol	10	23	31,50	24,75	9,83	2,43	8,64	0,88	3,55
V tala rasa	Sulky	Caracol	4	12	232,91	27,17	8,83	2,40	5,44	0,62	2,27
V tala rasa	Cadenas	Caracol	13	20	51,79	32,07	7,90	2,53	7,68	0,97	3,03
V tala rasa	Sulky	Caracol	5	20	98,50	36,13	10,33	3,73	7,31	0,71	1,96
V tala rasa	Sulky	Benzon	2	16	323,69	38,44	9,80	3,77	7,72	0,79	2,05
V tala rasa	Cadenas	Caracol	2	31	75,56	42,60	9,23	3,93	12,02	1,30	3,06
V tala rasa	Cadenas	Caracol	8	26	55,54	43,29	7,70	3,27	10,91	1,42	3,27
V tala rasa	Sulky	Caracol	11	16	288,15	43,52	10,03	4,37	6,13	0,61	1,40
V tala rasa	Cadenas	Caracol	5	19	190,81	44,91	8,83	3,97	6,66	0,75	1,68
I tala rasa	Sulky	Benzon	1	24	215,48	45,12	9,90	4,47	6,93	0,70	1,55
V tala rasa	Sulky	Caracol	9	15	296,29	45,98	8,70	4,00	6,99	0,80	1,75
V tala rasa	Sulky	Caracol	7	23	293,17	46,67	10,50	4,90	9,19	0,88	1,88
V tala rasa	Cadenas	Caracol	7	36	65,86	47,01	7,80	3,67	8,64	1,11	2,36
III tala rasa	Cadenas	Caracol	2	21	46,29	47,31	8,67	4,10	7,88	0,91	1,92
I tala rasa	Cadenas	Benzon	3	19	32,39	47,47	3,30	1,57	4,87	1,48	3,11
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	1	38	87,82	48,21	9,33	4,50	9,19	0,98	2,04
I tala rasa	Sulky	Caracol	3	34	98,64	48,48	9,90	4,80	10,03	1,01	2,09
V tala rasa	Cadenas	Caracol	9	36	57,65	48,63	9,73	2,95	13,96	1,43	2,95
V tala rasa	Cadenas	Caracol	12	14	57,65	50,86	3,87	1,97	6,21	1,61	3,16
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	4	22	214,14	51,91	10,47	5,43	9,49	0,91	1,75
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	5	18	217,72	52,58	9,70	5,10	8,17	0,84	1,60
V tala rasa	Sulky	Caracol	8	6	291,50	54,44	3,00	1,63	2,98	0,99	1,83

V tala rasa	Cadenas	Caracol	11	34	40,21	55,10	8,17	3,17	14,29	1,75	3,17
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	9	41	125,09	62,35	10,80	6,73	12,64	1,17	1,88
V tala rasa	Cadenas	Caracol	4	33	129,73	62,67	7,23	4,53	10,20	1,41	2,25
V tala rasa	Sulky	Benzon	3	8	230,63	63,75	2,67	1,70	3,62	1,36	2,13
V tala rasa	Sulky	Caracol	1	25	178,79	64,94	7,70	5,00	8,68	1,13	1,74
V tala rasa	Cadenas	Caracol	3	24	84,68	67,52	3,90	2,63	6,79	1,74	2,58
V tala rasa	Sulky	Caracol	10	8	288,88	67,62	3,50	2,37	4,06	1,16	1,71
III tala rasa	Cadenas	Caracol	3	15	87,79	68,03	4,07	2,77	5,65	1,39	2,04
V tala rasa	Sulky	Caracol	6	12	286,55	68,80	4,17	2,87	5,38	1,29	1,88
I tala rasa	Sulky	Caracol	2	15	86,87	68,82	3,10	2,13	5,21	1,68	2,44
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	8	10	162,50	69,51	2,73	1,90	3,02	1,11	1,59
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	7	12	173,95	70,80	3,77	2,67	4,81	1,28	1,80
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	3	9	153,78	71,79	2,60	1,87	3,51	1,35	1,88
I tala rasa	Cadenas	Benzon	1	15	84,67	73,00	3,33	2,43	4,93	1,48	2,03
I tala rasa	Cadenas	Benzon	2	16	54,75	74,49	3,27	2,43	4,91	1,50	2,02
V tala rasa	Cadenas	Caracol	6	14	127,54	78,79	3,30	2,60	5,76	1,75	2,22
IV tala rasa	Cadenas	Caracol	6	7	214,14	81,54	2,17	1,77	2,75	1,27	1,56
III tala rasa	Cadenas	Caracol	1	21	131,26	84,11	3,57	3,00	6,55	1,84	2,18

Anexo 4. Variables determinadas durante la evaluación de los ciclos de arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Finca	Tratamiento	Ciclo	Búfalo	N° de fustes arrastrados	Observ. Progr.	Duración total del ciclo (h)	Observ. Produc.	Duración efec. del ciclo (h)	Volumen (m ³)	Producción (m ³ /h.prog)	Producción (m ³ /h.ef)	Eficiencia (%)	Distancia de arrastre (m)
I	Tala rasa												
I	Raleo												
II	Raleo												
III	Tala rasa												
III	Raleo												
IV	Tala rasa												
IV	Raleo												
V	Tala rasa												

Anexo 5. Análisis estadístico correspondiente a la evaluación de las 5 fincas en estudio durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Producción	60	2,01	0,59	0,93	0,0061

Figura 18. Prueba de normalidad para los datos de Producción (m³/hora) obtenida en cada una de las 5 fincas evaluadas durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Producción	60	0,29	0,19	26,19

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5,87	7	0,84	3,03	0,0096
Finca Evaluada	5,87	7	0,84	3,03	0,0096
Error	14,41	52	0,28		
Total	20,28	59			

Figura 19. Análisis de varianza ANOVA para los datos de Producción (m³/hora) obtenida en cada una de las 5 fincas evaluadas durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Finca Evaluada	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Producción	Finca I	10	1,56	0,40	1,53	16,46	0,0212
Producción	Finca I TR	6	2,21	0,53	2,06		
Producción	Finca II	7	1,78	0,66	1,79		
Producción	Finca III	2	1,77	0,40	1,77		
Producción	Finca III TR	3	2,05	0,13	2,04		
Producción	Finca IV	1	1,67	0,00	1,67		
Producción	Finca IV TR	8	1,76	0,17	1,77		
Producción	Finca V	23	2,34	0,62	2,22		

Figura 20. Prueba Kruskal Wallis para los datos de Producción (m³/hora) obtenida en cada una de las 5 fincas evaluadas durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Anexo 6. Análisis estadístico correspondiente a la evaluación de los dos métodos de arrastre utilizados durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Producción	41	2,09	0,68	0,96	0,4400

Figura 21. Prueba de normalidad para los datos de Producción (m³/hora) obtenida según el método de extracción utilizado durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Prueba F para igualdad de varianzas

Variable	Grupo(1)	Grupo(2)	n(1)	n(2)	Var(1)	Var(2)	F	p	prueba
Producción	{Cadenas}	{Sulky}	36	5	0,51	0,07	6,88	0,0723	Bilateral

Figura 22. Prueba de F para varianzas iguales aplicada a los datos de Producción (m³/hora) obtenida según el método de extracción utilizado durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Prueba T para muestras Independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	pHomVar	p-valor	prueba
Método de arrastre	Producción	{Cadenas}	{Sulky}	2,08	2,10	0,0723	0,9646	Bilateral

Figura 23. Prueba de T para diferencias entre los datos de Producción (m³/hora) obtenida según el método de extracción utilizado durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Anexo 7. Análisis estadístico correspondiente a la evaluación de los dos búfalos de agua utilizados durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Producción	60	2,01	0,59	0,93	0,0061

Figura 24. Prueba de normalidad para los datos de Producción (m³/hora) obtenida según el búfalo utilizado durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Prueba F para igualdad de varianzas

Variable	Grupo(1)	Grupo(2)	n(1)	n(2)	Var(1)	Var(2)	F	p	prueba
Producción	{Benzon}	{Caracol}	13	47	0,32	0,34	0,92	0,9368	Bilateral

Figura 25. Prueba de F para varianzas iguales aplicada a los datos de Producción (m³/hora) obtenida según el búfalo utilizado durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Prueba T para muestras Independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	pHomVar	p-valor	prueba
Búfalo	Producción	{Benzon}	{Caracol}	1,81	2,06	0,9368	0,1742	Bilateral

Figura 26. Prueba de T para diferencias entre los datos de Producción (m³/hora) obtenida según el búfalo utilizado durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Anexo 8. Comportamiento de la producción (m³/hora) obtenida encada uno de los tratamientos silviculturales aplicado, en función de la distancia, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

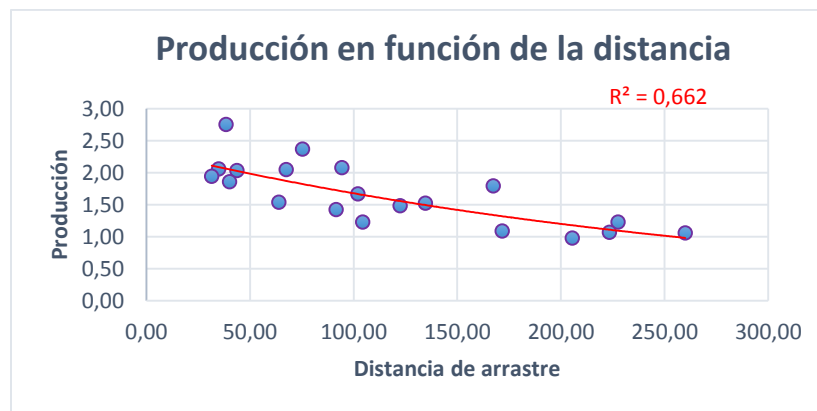


Figura 27. Producción (m³/hora) obtenida mediante el tratamiento de **raleo**, en función de la distancia durante el arrastre de madera de plantaciones forestales.

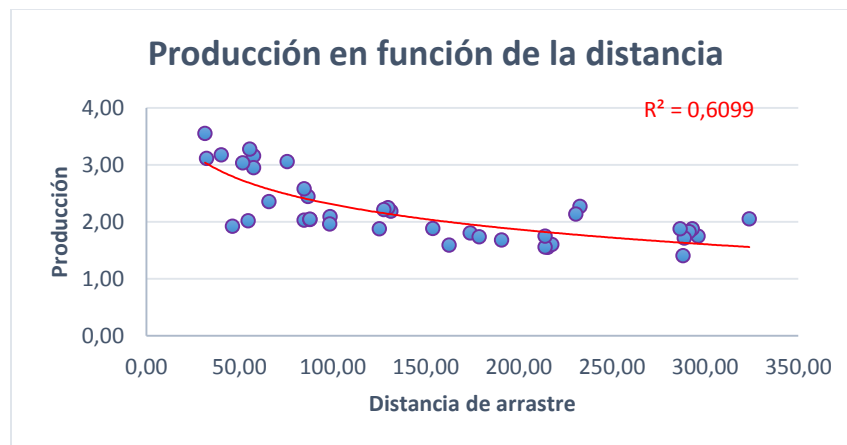


Figura 28. Producción (m³/hora) obtenida mediante el tratamiento de **tala rasa**, en función de la distancia durante el arrastre de madera de plantaciones forestales.

Anexo 9. Estadísticos generados para el modelo de regresión escogido para estimar la producción (m³/hora) obtenida bajo el tratamiento silvicultural raleo, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Variables introducidas/eliminadas^b

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	Duración total de la jornada (horas), Distancia de arrastre promedio, Volumen por jornada (m ³)	.	Introducir

a. Todas las variables solicitadas introducidas.
b. Variable dependiente: m³/hora efectiva

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	.971 ^a	.942	.932	.1266299

a. Variables predictoras: (Constante), Duración total de la jornada (horas), Distancia de arrastre promedio, Volumen por jornada (m³)

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	4.203	3	1.401	87.363	.000 ^a
	Residual	.257	16	.016		
	Total	4.459	19			

a. Variables predictoras: (Constante), Duración total de la jornada (horas), Distancia de arrastre promedio, Volumen por jornada (m³)
b. Variable dependiente: m³/hora efectiva

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	1.672	.146		11.432	.000
	Volumen por jornada (m ³)	.152	.016	.791	9.573	.000
	Distancia de arrastre promedio	-.002	.001	-.335	-4.445	.000
	Duración total de la jornada (horas)	-.111	.017	-.467	-6.595	.000

a. Variable dependiente: m³/hora efectiva

Figura 29. Coeficientes obtenidos para el desarrollo de la ecuación que mejor estime la producción durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Anexo 10. Estadísticos generados para el modelo de regresión escogido para estimar la producción (m³/hora) obtenida bajo el tratamiento silvicultural tala rasa, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Variables introducidas/eliminadas^b

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	Volumen por jornada (m3) , Distancia de arrastre promedio, Eficiencia (%), Duración total de la jornada (horas)	.	Introducir

a. Todas las variables solicitadas introducidas.
b. Variable dependiente: m3/hora efectiva

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	.948 ^a	.898	.887	.1884511

a. Variables predictoras: (Constante), Volumen por jornada (m3) ,
Distancia de arrastre promedio, Eficiencia (%), Duración total de la jornada (horas)

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	10.974	4	2.743	77.250	.000 ^a
	Residual	1.243	35	.036		
	Total	12.217	39			

a. Variables predictoras: (Constante), Volumen por jornada (m3) ,
Distancia de arrastre promedio, Eficiencia (%), Duración total de la jornada (horas)
b. Variable dependiente: m3/hora efectiva

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	4.923	.256		19.251	.000
	Distancia de arrastre promedio	-.001	.000	-.210	-2.941	.006
	Duración total de la jornada (horas)	-.269	.026	-1.472	-10.450	.000
	Eficiencia (%)	-.039	.003	-1.036	-11.236	.000
	Volumen por jornada (m3)	.195	.021	1.017	9.252	.000

a. Variable dependiente: m3/hora efectiva

Figura 30. Coeficientes obtenidos para el desarrollo de la ecuación que mejor estime la producción durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Anexo 11. Validación de los modelos de regresión desarrollados para estimar la producción (m³/hora) obtenida bajo dos tratamientos silviculturales: raleo y tala rasa, durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Cuadro 11. Datos utilizados para la validación del modelo desarrollado a partir del tratamiento silvicultural **raleo** durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Finca	Jornada	Distancia de arrastre promedio	Duración total de la jornada (horas)	Volumen por jornada (m ³)	Eficiencia (%)	Producción (m ³ /h. efec)	Valores Estimados	Observados-Estimados
I	8	134,63	8,03	7,59	61,83	1,53	1,66	-0,13
I	3	104,35	9,57	6,16	52,26	1,23	1,33	-0,10
IV	1	102,14	8,53	8,19	57,42	1,67	1,76	-0,09
II	1	43,71	6,93	7,40	52,40	2,04	1,93	0,11
I	2	31,56	9,10	8,43	47,62	1,95	1,88	0,07
Sumatoria						8,41	8,55	-0,14

Prueba de Wilcoxon para muestras independientes

Cálculo exacto de probabilidades

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	W	p(2 colas)
Condición	Producción Raleo	Estimado	Real	1,71	1,68	27,00	>0,9999

Figura 31. Prueba de Wilcoxon utilizada para la validación del modelo desarrollado a partir del tratamiento silvicultural **raleo** durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Cuadro 12. Datos utilizados para la validación del modelo desarrollado a partir del tratamiento silvicultural **tala rasa** durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.

Finca	Jornada	Distancia de arrastre promedio	Duración total de la jornada (horas)	Volumen por jornada (m ³)	Eficiencia (%)	Producción (m ³ /h.efec)	Valores Estimados	Observados-Estimados
V tala rasa	11	40,21	8,17	14,29	55,10	3,17	3,34	-0,17
V tala rasa	5	98,50	10,33	7,31	36,13	1,96	2,08	-0,12
III tala rasa	1	131,26	3,57	6,55	84,11	2,18	1,79	0,40
IV tala rasa	3	153,78	2,60	3,51	71,79	1,88	1,93	-0,05
IV tala rasa	5	217,72	9,70	8,17	52,58	1,60	1,63	-0,02
V tala rasa	1	178,79	7,70	8,68	64,94	1,74	1,81	-0,07
I tala rasa	1	84,67	3,33	4,93	73,00	2,03	2,03	0,00
V tala rasa	2	75,56	9,23	12,02	42,60	3,06	3,07	-0,02
V tala rasa	2	323,69	9,80	7,72	38,44	2,05	1,98	0,07
I tala rasa	3	32,39	3,30	4,87	47,47	3,11	3,13	-0,01
Sumatoria						22,78	22,78	0,0019

Prueba de Wilcoxon para muestras independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	W	p(2 colas)
Condición	Producción Tala rasa	Estimado	Real	2,28	2,28	105,00	>0,9999

Figura 32. Prueba de Wilcoxon utilizada para la validación del modelo desarrollado a partir del tratamiento silvicultural **tala rasa** durante el arrastre de madera de plantaciones forestales ubicadas en Sahara de Bataán, Limón, Costa Rica.