

Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Forestales. Ingeniería Forestal

Estudiante
Jonathan Maximiliano Quesnel Kiefl

Simulación de eventos discretos (SED) para evaluar el impacto del tamaño de los forwarders, la carga útil, la distancia de extracción y el tipo de producto, en los rendimientos de extracción de biomasa forestal

Trabajo integrador final presentado para obtener el título de “Ingeniero Forestal”

Orientador
Dr. Patricio Miguel Mac Donagh
Co-Orientador
Ing. Ftal. Andrés Alejandro Leszczuk

Noviembre 2024

Eldorado (Misiones, Argentina)



Esta obra está licenciado bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE MISIONES**



**FACULTAD
DE CIENCIAS
FORESTALES**

TRABAJO INTEGRADOR FINAL

Ingeniería Forestal

Simulación de eventos discretos (SED) para evaluar el impacto del tamaño de los *forwarders*, la carga útil, la distancia de extracción y el tipo de producto, en los rendimientos de extracción de biomasa forestal

Estudiante

QUESNEL KIEFL, Jonathan Maximiliano

Orientador

Dr. MAC DONAGH, Patricio Miguel

Co-orientador

Ing. Ftal. LESZCZUK, Andrés Alejandro

Eldorado

Argentina

Diciembre de 2024

Autor QUESNEL KIEFL, Jonathan Maximiliano: Estudiante de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones. Bertoni N° 124, Eldorado, Misiones, Argentina. C.P. 3380. *Email:* jonathankiefl@hotmail.com

Orientador Dr. MAC DONAGH, Patricio Miguel: Profesor Titular de las asignaturas Explotación Forestal y Maquinaria Agrícola, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones. Bertoni N° 124, Eldorado, Misiones, Argentina. C.P. 3380. *Email:* patricio.macdonagh@gmail.com

Co-orientador LESZCZUK, Andrés Alejandro: Especialista en Teledetección y SIG, Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones. Becario Doctoral del CONICET. *Email:* leszczukandresalejandro@gmail.com

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
SUMMARY	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. HIPÓTESIS.....	9
3. OBJETIVOS	9
3.1. Objetivo general.....	9
3.2. Objetivos específicos.	9
4. MATERIALES Y MÉTODOS	10
4.1. Composición de la base de datos unificada	10
4.2. Generación de modelos lineales de las actividades por ciclo	11
4.3. Desarrollo de la simulación de eventos discretos	12
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
5.1. Composición de la base de datos unificada	15
5.2. Determinación de los modelos lineales.....	16
5.3. Modelización de la Simulación de Eventos Discretos	18
5.4. Resultados de las simulaciones	19
5.5. Comparaciones entre datos empíricos y simulaciones.....	22
6. CONCLUSIONES	26
7. AGRADECIMIENTOS	28
9. BIBLIOGRAFÍA	30

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Forwarders</i> estudiados.....	15
Tabla 2. Diferencia de medias (Tukey) de <i>forwarders</i> medianos y grandes provenientes de datos empíricos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).	15
Tabla 3. Modelos lineales de las actividades de extracción de <i>forwarders</i> con su respectivo ajuste y el número de ciclos para cada caso.	17
Tabla 4. Distribuciones de probabilidad ajustadas para cada variable dentro de la extracción de madera con cada grupo de <i>forwarder</i>	18
Tabla 5. Distribuciones ajustadas para la variable volumen individual de troza.	18
Tabla 6. Comparación de medias (Welch) de la productividad efectiva, la distancia de extracción y número de ciclos de <i>forwarders</i> medianos y grandes provenientes de las simulaciones. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).....	20
Tabla 7. Comparación de medias (Welch) de la Productividad efectiva, la Distancia de extracción y número de ciclos de <i>forwarders</i> medianos y grandes provenientes de las simulaciones, teniendo en cuenta el volumen inicial de madera a extraer. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).....	21
Tabla 8. Comparación de medias (Welch) de la Productividad efectiva, la Distancia de extracción y número de ciclos de <i>forwarders</i> medianos y grandes según el origen de datos, volumen inicial a extraer y el grupo de <i>forwarder</i> . Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).....	23

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Captura de pantalla del entorno de la herramienta <i>Imput Analyzer</i>	13
Figura 2. Tiempos promedio de las actividades del ciclo de los <i>forwarders</i> . Donde: TVVSC es el Tiempo de viaje sobre el camino, TVVSL es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, TC es el Tiempo de carga, TM es el Tiempo de movimiento entre carga, TVCSL es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, TVCSC es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, TD es el Tiempo de Descarga.	16
Figura 3. Captura de pantalla del <i>layout</i> de la simulación.	19
Figura 4. Tiempos promedio de las actividades de los <i>forwarders</i> en las simulaciones. Donde: TVVSC es el Tiempo de viaje sobre el camino, TVVSL es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, TC es el Tiempo de carga, TM es el Tiempo de movimiento entre carga, TVCSL es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, TVCSC es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, TD es el Tiempo de Descarga.	20
Figura 5. Tiempos promedio de las actividades de los <i>forwarders</i> en las simulaciones teniendo en cuenta los volúmenes iniciales de extracción. Donde: TVVSC es el Tiempo de viaje sobre el camino, TVVSL es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, TC es el Tiempo de carga, TM es el Tiempo de movimiento entre carga, TVCSL es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, TVCSC es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, TD es el Tiempo de Descarga.	22
Figura 6. Tiempos promedio de las actividades de extracción comparando el origen de los datos (datos empíricos vs. simulaciones), el tamaño del <i>forwarder</i> (mediano vs. grande) y el volumen inicial a extraer (bajo vs. alto). Donde: TVVSC es el Tiempo de viaje sobre el camino, TVVSL es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, TC es el Tiempo de carga, TM es el Tiempo de movimiento entre carga, TVCSL es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, TVCSC es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, TD es el Tiempo de Descarga.	24

RESUMEN

A lo largo de los años, las máquinas forestales han aumentado de tamaño, se han vuelto más productivas y, sobre todo, más tecnológicas. Este avance conllevó también un incremento en su valor de compra. La correcta elección de la maquinaria de extracción es determinante, ya que existen *forwarders* de entre 10 y 20 toneladas de carga útil, cuyos rendimientos y costos dependen principalmente del volumen de producción, la distancia de extracción y la carga por viaje. El objetivo de este proyecto fue desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos (SED) que permitiera evaluar el impacto del tamaño de los *forwarders* sobre la productividad efectiva y la distancia óptima de extracción. Se analizaron *forwarders* de 15, 17, 18 y 20 toneladas de carga útil. Este modelo demostró ser una herramienta útil para la planificación del abastecimiento de las industrias que consumen biomasa forestal. Para ello, se unificaron bases de datos de tomas de tiempo en campo y se obtuvieron valores promedio, máximo, mínimo y desvíos estándar, entre otros. Se clasificaron los *forwarders* de 15-18 toneladas como medianos y los de 20 toneladas como grandes. Las productividades efectivas fueron de $40,9 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$ con distancias de extracción de 186,2 m para los *forwarders* medianos y $53,32 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$ con distancias de 188,12 m para los grandes, resultados provenientes de mediciones empíricas. Se desarrollaron modelos lineales parciales para los tiempos de las actividades inherentes al ciclo de extracción de madera, los cuales fueron utilizados para generar las SED. Estas simulaciones se ejecutaron en 100 repeticiones y se compararon con datos empíricos, mostrando una correlación significativa. Las simulaciones demostraron que los *forwarders* de 20 toneladas fueron más productivos que los de 15-18 toneladas. Además, se evidenció que los mayores tiempos en el ciclo operacional correspondieron a las fases de carga y descarga, ocupando ambos aproximadamente el 60% del tiempo total de actividad.

Palabras clave: cosecha forestal, productividad, abastecimiento, programación, pino.

SUMMARY

Over the years, forestry machines have increased in size, become more productive, and, above all, more technological. This progress has also led to an increase in their purchase value. The correct choice of extraction machinery is crucial, as there are forwarders with payloads ranging from 10 to 20 tons, whose yields and costs mainly depend on the production volume, extraction distance, and load per trip. The objective of this project was to develop a discrete event simulation (DES) model to evaluate the impact of forwarder size on effective productivity and optimal extraction distance. Forwarders with payloads of 15, 17, 18, and 20 tons were analyzed. This model proved to be a useful tool for planning the supply of industries that consume forest biomass. For this purpose, databases of field time measurements were unified, and values for average, maximum, minimum, standard deviation values and other metrics, were obtained. Forwarders with payloads of 15-18 tons were classified as medium-sized, while those with payloads of 20 tons were classified as large. The effective productivities were 40,9 m³ hour⁻¹ at extraction distances of 186,2 m for medium-sized forwarders and 53,32 m³ hour⁻¹ at extraction distances of 188,12 m for large forwarders, results obtained from empirical measurements. Partial linear models were developed for the duration of the activities inherent to the wood extraction cycle, which were used to generate the DES. These simulations were run 100 times and compared with empirical data, showing significant correlation. The simulations demonstrated that 20-ton forwarders were more productive than 15-18 ton forwarders. Additionally, it was evident that the longest times in the operational cycle corresponded to the loading and unloading phases, both occupying approximately 60% of the total activity time.

Key words: forest harvesting, yield, supply, programming, pine.

1. INTRODUCCIÓN

En Argentina, en las provincias de Misiones y Corrientes, el sistema de cosecha de madera más utilizado es el corte a medida (*Cut-to-length*), que se realiza con la ayuda de máquinas forestales como el cosechador forestal (harvester) y el tractor forestal autocargable (*forwarder*) (HILDT *et al.*, 2020). Estos últimos han evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de tener una capacidad de carga de 10 toneladas hace 20 años, a 15-16 toneladas hace 10 años, y alcanzando actualmente capacidades de carga de 18-20 toneladas. Los rendimientos de la cosecha varían según la capacidad de carga de los equipos y las distancias óptimas de extracción (DOE), con rendimientos de hasta $12 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$ para *forwarders* de 10 toneladas y DOE de aproximadamente 100 metros, hasta $35 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$ para equipos de 15-16 toneladas y DOE de hasta 200 metros, y rendimientos superiores a $50 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$ en distancias mayores a 200 metros para equipos de 20 toneladas de carga (NORDFJELL *et al.*, 2019).

Los modelos de simulación son herramientas que permiten evaluar alternativas y tomar decisiones sobre la productividad y los costos de cosecha sin aplicarlos a sistemas reales, lo que representa menos costos y riesgos (ACKERMAN *et al.*, 2016; LESZCZUK *et al.*, 2017 a y b), emplearon un modelo de simulación estática para analizar la respuesta de un sistema de cosecha al efecto de las características del bosque, el número de máquinas y las horas trabajadas. Sin embargo, este enfoque no contempló el efecto del número de productos elaborados sobre los ciclos de extracción del *forwarder*, y no tuvo en cuenta la ocurrencia de demoras (roturas, lluvias, cambios en la planificación) que impactan en el flujo de madera entre las actividades, sobreestimando la productividad y subestimando el costo de cosecha (ASIKAINEN, 2010).

Debido a que las operaciones en cosecha implican el manejo de productos a través de varias actividades interrelacionadas, la simulación de eventos discretos (SED) es una herramienta que permite construir modelos con mejores resultados que los modelos estáticos basados en planillas de cálculo (ASIKAINEN, 2010), pues se toman en cuenta las actividades que conforman el sistema bajo estudio y agregan el factor de aleatoriedad a la simulación. Esta técnica se empleó para analizar sistemas *cut-to-length* en plantaciones de roble (WANG *et al.*, 2005), los procesos de desrame y trozado en sistemas *full-tree* (HOGG *et al.*, 2010), en sistemas de cosecha, transporte, desrame y trozado *full-tree* (SHE *et al.*, 2018), o analizando relaciones entre el proceso y transporte del aprovechamiento de tocones para bioenergía (ASIKAINEN, 2010).

Esta metodología proporciona una herramienta para generar simulaciones de indicadores de interés que se comparan con valores empíricos, permitiendo explorar escenarios y evaluar su impacto potencial en la toma de decisiones. Al combinar simulaciones y valores empíricos, se

obtiene una comprensión fundamentada que respalda una toma de decisiones fundamentada y basada en evidencias.

La SED permitió evaluar el impacto del tamaño del *forwarder* y de la carga útil, la distancia de extracción y los tipos de productos sobre el rendimiento de *forwarders* de 15, 17, 18 y 20 t. Este enfoque se fundamenta en antecedentes que han demostrado la utilidad de evaluar el desempeño de camiones forestales, considerando principalmente su carga útil (VÄÄTÄINEN *et al.*, 2020).

2. HIPÓTESIS

Las simulaciones de eventos discretos otorgarán resultados confiables permitiendo evaluar las productividades de *forwarders* de diferentes tamaños, demostrando que los de 20 t tienen rendimientos significativamente mayores que los de 15-18 t.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de simulación de eventos discretos (SED) para predecir productividades de *forwarders* de distintos tamaños basándose en las variables de los eventos identificados con sus respectivas distribuciones de probabilidad.

3.2. Objetivos específicos.

- Determinar los tiempos de las actividades individuales y de los volúmenes de carga por ciclo de *forwarders* de diferentes volúmenes de carga útil.
- Desarrollar modelos lineales de tiempos para grupos de *forwarders* de volúmenes de carga similares, evaluando el tiempo requerido por actividad y el volumen de carga.
- Aplicar la SED para calcular las productividades efectivas, utilizando las variables de los diferentes eventos simulados y sus respectivos parámetros operacionales.
- Comparar los resultados obtenidos mediante simulación con los datos empíricos.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología se compuso de tres etapas: a) composición de una base de datos unificada con *forwarders* de 15, 17, 18 y 20 t de carga, b) generación de modelos lineales de tiempos y distribuciones probabilísticas, de las actividades por ciclo, en grupos de *forwarders* con rendimientos estadísticamente similares; y c) simulación de eventos discretos (SED) para evaluar el impacto del tamaño de los *forwarders* en el abastecimiento.

4.1. Composición de la base de datos unificada

Mediante la combinación de datos de *forwarders* de 15 - 18 t obtenidos por HILDT *et al.* (2020) más mediciones de campo realizadas en *forwarders* de 20 t, empleando la metodología de toma de tiempos continuos desarrollada por HILDT *et al.* (2016), se procedió a la confección de una base de datos unificada. En esta base de datos se incluyen diversas variables, tales como el recuento de ciclos ejecutados, la cantidad de trozas transportadas por ciclo, el volumen individual por troza, las distancias abarcadas durante los traslados con y sin carga, tanto sobre caminos como dentro del lote, y las distancias donde el *forwarder* se estuvo cargando. Utilizando la base de datos antes mencionada, se procedió al cálculo del volumen total de carga por ciclo, la determinación del tiempo total invertido por ciclo, la evaluación de los rendimientos obtenidos y las distancias de extracción de los *forwarders*.

Para el análisis, los *forwarders* de 15, 17 y 18 toneladas se agruparon en la categoría de *forwarders* medianos, mientras que los de 20 toneladas se clasificaron como *forwarders* grandes. Se aplicó una prueba de Tukey para comparar ambos grupos en función de la productividad efectiva y la distancia de extracción, con el propósito de identificar diferencias estadísticamente significativas que justifiquen la clasificación propuesta.

El análisis estadístico propuesto fue un diseño unifactorial, siendo el factor tamaño del equipo: *forwarders* de 15, 17, 18 y 20 t de carga total. El modelo estadístico general sería el indicado en la Ecuación 1:

$$Y = \mu + \alpha + error \quad (1)$$

Donde: Y es la duración de una actividad (s), μ es la media general del modelo, α es el efecto del factor tipo de máquina.

La duración total del ciclo fue estimada como la suma de los tiempos insumidos en las distintas actividades parciales a través de la Ecuación 2. La productividad efectiva en cada ciclo fue estimada como el cociente entre el volumen transportado y el tiempo total insumido, esto

mediante la Ecuación 3. Por su parte, la distancia de extracción para cada ciclo se estimó utilizando la Ecuación 4.

$$TTC[s] = TVVSC + TVVSL + TC + TM + TVCSL + TVCSC + TD \quad (2)$$

$$PEF [m^3 * h. ef^{-1}] = VOL[m^3] * 3600[s * h^{-1}] * TTC^{-1}[s] \quad (3)$$

$$DE[m] = (DVVSC + DVVSL + DVCSL + DVCSC + 2 * DM) / 4 \quad (4)$$

Donde TTC es el tiempo total de ciclo, TVVSC es el tiempo de viaje vacío sobre el camino, TVVSL es el tiempo de viaje vacío sobre el lote, TC es el tiempo de carga, TM es el tiempo de movimiento entre cargas, TVCSL es el tiempo de viaje cargado sobre el lote, TVCSC es el tiempo de viaje cargado sobre el camino, TD es el tiempo de descarga, PEF es la productividad efectiva, VOL es el volumen transportado del *forwarder*, DE es la distancia de extracción, DVVSC es la distancia de viaje vacío sobre el camino, DVVSL es la distancia de viaje vacío sobre el lote, DVCSL es la distancia de viaje cargado sobre el lote, DVCSC es la distancia de viaje cargado sobre el camino y DM es la distancia de movimiento entre carga.

Como referencia para la extracción de biomasa con *forwarder* se emplearon modelos descriptos por PETTY y KÄRHÄ (2014).

4.2. Generación de modelos lineales de las actividades por ciclo

Los *forwarders* estudiados fueron categorizados en dos grupos, considerando el volumen total de carga y basándose en la premisa de que aquellos incluidos en cada grupo exhiben niveles de productividad estadísticamente similares. Los grupos resultantes fueron identificados como *forwarders* medianos, englobando a los de 15, 17 y 18 t de carga útil, y *forwarders* grandes, integrados exclusivamente por aquellos de 20 t de carga útil. Para realizar los estudios estadísticos se utilizó el *software* InfoStat en su versión estudiantil.

Para cada actividad del ciclo operacional se ajustó un modelo particular de tiempos, evaluando el efecto de los factores que conforman el experimento junto a otras variables que caracterizan a cada ciclo operacional. Estas actividades fueron analizadas por medio del ajuste de modelos lineales, relacionando el tiempo que requiere una actividad para ser realizada con los factores principales que mejor ajustan el modelo lineal. Los modelos ajustados fueron evaluados utilizando el coeficiente de determinación R², que mide la proporción de la variabilidad en la variable dependiente explicada por las variables independientes. Un mayor valor de R² indica un mejor ajuste del modelo, lo que significa que es más efectivo para predecir los resultados

observados. Por lo tanto, los modelos seleccionados fueron aquellos con los valores de R^2 más altos, reflejando una mayor capacidad predictiva.

A su vez, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r), que es una medida estadística que evalúa la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables continuas, con valores que varían entre -1 y 1. Un valor de $r = 1$ indica una correlación positiva perfecta, $r = -1$ una correlación negativa perfecta, y $r = 0$ sugiere la ausencia de relación lineal. En este estudio, se utilizó el coeficiente de Pearson para analizar la relación entre los valores observados y los valores predichos por el modelo, calculándose mediante la fórmula estándar que compara las desviaciones de las variables respecto a sus medias. Este análisis se realizó utilizando el *software* estadístico R.

4.3. Desarrollo de la simulación de eventos discretos

Se realizó una SED para comparar el impacto del tamaño del *forwarder* según su carga útil en los rendimientos de *forwarders* de 15, 17, 18 y 20 t. El *software* utilizado para crear la simulación fue el *Rockwell Arena* en su versión 16.20.00 estudiantil.

Se tuvieron en cuenta dos situaciones de extracción para cada tipo de *forwarder*: a) una situación en donde el rodal presenta un volumen inicial bajo de madera a extraer, de 305,92 t, y b) una situación donde el volumen inicial alto de madera a extraer, de 4461,37 t. Estos valores fueron obtenidos del volumen promedio del tercio superior e inferior de plantaciones forestales de *Pinus taeda* L. de la Cooperativa Agrícola Mixta Montecarlo (CAMM).

El modelo de simulación desarrollado se compone de las actividades que acontecen en el ciclo de extracción: viaje vacío sobre el camino, viaje vacío sobre el lote, carga de rollos, movimiento entre cargas, viaje cargado sobre el lote, viaje cargado sobre el camino y descarga de rollos. Dentro de cada una de las actividades se estimaron, con la herramienta *Imput Analyzer* que incorpora el *software*, las distribuciones de probabilidad de los valores de las variables inherentes pertenecientes a cada una: distancia de viaje vacío sobre el camino, distancia de viaje vacío sobre el lote, volumen individual de trozas, volumen total de carga para ese ciclo, concentración de trozas, distancia de movimiento entre cargas, distancia de viaje cargado sobre el lote y distancia de viaje cargado sobre el camino.

La evaluación del ajuste se realizó a través de la prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrado, clasificando todas las distribuciones propuestas de acuerdo con sus p-valores, de mayor a menor. Un p-valor que superara 0,05 indicaba un ajuste adecuado, permitiendo que la distribución se incorporara en el modelo de simulación.

Para el caso del volumen individual de trozas se tuvieron en cuenta, tres tipos de productos: pulpable, aserrable y laminable. De estos se observaron el volumen de cada uno de ellos y su

relación porcentual, procesándolos de igual manera que las demás variables y ajustando un modelo de distribución de probabilidad para cada uno.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el entorno de la herramienta *Imput Analyzer* del Arena donde se puede apreciar el ajuste de una de las variables a la mejor distribución de probabilidad, en este caso la distancia de viaje vacío sobre el lote (DVVSL).

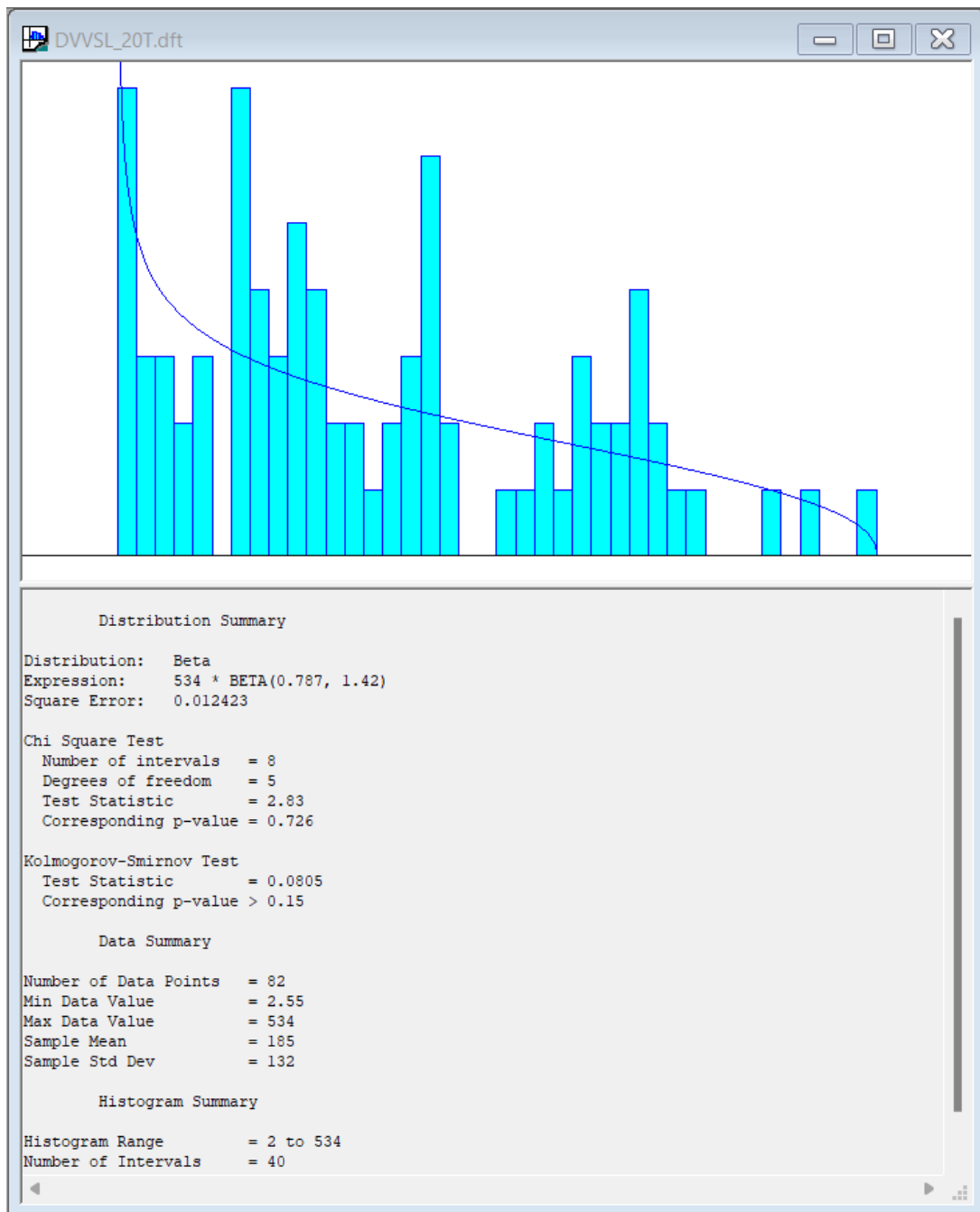


Figura 1. Entorno de la herramienta *Imput Analyzer*.

De esta forma se construyeron bloques que representan a cada una de las actividades y que, en base a las distribuciones de probabilidad de las variables que ocupan cada una, otorgan el tiempo consumido para dicha actividad.

Se realizaron 100 repeticiones de la simulación y se obtuvo una base de datos en formato de hoja de cálculo con los datos promedio de las actividades en todas las repeticiones. De manera simultánea, se calcularon y recolectaron las productividades de los *forwarders* para cada ciclo y cada repetición, así como las estimaciones de las variables de cada una de las actividades.

Estos valores fueron contrastados con los valores empíricos obtenidos en la base de datos unificada a través de una prueba de Welch de comparaciones de medias que se realizaron de a pares. Esta prueba es apropiada para comparar las medias de dos grupos independientes con varianzas desiguales. La elección de este método se justifica por el hecho de que los datos proporcionados por el *software* corresponden únicamente a los promedios de las diversas variables y tiempos analizados, lo que limita la posibilidad de realizar un análisis detallado de cada uno de los valores individuales.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Composición de la base de datos unificada

Una vez combinadas todas las bases de datos se obtuvo una base de datos unificada, la cual permitió obtener valores promedio de las siguientes variables: tiempos efectivos, productividad, rendimientos, volúmenes totales de carga y distancias de extracción. Los *forwarders* estudiados con sus respectivas marcas y modelos, cargas útiles, número de ciclos observados y grupo de *forwarder* se presentan en la

Tabla 1.

Tabla 1. *Forwarders* estudiados.

Marca y modelo	Carga útil [t]	N° Ciclos	Grupo de <i>forwarder</i>
John Deere 1510 E	15	70	Mediano
John Deere 1710 D	17	23	Mediano
Ponsse Buffalo King	18	18	Mediano
Ponsse Elephant King	20	31	Grande
John Deere 1910 G	20	51	Grande

Los valores de productividad efectiva media y distancia de extracción media analizados para cada grupo de *forwarder* se presentan en la Tabla 2, así como sus respectivos desvíos estándares. También se indica el número de ciclos observados para cada grupo.

Tabla 2. Diferencia de medias (Tukey) de *forwarders* medianos y grandes provenientes de datos empíricos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Grupo de <i>forwarder</i>	PEF media [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	DE media [m]	Número de ciclos
Mediano	$40,9 \pm 16,69^a$	$186,2 \pm 128,91^a$	108
Grande	$53,32 \pm 17,28^b$	$188,12 \pm 91,21^a$	82

Se evidencia que, según el test de Tukey, los *forwarders* grandes tienen productividades efectivas significativamente mayores, con $53,32 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y un desvío estándar de $17,28 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, por otro lado, no se observan diferencias significativas entre las distancias de extracción.

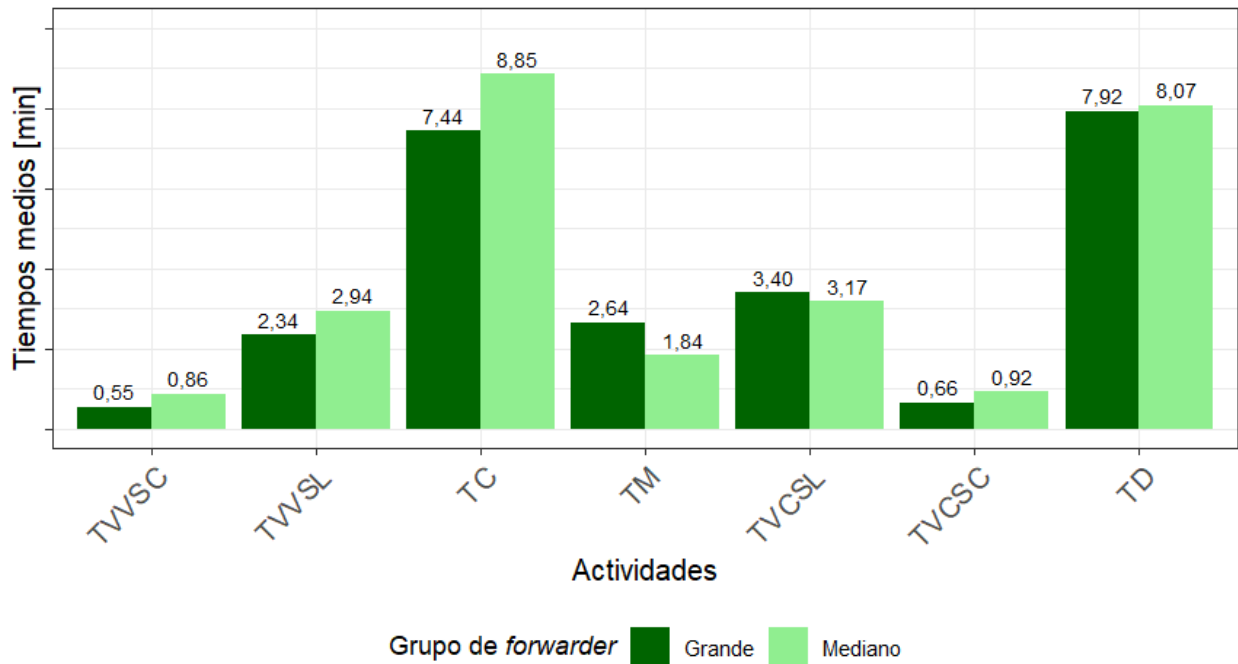


Figura 2. Tiempos promedio de las actividades del ciclo de los *forwarders*. Donde: **TVVSC** es el Tiempo de viaje sobre el camino, **TVVSL** es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, **TC** es el Tiempo de carga, **TM** es el Tiempo de movimiento entre carga, **TVCSL** es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, **TVCSC** es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, **TD** es el Tiempo de Descarga.

En la Figura 2 se presentan los tiempos de las diferentes actividades que se evaluaron en los datos empíricos durante el ciclo de extracción de madera, comparados entre los grupos de *forwarders*.

Se observa que los mayores tiempos operativos corresponden a las actividades de carga y descarga, alcanzando un 29,8% y un 31,8% respectivamente en los *forwarders* grandes, y un 33,2% y un 30,3% en los *forwarders* medianos. Considerando la suma de ambas operaciones, el tiempo total consumido representa aproximadamente el 60% del tiempo operativo global.

5.2. Determinación de los modelos lineales

En base a esta clasificación se obtuvieron los modelos lineales de cada una de las actividades que implica la actividad de extracción, representados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 3. Modelos lineales de las actividades de extracción de *forwarders* con su respectivo ajuste y el número de ciclos para cada caso.

Grupo de <i>forwarder</i>	Modelo lineal ajustado	Nivel de ajuste (R^2)	Coefficiente de correlación de Pearson	Número de ciclos
Grandes	$TVVSC = DVVSC \times 0,796$	0,8822	0,8278	82
	$TVVSL = DVVSL \times 0,7349$	0,9811	0,9727	
	$TC = EP(2,5382 - 0,4385 \times LN(VI) + 0,8521 \times LN(VT) - 0,1253 \times LN(CT))$	0,7879	0,7455	
	$TM = DM \times 1,2273$	0,9474	0,9329	
	$TVCSL = DVCSC \times 0,8249$	0,9704	0,9495	
	$TVCSC = DVCSC \times 0,8761$	0,885	0,7326	
	$TD = EP(3,4647 - 0,3111 \times LN(VI) + 0,7089 \times LN(VT))$	0,6662	0,6477	
Medianos	$TVVSC = DVVSC \times 0,7313$	0,9111	0,9176	108
	$TVVSL = DVVSL \times 0,5644$	0,8479	0,8405	
	$TC = EP(2,738 - 0,5221 \times LN(VI) + 0,8396 \times LN(VT) - 0,0507 \times LN(CT))$	0,7895	0,8648	
	$TM = EP(1,2069 + 0,864 \times LN(VT) - 0,1792 \times LN(VI) - 0,6177 \times LN(CT))$	0,7578	0,7112	
	$TVCSL = TVCSL \times 0,6163$	0,8351	0,7950	
	$TVCSC = TVCSC \times 0,8881$	0,9315	0,9289	
	$TD = EP(3,0698 - 0,3542 \times LN(VI) + 0,823 \times LN(VT))$	0,6248	0,7753	

Donde: **TVVSC** es el Tiempo de viaje sobre el camino, **TVVSL** es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, **TC** es el Tiempo de carga, **TM** es el Tiempo de movimiento entre carga, **TVCSL** es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, **TVCSC** es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, **TD** es el Tiempo de Descarga, **DVVSC** es la Distancia de viaje vacío sobre el camino, **DVVSL** es la distancia de viaje vacío sobre el lote, **DVCSL** es la Distancia de viaje cargado sobre el lote, **DVCSC** es la Distancia de viaje cargado sobre el camino, **VI** es el Volumen Individual de trozas, **VT** es el Volumen Total de Carga y **CT** es la Concentración de trozas.

Se aprecia que todos los modelos tienen un buen ajuste, con valores de R^2 de entre 0,6248 en el tiempo de descarga de los *forwarders* medianos hasta 0,9811 en el tiempo de viaje vacío sobre el lote en los *forwarders* grandes. Esto asegura que los modelos sean confiables al momento de la simulación. Además, se observa que los coeficientes de Pearson son todos mayores a 0,5, lo que representa una correlación positiva, además de seguir la tendencia del ajuste R^2 .

5.3. Modelización de la Simulación de Eventos Discretos

Los ajustes de las diferentes variables que permiten modelizar las simulaciones se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 4. Distribuciones de probabilidad ajustadas para cada variable dentro de la extracción de madera con cada grupo de *forwarder*.

Actividad	<i>Forwarders grandes</i>		<i>Forwarders medianos</i>	
	Distribución de probabilidad	p-valor	Distribución de probabilidad	p-valor
DVVSC	WEIB(42,2, 1,33)	0,0741	$399 \times \text{BETA}(0,508, 2,39)$	0,308
DVVSL	$534 \times \text{BETA}(0,787, 1,42)$	0,726	WEIB(250, 1,03)	0,521
VT	$33 \times \text{BETA}(2,67, 1,59)$	0,275	TRIA(3, 19,6, 28)	0,336
CT	LOGN(0.313, 0.323)	0,292	LOGN(1,07, 2,28)	0,221
DVCSL	$562 \times \text{BETA}(0,921, 1,21)$	0,11	WEIB(255, 1,01)	0,132
DVCSC	$113 \times \text{BETA}(1,1, 2,09)$	0,114	EXPO(55,6)	0,483

Donde: **DVVSC** es la Distancia de viaje vacío sobre el camino, **DVVSL** es la Distancia de viaje vacío sobre el lote, **VT** es el Volumen total de carga, **CT** es la Concentración de trozas, **DVCSL** es la Distancia de viaje cargado sobre el lote y **DVCSC** es la Distancia de viaje cargado sobre el camino.

Como se puede observar, todas las distribuciones de probabilidad establecidas por actividad cumplen con la premisa de tener un p-valor mayor a 0,05, por lo que indica un ajuste adecuado y permitiendo que la distribución se incorporara en el modelo de simulación.

Para el caso de la variable Volumen individual de troza se establecieron tres tipos de productos, y para cada uno de ellos se establecieron distribuciones de probabilidad ajustadas a un p-valor mayor a 0,15; también se determinaron los porcentajes de representatividad para cada uno (Tabla 5). Este análisis se aplicó globalmente para todos los *forwarders* en todos los escenarios simulados.

Tabla 5. Distribuciones ajustadas para la variable volumen individual de troza.

Productos	Distribución de probabilidad	p-valor	Relación
Volumen pulpable	TRIA(0.04, 0.0653, 0.07)	> 0,15	25%
Volumen aserrable	TRIA(0.06, 0.2, 0.34)	> 0,15	56%
Volumen laminable	UNIF(0.28, 0.56)	> 0,15	19%

En la Figura 3 se presenta el *layout* resultante de la simulación en sí, este es el recorrido que realiza el *forwarder* a lo largo de los ciclos y teniendo en cuenta el grupo de *forwarder* y el volumen inicial de madera a extraer.

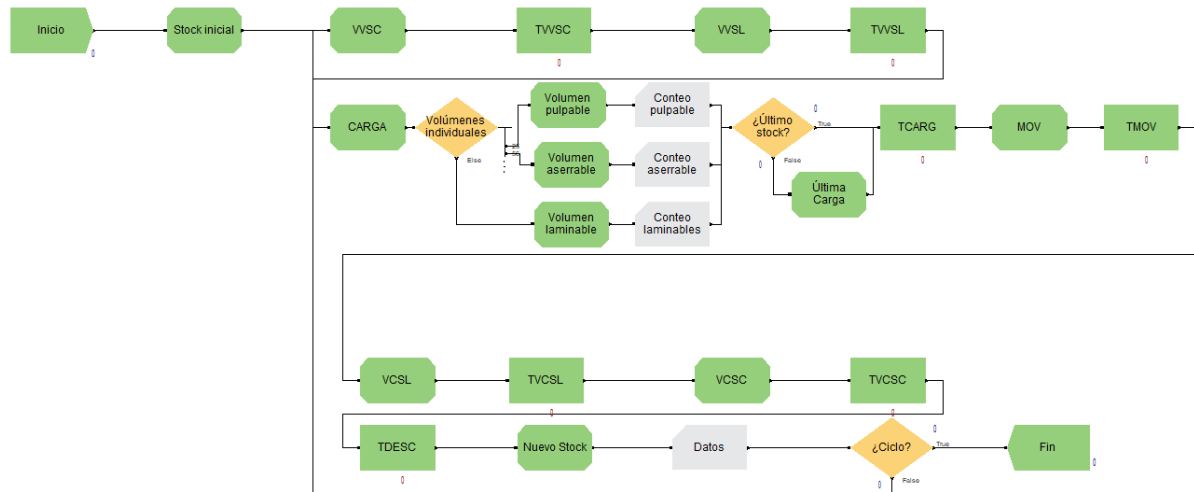


Figura 3. *Layout* de la simulación.

En el mismo, se observa cómo se establece el volumen de stock inicial a extraer y de allí se generan las variables de cada una de las actividades en cuestión, discriminando por tipo de producto y obteniendo los datos de los ciclos del *forwarder*. Se repitió el proceso para ambos grupos de *forwarder* y se obtuvo una base de datos simulada, la cual se contrastó con los datos empíricos.

5.4. Resultados de las simulaciones

En la Tabla 6 se presentan los valores de productividad efectiva media y distancia de extracción media procesados de los valores obtenidos de las simulaciones. El análisis realizado permitió evaluar las diferencias significativas en las medias de la productividad efectiva (PEF) y la distancia de extracción (DE) entre *forwarders* medianos y grandes, utilizando una prueba t de Welch.

Tabla 6. Comparación de medias (Welch) de la productividad efectiva, la distancia de extracción y número de ciclos de *forwarders* medianos y grandes provenientes de las simulaciones. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Grupo de <i>forwarder</i>	PEF media [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	DE media [m]	Número de ciclos
Mediano	42,23 \pm 12,25 ^a	200,18 \pm 110,29 ^a	100
Grande	47,88 \pm 14,38 ^b	197,86 \pm 82,63 ^a	100

Se aprecia que existen diferencias significativas respecto a la PEF, donde los *forwarders* medianos son más productivos según en test de Welch. Y a su vez, no se presentan diferencias significativas en las DE entre ambos grupos.

Los tiempos medios de las actividades en el ciclo de extracción se presentan en la Figura 4, donde se diferencia el grupo de tamaño de *forwarder*.

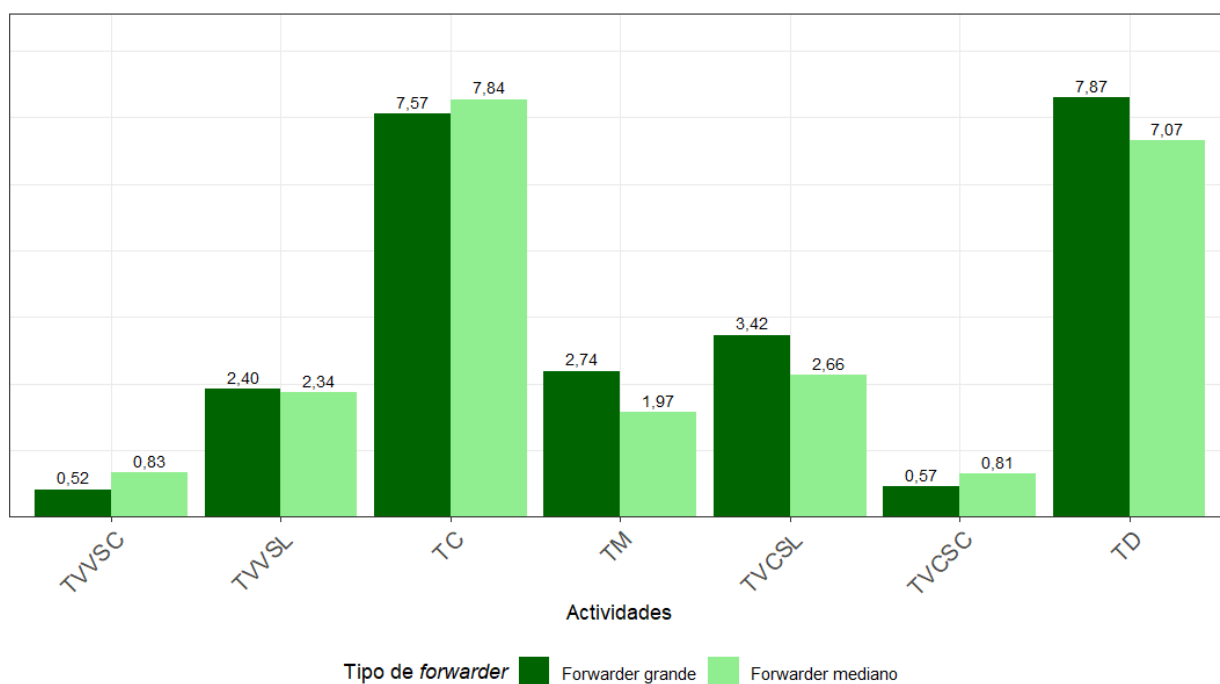


Figura 4. Tiempos promedio de las actividades de los *forwarders* en las simulaciones. Donde: **TVVSC** es el Tiempo de viaje sobre el camino, **TVVSL** es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, **TC** es el Tiempo de carga, **TM** es el Tiempo de movimiento entre carga, **TVCSL** es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, **TVCSC** es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, **TD** es el Tiempo de Descarga.

En el gráfico, se observa que las actividades de tiempo de carga (TC) y tiempo de descarga (TD) son las que requieren más tiempo operativo tanto en *forwarders* grandes como medianos. Para los *forwarders* grandes, el TC promedio es de 7,57 minutos, representando el 29,3% del total,

mientras que el TD promedio alcanza 7,87 minutos, lo cual representa el 30,5% del total del ciclo. En los *forwarders* medianos, el TC tiene un tiempo promedio de 7,84 minutos (aproximadamente 30,6%) y el TD 7,07 minutos (27,6%). En conjunto, estas dos actividades representan alrededor del 59,8% del tiempo total para *forwarders* grandes y el 58,2% para los medianos.

En la Tabla 7, se comparan las medias de productividad efectiva ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) y distancia de extracción (m) entre diferentes combinaciones de volumen inicial a extraer (Alto y Bajo) y tamaño de *forwarder* (Mediano y Grande). El análisis estadístico utilizado fue la prueba t de Welch.

Tabla 7. Comparación de medias (Welch) de la Productividad efectiva, la Distancia de extracción y número de ciclos de *forwarders* medianos y grandes provenientes de las simulaciones, teniendo en cuenta el volumen inicial de madera a extraer. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Volumen inicial a extraer	Grupo de <i>forwarder</i>	PEF media [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	DE media [m]	Número de ciclos
Alto	Mediano	42,57 ± 13,08 ^a	199,37 ± 121,44 ^a	100
Alto	Grande	48,49 ± 15,79 ^b	198,70 ± 91,16 ^a	100
Bajo	Mediano	41,88 ± 11,42 ^a	200,99 ± 99,14 ^a	100
Bajo	Grande	47,26 ± 12,96 ^b	197,02 ± 74,10 ^a	100

Para la productividad efectiva, los resultados muestran que las medias comparadas entre los *forwarders* grandes y medianos son significativamente diferentes, independientemente del volumen alto o bajo a extraer; esto sugiere que el grupo de *forwarder* es el único factor que determina diferencias. En cuanto a la distancia de extracción, no se observaron diferencias significativas entre las combinaciones de tamaño de *forwarder* y volumen inicial a extraer, lo que indica que el tamaño del *forwarder* no afecta las distancias de extracción.

En la Figura 5 se ilustran los tiempos promedio de las actividades de extracción, teniendo en cuenta los volúmenes iniciales de extracción y el tamaño de los *forwarders*.

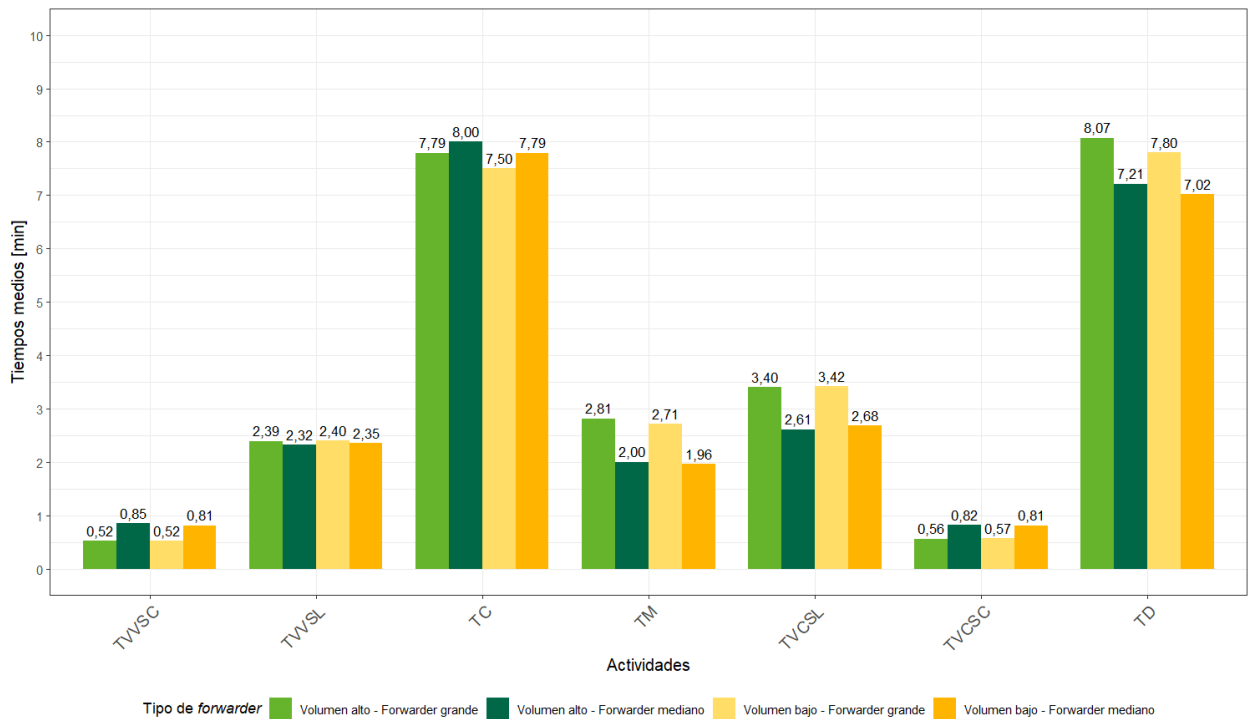


Figura 5. Tiempos promedio de las actividades de los *forwarders* en las simulaciones teniendo en cuenta los volúmenes iniciales de extracción. Donde: **TVVSC** es el Tiempo de viaje sobre el camino, **TVVSL** es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, **TC** es el Tiempo de carga, **TM** es el Tiempo de movimiento entre carga, **TVCSL** es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, **TVCSC** es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, **TD** es el Tiempo de Descarga.

En el análisis presentado, se observa que los tiempos de carga (TC) y descarga (TD) son los más elevados, independientemente de la situación estudiada. Se destaca que, generalmente, los tiempos de carga de los *forwarders* medianos son mayores que los de los *forwarders* grandes, sin importar el volumen inicial a extraer. En contraste, los tiempos de descarga fueron superiores en los *forwarders* grandes en comparación con los medianos.

5.5. Comparaciones entre datos empíricos y simulaciones

En la Tabla 8 se presentan los valores compilados entre el análisis de los valores empíricos y las simulaciones efectuadas.

Tabla 8. Comparación de medias (Welch) de la Productividad efectiva, la Distancia de extracción y número de ciclos de *forwarders* medianos y grandes según el origen de datos, volumen inicial a extraer y el grupo de *forwarder*. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Origen de dato	Volumen inicial a extraer	Grupo de <i>forwarder</i>	PEF media [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	DE media [m]	Número de ciclos
Empírico	-	Mediano	$40,90 \pm 16,69^a$	$186,20 \pm 128,9^a$	108
Empírico	-	Grande	$53,32 \pm 17,28^b$	$188,12 \pm 91,20^a$	82
Simulación	Alto	Mediano	$42,57 \pm 13,08^a$	$199,37 \pm 121,44^a$	100
Simulación	Alto	Grande	$48,49 \pm 15,79^b$	$198,70 \pm 91,16^a$	100
Simulación	Bajo	Mediano	$41,88 \pm 11,42^a$	$200,99 \pm 99,14^a$	100
Simulación	Bajo	Grande	$47,26 \pm 12,96^b$	$197,02 \pm 74,10^a$	100

Al analizar los resultados obtenidos de las comparaciones entre los datos empíricos y las simulaciones, se observa una clara tendencia en la que las diferencias en la productividad efectiva (PEF) se muestran significativamente más marcadas cuando se compara el *forwarder* grande con el mediano. Este patrón se mantiene constante independientemente de si los datos provienen de mediciones empíricas o de simulaciones, así como si se consideran volúmenes iniciales de extracción altos o bajos. La PEF media sobre todos los escenarios de las simulaciones fue de $45,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, un valor que se asemeja a estudios realizados por GAGLIARDI *et al.* (2020) donde se obtuvo un valor medio de $45,85 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Por otro lado, al evaluar las distancias de extracción (DE), no se observan diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tipos de *forwarder* (mediano vs. grande), el origen de los datos (empíricos vs. simulados) o los volúmenes iniciales de extracción. El promedio de las simulaciones fue de $199,02 \text{ m}$, valor que se asemeja al valor obtenido por HILDT *et al.* (2020) con $227,3 \text{ m}$ para *forwarders* de 15 toneladas. Las comparaciones de medias se realizan de a pares.

En la Figura 6 se presentan los tiempos de las actividades teniendo el origen de los datos, el tamaño de los *forwarders* y el volumen inicial a extraer (en simulaciones).

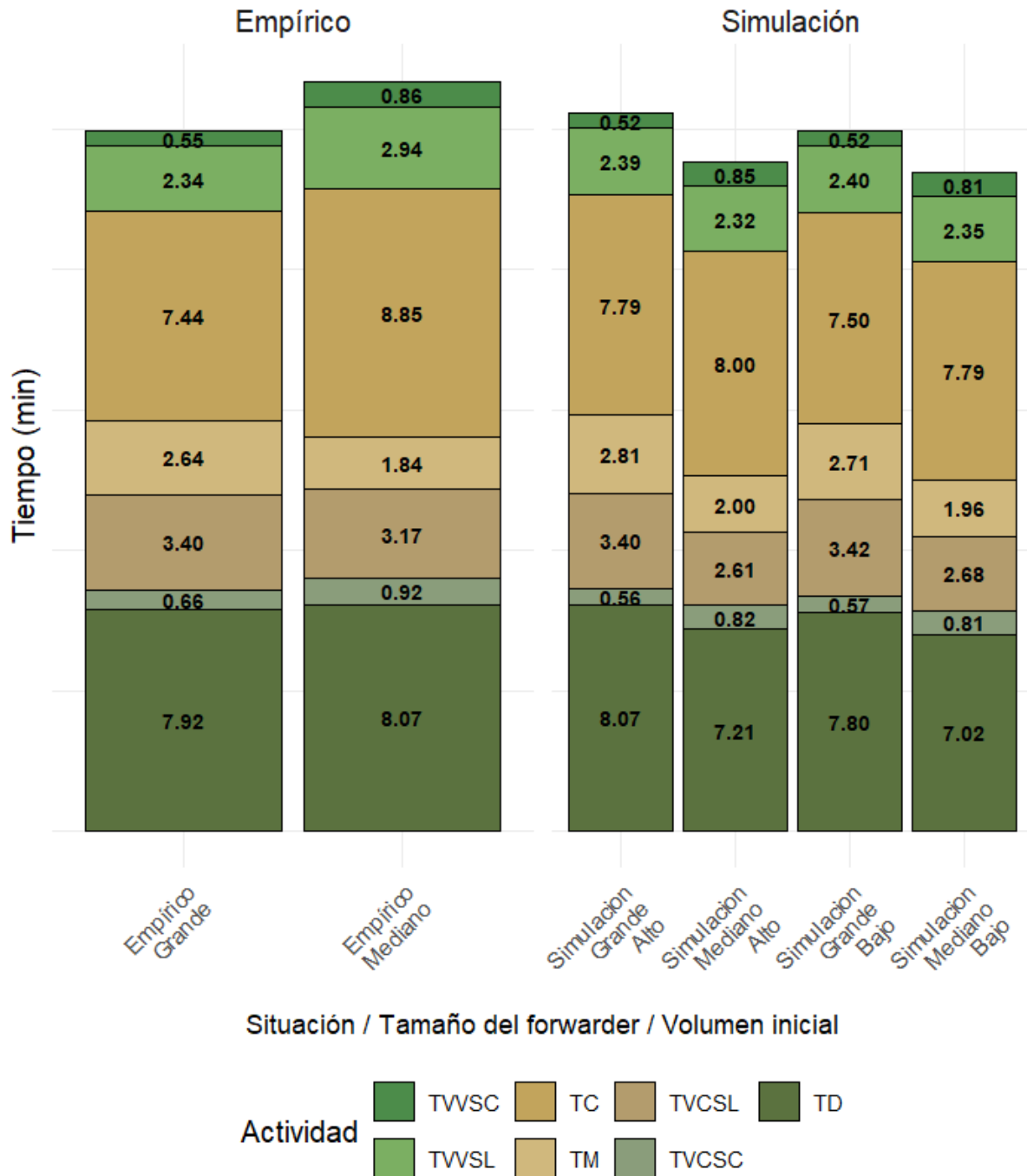


Figura 6. Tiempos promedio de las actividades de extracción comparando el origen de los datos (datos empíricos vs. simulaciones), el tamaño del *forwarder* (mediano vs. grande) y el volumen inicial a extraer (bajo vs. alto). Donde: **TVVSC** es el Tiempo de viaje sobre el camino, **TVVSL** es el Tiempo de viaje vacío sobre el lote, **TC** es el Tiempo de carga, **TM** es el Tiempo de movimiento entre carga, **TVCSL** es el Tiempo de viaje cargado sobre el lote, **TVCSC** es el Tiempo de viaje cargado sobre el camino, **TD** es el Tiempo de Descarga.

Se observa que, tanto en los datos empíricos como en las simulaciones, los valores de los tiempos son similares y siguen la misma tendencia, especialmente en lo que respecta a los mayores tiempos de operación, que se concentran en las fases de carga y descarga de los *forwarders*.

El tiempo de carga (TC) es la actividad que más tiempo consume, representando en conjunto el 32% del tiempo total de ciclo (TTC). En los *forwarders* medianos, los datos empíricos registran un TC de 8,85 minutos, equivalente al 33,2% del TTC, y los grandes un TC de 7,44 minutos, un 29,8% del TTC. En simulaciones con *forwarders* medianos, el TC es de 8,00 minutos para volúmenes altos y a 7,79 minutos para volúmenes bajos. En los *forwarders* grandes los valores son de 7,79 y 7,50 minutos, respectivamente para volúmenes altos y bajos.

El tiempo de descarga (TD), la segunda actividad más prolongada, representando el 31% del TTC. Para datos empíricos los valores son de 7,92 y 8,07 minutos en *forwarders* grandes y medianos. En simulaciones con *forwarders* medianos y volúmenes bajos, el TD es de 7,02 minutos, mientras que en *forwarders* grandes y volúmenes altos alcanza 8,07 minutos.

El TTC de *forwarders* medianos es más alto en datos empíricos (26,66 minutos), superando a los grandes (24,94 minutos). En simulaciones los tiempos en volúmenes altos fueron de 23,8 y 25,54 minutos para *forwarders* medianos y grandes respectivamente; por otro lado, los tiempos en volúmenes bajos fueron de 23,43 y 24,92 minutos en *forwarders* medianos y grandes.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran similitudes con los hallazgos reportados por HILDT *et al.* (2020) donde se identificaron tendencias en los tiempos generales de las actividades de carga y descarga. De manera específica, se observa que las actividades que consumieron mayor tiempo fueron la carga y la descarga, con tiempos promedio de 12,95 minutos y 10,9 minutos, respectivamente. Para el caso de este estudio los tiempos son menores, pero con la misma tendencia.

Estos resultados destacan la importancia del tamaño del *forwarder* y el volumen inicial en la optimización de las actividades de extracción de madera.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo de simulaciones en el sector forestal ha demostrado ser una herramienta valiosa para la reducción de las inversiones necesarias en ensayos a campo. No obstante, es importante señalar que, aunque las simulaciones ofrecen importantes ventajas en términos de optimización y costos, no deben considerarse como un reemplazo de las mediciones empíricas realizadas en campo, sino como un complemento que permite realizar un análisis preliminar o generar hipótesis que luego pueden ser verificadas mediante ensayos reales.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas han mostrado una notable consistencia con los datos empíricos obtenidos a través de mediciones a campo. Este hallazgo resalta la efectividad de las metodologías empleadas, las cuales permitieron observar claramente el impacto que tiene el tamaño de los *forwarders* en las diferentes actividades que componen el ciclo operacional de extracción de madera. Este tipo de análisis es fundamental para la toma de decisiones informadas y para la optimización de los recursos en el proceso de cosecha.

Las simulaciones de eventos discretos se han aplicado de manera efectiva, permitiendo ajustar distribuciones estadísticas para cada uno de los componentes del ciclo de extracción. Esto facilitó la generación de simulaciones precisas utilizando el *software* correspondiente. El *software* empleado en este estudio resultó ser una herramienta exitosa y práctica, destacándose por su capacidad para tomar decisiones basadas en algoritmos, lo que hizo más accesible su uso y permitió obtener resultados satisfactorios en un tiempo razonable.

Sin embargo, es importante señalar una limitación inherente al *software* utilizado, ya que, aunque permite obtener valores promedio, máximos, mínimos, desviaciones estándar, entre otros, no ofrece un análisis profundo de cada una de las variables resultado de las simulaciones. Esta característica limita la capacidad de realizar un análisis exhaustivo de los datos. Para suplir esta deficiencia, el uso de herramientas de programación más avanzadas, como R o Python, resultaría altamente beneficioso, ya que estas herramientas permiten un análisis más detallado y preciso de los datos generados durante las simulaciones.

En cuanto a los *forwarders*, se pudo comprobar que aquellos con mayor capacidad de carga presentan una mayor productividad efectiva en todos los análisis realizados. Este hallazgo es consistente independientemente del volumen inicial de madera a extraer o de la distancia de extracción. Este resultado sugiere que, en términos de productividad, los *forwarders* grandes son más eficientes que los de menor capacidad.

En relación con la distancia de extracción, se observó que no hubo una variación significativa en los resultados al comparar los diferentes tipos de *forwarders*. Esto sugiere que, en

condiciones similares, la elección entre *forwarders* grandes y medianos puede ser indiferente en términos de su desempeño, lo que implica que ambos tipos de maquinaria pueden ser empleados de manera efectiva bajo las mismas condiciones operativas.

En cuanto a los tiempos de las actividades operacionales, se pudo evidenciar que los procesos de carga y descarga son los que requieren mayor tiempo de ejecución. Esta tendencia es particularmente notoria en los *forwarders* de tamaño mediano, donde los tiempos de carga y descarga son mayores en comparación con los de mayor capacidad. Estos tiempos deben ser considerados con especial atención al calcular la productividad efectiva, ya que tienen un impacto directo en la eficiencia global del ciclo de extracción.

Un análisis más profundo que compare, además de los tamaños, diferentes marcas de *forwarders* podría resultar altamente beneficioso. Este enfoque permitiría obtener resultados aún más precisos y detallados, contribuyendo a una mejor comprensión de las variaciones en el rendimiento y eficiencia de las máquinas. La inclusión de marcas diferentes permitiría evaluar cómo factores como la tecnología, diseño y características específicas de cada modelo influyen en la productividad y costos operativos, lo que podría ofrecer una ventaja significativa para optimizar las decisiones en el ámbito de la cosecha forestal.

7. AGRADECIMIENTOS

“A Dios”

Mi más sincero agradecimiento a Dios, por darme las fuerzas, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar cada obstáculo. Su guía y bendición han sido esenciales en cada paso de este proceso.

“A mi Madre”

Quien ha sido mi mayor fuente de apoyo. Gracias por su amor incansable, su sacrificio y por estar siempre a mi lado, animándome a seguir adelante. Sin su confianza en mí, no habría llegado hasta aquí.

“A mis amigos y compañeros”

A mis amigos y compañeros de estudios, con quienes he compartido momentos de aprendizaje y superación. Gracias por su compañía, por su aliento y por hacer más llevadero este viaje académico. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en este proceso.

“A mi Orientador y Co-Orientador”

Al Dr. Patricio Mac Donagh y al Ing. Ftal. Andrés Leszczuk, quienes han sido fundamentales en este proceso. Agradezco profundamente la orientación y el apoyo de ambos. El Dr. Mac Donagh, con su vasta experiencia y dedicación, me ha guiado en cada paso con sabiduría y paciencia. El Ing. Leszczuk, por su tiempo, conocimientos y consejos siempre acertados, ha sido un gran apoyo y fuente de inspiración. Juntos han contribuido significativamente a mi crecimiento académico y profesional, y por ello les estoy eternamente agradecido.

“A la Universidad”

A la UNaM-FCF, por abrirme sus puertas y permitirme formarme en un entorno tan enriquecedor. A todo su personal docente y administrativo, que me ha brindado su apoyo y su conocimiento en todo momento.

“Al Ing. Ftal. Pascual Andrés Núñez”

Gracias por brindarme la oportunidad de aplicar mis conocimientos en el campo profesional. Su confianza y apoyo me han permitido crecer y enfrentar nuevos desafíos, fortaleciendo mis habilidades y enriqueciendo mi formación.

“Por último”

Mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, han formado parte de mi trayectoria y contribuyeron al éxito de este trabajo. Su apoyo y confianza han sido fundamentales. ¡Gracias por ser parte de este logro!

9. BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman, P., Belbo, H., Eliasson, L., de Jong, A., Lazdins, A., Lyons, J. 2014. The COST model for calculations of Forest Operations Cost. *Int. J. For. Eng.* 25(1): 75-81.
- Ackerman, S.A., Seifert, S., Ackerman, P.A., Seifert, T. 2016. Mechanised Pine Thinning Harvesting Simulation: Productivity and Cost Improvements as a Result of Changes in Planting Geometry. *Croat. j. for. eng.* 37(1): 1-15.
- Asikainen, A. 2010. Simulation of stump crushing and truck transport of chips. *Scandinavian Journal of Forest Research.* 25(3): 245-250.
- Gagliardi, K., Ackerman, S., Ackerman, P. 2020. Multi-Product Forwarder-Based Timber Extraction: Time Consumption and Productivity Analysis of Two Forwarder Models Over Multiple Products and Extraction Distances. *Croat J For Eng.* 41: 231–42.
- Hildt, E., Leszczuk, A., Mac Donagh, P., Schlichter, T. 2020. Time consumption analysis of forwarder activities in thinning. *Croatian Journal of Forest Engineering.* 41(1): 13-24.
- Hildt, E., Somma, F., Valdes, M., Leszczuk, A., Mac Donagh, P. 2016. Sistema de análisis para filmación y seguimiento GPS en investigación sobre maquinaria forestal. Poster. XVII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales.
- Hogg, G., Pulkki, R. E., Ackerman, P. A. 2010. Multi-Stem Mechanized Harvesting Operation Analysis – Application of Arena 9 Discrete-event Simulation *Software* in Zululand, South Africa. *International Journal of Forest Engineering,* 21(2): 14-22.
- Leszczuk, A., Hildt, E., Somma, F., Broz, D., Capiel, I., Torrubiano, C., Mac Donagh, P. 2017. Simulador de Cosecha Forestal “SimNEA”. Congreso argentino de agroinformática – 46JAIIO. En actas... 4-8 sep. 2017. ISSN: 2525-0949 – P 194-204. (1)
- Leszczuk, A.; Hildt, E.; Cinauski, R.; Reis, H.; Scherer, R.; Kimmich, D.; Somma, F.; Mac Donagh, P. Planificación y balance de operaciones de cosecha utilizando el simulador “SIMNEA”. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. En actas... 5 – 6 oct. 2017. ISSN: 2469-0147 – 5p. (2)
- Mac Donagh, P.M., Velazco, S.J.E., Botta, G.F., Schlichter, T., Cubbage, F. 2019. Logging Contractors’ Growth in the Southern Cone: An Analysis of Contractor Business Strategies, Innovation, and Mechanization. *Forest,* 10(69): 1-12.

- Nordfjell T., Öhman E., Lindroos O. & Bengt Ager (2019) The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017, *International Journal of Forest Engineering*, 30:1, 1-13, DOI: 10.1080/14942119.2019.1591074
- Petty, A.; Kärhä, K. 2014. Productivity and cost evaluations of energy-wood and pulpwood harvesting systems in first thinnings. *International Journal of Forest Engineering*, 25:1, 37–50.
- She, J., Chung, W. & Kim, W. 2018. “Discrete-event simulation of ground-based timber harvesting operations,” *Forests*, vol. 9, n°. 11.
- Tempekis, S.; Sakellariou, S.; Samara, F.; Sfougaris, A.; Jaeger, D. 2015. Mapping the optimal forest road network based on the multicriteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. *Environ Monit Assess.* 187: 11, 687-704.
- Väätäinen Kari, Juha Laitila , Perttu Anttila , Antti Kilpeläinen & Antti Asikainen. 2020. The influence of gross vehicle weight (GVW) and transport distance on timber trucking performance indicators – Discrete event simulation case study in Central Finland, *International Journal of Forest Engineering*, 31:2, 156-170, DOI: 10.1080/14942119.2020.1757324
- Vopěnka, P.; Kašpar, J.; Marušák, R. 2015. GIS tool for optimization of forest harvest-scheduling. *Science Direct*, 113:1, 254-259.

**Formulario de autorización de depósito de tesis/trabajo integrador final en la
 Comunidad Ciencias Agrarias del RIDUNaM
 (Repositorio Institucional Digital de la UNaM)**

Por intermedio de la presente, el abajo firmante, AUTOR del trabajo integrador final (grado) titulado **“Simulación de eventos discretos (SED) para evaluar el impacto del tamaño de los forwarders, la carga útil, la distancia de extracción y el tipo de producto, en los rendimientos de extracción de biomasa forestal.”** da FE de la autoría y originalidad de la obra mencionada, que fue dirigido por Dr. MAC DONAGH Patricio Miguel y Ing. Ftal. LESZCZUK, Andrés Alejandro, presentada y defendida en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones (FCF-UNaM), el 20/12/2024, Acta N° 183681, con el fin de obtener el título de **Ingeniero Forestal**.

Tildar según corresponda

- Tesis de Posgrado
 Doctorado Maestría Trabajo Final Integrador
 Tesis de Grado

Derechos patrimoniales

Como autor, expreso mi conformidad en cuanto a la cesión gratuita de los derechos de reproducción y circulación de esta obra, en forma **NO EXCLUSIVA**, a la Facultad de Ciencias Forestales-UNaM. Dicha reproducción y circulación se podrá realizar, una o varias veces, en cualquier soporte, para todo el mundo, con fines sociales, educativos y científicos.





En virtud del carácter no exclusivo de esta cesión, el autor podrá reproducir y comunicar libremente la tesis o trabajo final integrador, a través de los medios que estime oportunos.

Condiciones de acceso en línea

- Autorizo el depósito de la tesis o trabajo final integrador en forma inmediata
 Autorizo el depósito del documento con embargo por el plazo de _____ meses a partir de la defensa de la misma.

Condiciones de uso de la tesis/TFI

Será puesta a disposición pública bajo las siguientes condiciones de uso:

	(BY) Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).
	(NC) No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
	(SA) Permite trabajos derivados — Siempre que se mantenga la misma licencia.
	Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual (by-nc-sa): No se permite un uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, la distribución de las cuales se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original.

Referencias:

- CC (Licencias Creative Commons).
 BY (Atribución).
 NC (No comercial).
 SA (Compartir igual).

Dados personales (llenar un cuadro por cada autor)

Apellido y Nombres	QUESNEL KIEFL, Jonathan Maximiliano
Teléfono/Celular	+54 9 3751 61-3151
Correo electrónico	jonathankiefl@hotmail.com

Se firma la presente en la Ciudad de Eldorado, Misiones a los 20 días del mes de diciembre de 2024.


Firma

DNI 38.242.625
Tipo y N° Documento

QUESNEL KIEFL, Jonathan M.
Aclaración