

Desarrollo de modelos de productividad para *harvesters* y *forwarders* en plantaciones de *Pinus* spp. del noreste argentino: efectos de la densidad del rodal, la intensidad de raleo y los productos elaborados

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

Eduardo Hildt

Ingeniero Forestal - Universidad Nacional de Misiones - 2013

Lugar de trabajo:
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad Nacional de Misiones



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Patricio Miguel Mac Donagh

Ing. Forestal – Ing. Agrónomo (Universidad Nacional de La Plata)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Co-Director

Tomás Miguel Schlichter

Ing. Agronomo (UBA)

Doctor en Ciencias Forestales (Universidad Georg-August, Goettingen)

JURADO DE TESIS

Eduardo Acuña Carmona

Ing. Forestal (Universidad de Concepción, Chile)

Dr.Sc. Forestales (Universidad de Concepción, Chile)

Juan Haridas Gowda

Ms.Sc. Forestal (Universidad Sueca de Ciencias Agropecuarias)

Dr. Forestal en Ecología Animal (Universidad Sueca de Ciencias Agropecuarias)

Gabriela Corsano

Licenciada en Matemática Aplicada (Universidad Nacional del Litoral)

Doctora en Ingeniería (Universidad Nacional del Litoral)

Fecha de defensa de la tesis: 9 de marzo de 2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Patricio Mac Donagh por la dedicación puesta en la generación de oportunidades para el desarrollo de la investigación aplicada en el área del aprovechamiento forestal en el NEA. Esta tesis doctoral es un resultado directo de esos esfuerzos.

También agradezco a las empresas Forestal Bosques del Plata S.A., Pindó S.A., Selva S.R.L. y Albura S.A. por facilitar el acceso a sus operaciones y brindar el apoyo logístico necesario.

A los ingenieros forestales Dionel Kimmich, Francisco Somma, Mariano Valdes, Andrés Leszczuk y Diego Broz, del Grupo Trabajo en Cosecha Forestal (FCF-UNaM), por su colaboración durante las mediciones y sus aportes a la interpretación de las observaciones y a la valoración de los resultados desde la perspectiva forestal.

Finalmente, quiero agradecer especialmente a la Familia Baiocco por su apoyo incondicional al desarrollo de este doctorado, poniendo en alto el valor de la hospitalidad en cada viaje que tuve que realizar.

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Eduardo Hildt

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Hildt, E., Leszczuk, A., Schlichter, T., Mac Donagh, P.M. 2019. Efecto de la densidad de las forestaciones y la intensidad de cosecha en raleos mecanizados con harvester. *Scientia Forestalis*, 47(123): 440-450.

Hildt, E., Leszczuk, A., Mac Donagh, P.M., Schlichter, T. 2020. Time Consumption Analysis of Forwarder Activities in Thinning. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 41(1):13-24.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	v
DECLARACIÓN	vi
PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS	vii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xvi
Capítulo 1.Introducción general	19
1.1. Características de los raleos mecanizados.....	20
1.2. Raleos mecanizados y factores de influencia	20
1.3. Efecto de las características del raleo sobre los productos elaborados.....	23
1.4. Sistemas de soporte a la decisión.....	24
1.5. Objetivos e hipótesis generales.....	24
1.6. Aproximación metodológica y estructura de la tesis.....	25
Capítulo 2.Efectos de la densidad del rodal y la intensidad del raleo sobre la cosecha con <i>harvester</i>.....	29
2.1. Introducción.....	29
2.2. Materiales y métodos.....	30
2.3. Resultados.....	34
2.4. Discusión	48
2.5. Conclusiones.....	51
Capítulo 3.Factores que afectan a la productividad de la extracción con <i>forwarders</i> en segundo raleo	55
3.1. Introducción.....	55
3.2. Materiales y métodos.....	57
3.3. Resultados.....	62
3.4. Discusión	70
3.5. Conclusiones.....	72
Capítulo 4.Efecto de la instrucción de trozado y la intensidad de raleo sobre el valor de la madera y el costo del raleo	77
4.1. Introducción.....	77
4.2. Materiales y métodos.....	79
4.3. Resultados.....	89
4.4. Discusión	99
4.5. Conclusiones.....	102
Capítulo 5.Conclusiones generales	107
5.1. Sobre la metodología aplicada.....	107
5.2. Jerarquización de resultados.....	109
5.3. Relevancia para futuras investigaciones.....	113
Capítulo 6.Bibliografía	117

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Características de los <i>harvesters</i> evaluados y cantidad de parcelas.....	32
Cuadro 2.2: Coeficientes de los modelos ajustados para el volumen y los tiempos..	37
Cuadro 3.1: Características de los <i>forwarders</i> evaluados.	57
Cuadro 3.2: Características de los rodales evaluados en cada sitio.	59
Cuadro 3.3: Definición de las actividades realizadas por los <i>forwarders</i>	61
Cuadro 3.4: Tiempo total registrado, TAE y ciclos evaluados.	62
Cuadro 3.5: Resumen de los estudios de tiempos para las distintas actividades y los diferentes tamaños de <i>forwarder</i>	63
Cuadro 3.6: Características de los productos extraídos por cada tipo de <i>forwarder</i> ..	64
Cuadro 3.7: Modelos predictivos del tiempo requerido por la carga, el desplazamiento durante la carga y la descarga.	67
Cuadro 4.1: Características dasométricas de los rodales inventariados.	79
Cuadro 4.2: Características de los productos e instrucciones de trozado evaluadas..	80
Cuadro 4.3: Proporción de árboles defectuosos para cada especie analizada.....	83
Cuadro 4.4. Resumen de la estructura de costos calculada para el estudio.....	88
Cuadro 4.5: Características del material cosechado para las distintas intensidades de raleo e instrucciones de trozado utilizadas.....	90
Cuadro 4.6: Modelos ajustados, indicadores y significancia de los factores.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribución de los sitios donde se evaluaron raleos con <i>harvester</i> en las provincias de Misiones y Corrientes.	31
Figura 2.2: Densidad de los rodales evaluados.	34
Figura 2.3: Área basal de los rodales evaluados.	35
Figura 2.4: Volumen medio de los árboles.	35
Figura 2.5: Tiempo total de actividades efectivas (TAE) y productividad efectiva (PEF) alcanzada por los <i>harvesters</i> evaluados.	36
Figura 2.6: A. Efecto del área basal y la intensidad de raleo sobre el tiempo de búsqueda del <i>harvester</i> . B. Residuos estandarizados del Modelo 4.	39
Figura 2.7: A. Efecto del área basal y el volumen medio aprovechado sobre el tiempo de ubicación del cabezal. B. Residuos estandarizados del Modelo 5.	40
Figura 2.8: A. Efecto del área basal y el volumen medio aprovechado sobre el tiempo de desrame y trozado del fuste. B. Residuos estandarizados del Modelo 7.	42
Figura 2.9: A. Estimación del tiempo total de actividades efectivas lograda por el modelo combinado. B. Residuos estandarizados del modelo combinado.	44
Figura 2.10: A. Estimación de la productividad efectiva lograda por el modelo combinado. B. Residuos estandarizados del modelo combinado.	46
Figura 2.11: A. Comparación de la productividad efectiva estimada por el modelo respecto de la observada para la muestra principal. B. Comparación de la productividad efectiva estimada respecto de la observada para la muestra de validación.	47
Figura 3.1: Distribución de los sitios donde se evaluó la extracción con <i>forwarder</i>	58
Figura 3.2: Detalle parcial de la red de caminos, estructura de las vías de saca y recorrido realizado por el <i>forwarder</i> en el sitio 3.	60
Figura 3.3: A. Variación del tiempo de carga requerido para diferentes tamaños de carga y distintos tamaños de trozas. B. Predicciones del modelo ajustado.	65
Figura 3.4: A. Variación del tiempo de desplazamiento durante la carga requerido para diferentes tamaños de carga y distintas concentraciones de trozas. B. Predicciones del modelo ajustado.	66
Figura 3.5: A. Variación del tiempo total del ciclo para diferentes capacidades de carga y tamaños de trozas. B. Variación de la productividad efectiva para diferentes capacidades de carga y distancias de extracción.	68

Figura 3.6: A. Comparación entre los valores observados y las predicciones del modelo para el tiempo total de actividades efectivas (TAE). B. Comparación entre los valores observados y las predicciones del modelo ajustado para la productividad efectiva..	69
Figura 4.1: Esquema general del proceso de simulación aplicado en el ensayo.....	81
Figura 4.2: Esquema del proceso de simulación del trozado de un árbol.	84
Figura 4.3: Interfaz del simulador de trozado desarrollado para este estudio.....	86
Figura 4.4: Volumen de la madera obtenida para las distintas intensidades de raleo e instrucciones de trozado evaluadas.	93
Figura 4.5: Valor bruto y valor neto obtenido por hectárea para las distintas intensidades de raleo e instrucciones de trozado evaluadas.	93
Figura 4.6: Volumen cosechado en los raleos simulados en relación con el área basal (A) y el número de árboles (B) existentes antes de la intervención.	94
Figura 4.7: Productividad del <i>harvester</i> en los raleos simulados en relación con el área basal (A) y el número de árboles (B) existentes antes de la intervención.....	94
Figura 4.8: Composición del costo de cosecha y su relación con la productividad del <i>harvester</i> y el <i>forwarder</i> para cada situación evaluada.....	96
Figura 4.9: Valor neto total y valor neto unitario obtenido en los raleos.....	98

ABREVIATURAS

DAP: Diámetro a la altura del pecho

DSS: *Decision Support Systems* - Sistemas de soporte a las decisiones.

GNSS: *Global Navigation Satellite System* – Sistema global de navegación por satélite

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

IR: Intensidad de raleo

IT: Instrucción de trozado

NEA: Noreste argentino

TAE: Tiempo de actividades efectivas

PEF: Productividad efectiva

PyMES: Pequeñas y medianas empresas

SIMNEA: Simulador de cosecha forestal para el NEA

RESUMEN

Desarrollo de modelos de productividad para *harvesters* y *forwarders* en plantaciones de *Pinus* spp. del noreste argentino: efectos de la densidad del rodal, la intensidad de raleo y los productos elaborados

Las operaciones de raleo en bosques de *Pinus* spp. han sido mecanizadas mediante los *harvesters* y *forwarders*. Su resultado final depende del valor de la madera elaborada y del costo de su elaboración. En este sentido la **hipótesis** planteada es que los rodales con alta densidad y los raleos con una baja intensidad de extracción favorecen la cosecha de árboles con un bajo volumen individual, generando una mayor proporción de trozas triturables con bajo valor industrial. Esto afecta al resultado general de la operación de raleo, reduciendo la productividad del *harvester* y del *forwarder*, incrementando el costo del corte y la extracción, y limitando el margen obtenido en la operación. En primer lugar, se desarrollaron estudios de tiempos a campo, ajustando modelos mixtos para describir la duración de las actividades realizadas por nueve *harvesters*. Se determinó que su productividad se vio favorecida al aumentar la intensidad de raleo, disminuyendo al incrementarse la complejidad del trozado. Luego, se estudió la operación de 5 *forwarders*. Mediante el ajuste de modelos mixtos se determinó que la productividad de la extracción decayó rápidamente al disminuir el volumen medio de las trozas extraídas y al disminuir la concentración de trozas sobre la vía de saca. Por último, se evaluó el efecto de tres intensidades de raleo y once instrucciones de trozado, empleando los modelos desarrollados en combinación con un simulador de trozado. Se determinó que la intensidad de raleo es el principal condicionante del valor neto recuperado. Por otra parte, el aprovechamiento de tres productos limitó la productividad del corte y la extracción, generando un menor valor neto respecto a instrucciones más simples.

Palabras claves: cosecha forestal, modelos mixtos, modelos de tiempos, instrucción de trozado, simulación de trozado, recuperación de valor.

ABSTRACT

Development of productivity models for harvesters and forwarders in *Pinus* spp. plantations of northeastern Argentina: effects of forest density, thinning intensity and assortments.

Thinning operations in *Pinus* spp. forests have been mechanized by harvesters and forwarders. Their final result depends on the value of the wood harvested and the harvesting cost. In this sense, the hypothesis is that high density stands and low intensity thinnings favour the harvesting of low size trees, producing a greatest proportion of pulpwood logs with low industrial value. This affects the result of the thinning operation, reducing the productivity of the harvester and forwarder, raising the logging cost and limiting the net value recovery. First, time and motion studies were developed, adjusting mixed models to describe the duration of the activities carried out by nine harvesters. It was determined that their productivity was favoured by increasing the thinning intensity, decreasing as the complexity of the bucking increased. Then, the operation of 5 forwarders was studied. Through the adjustment of mixed models, it was determined that the extraction productivity declined rapidly as the average volume of the extracted logs decreased and as the concentration of logs on the logging route decreased. Finally, the effect of three thinning intensities and eleven bucking instructions was evaluated, using the models developed in combination with a logging simulator. The thinning intensity was determined to be the main conditioner of the net value recovered. On the other hand, the use of three products limited the productivity of cutting and extraction, generating a lower net value with respect to simpler bucking instructions.

Keywords: forest harvesting, mixed models, time models, bucking instruction, bucking simulation, value recovery.

Capítulo 1

Introducción general

Capítulo 1. Introducción general

A nivel mundial, el aprovechamiento forestal ha evolucionado hacia la incorporación de maquinaria de alta complejidad tecnológica en las cortas finales y en los raleos, alcanzando en las últimas décadas también a nuestro país. Esta maquinaria implica importantes inversiones y altos costos fijos asociados al capital inmovilizado. Por ello, el aprovechamiento forestal requiere de una planificación rigurosa para alcanzar una alta productividad y eficiencia en el trabajo. El conocimiento de la respuesta que tienen estos equipos frente a los cambios en las características del bosque, el terreno y la modalidad de trabajo resulta fundamental para predecir su productividad y lograr un correcto balance entre las actividades que conforman la cosecha, permitiendo incrementar la productividad de las operaciones y reducir sus costos.

En los raleos mecanizados con el sistema de corte a medida (*cut-to-length*), se emplea una cosechadora forestal (*harvester*) para el corte, desrame y trozado de los árboles dentro del bosque. Esta trabaja en combinación con un tractor forestal articulado autocargable (*forwarder*), que realiza la extracción de las trozas hasta el camino (Tiernan et al., 2004; Spinelli y Magagnotti, 2010). La productividad y el costo de la cosecha dependen de la coordinación entre las actividades que realizan estos equipos.

Los raleos son operaciones más complejas que las cortas finales, debido a lo reducido de los volúmenes extraídos, y a la alta proporción de trozas de diámetros bajos, con escaso valor industrial. Esto redundará en mayores costos operacionales y en una menor rentabilidad (Lopes et al., 2016). Sin embargo, su correcta ejecución es fundamental para asegurar el desarrollo y la calidad de la masa forestal remanente, permitiendo la obtención de productos de alto valor al final del ciclo forestal. El volumen medio de los árboles, la densidad del rodal, la intensidad del raleo y el número de productos elaborados afectan a la productividad del sistema *harvester-forwarder*, al costo de cosecha y al valor comercial de los productos aprovechados, determinando la factibilidad de la intervención (Han, Lee y Johnson, 2004; Malinovski et al., 2006).

En este sentido, algunas empresas forestales de Misiones y Corrientes realizan raleos parciales en rodales de *Pinus* spp., en los cuales las trozas con diámetros menores no son aprovechadas. Estas trozas, destinadas a la trituración en industrias celulósicas, poseen un bajo valor comercial (entre 13 y 16 USD t⁻¹) en relación con la suma de los costos del aprovechamiento y del transporte (alrededor de 14,5 USD t⁻¹ para bosques situados en un radio inferior a 50 km de la industria destinataria, considerando un costo de transporte de 0,127 USD m⁻³ km⁻¹). En la medida en que se incrementa la distancia entre los rodales y las industrias, se reduce la posibilidad de aprovechar los productos con menor valor comercial. Sin embargo, la intensidad de raleo, el diámetro límite de utilización del fuste y el tipo de productos elaborados suelen definirse al inicio de la faena, replicando combinaciones conocidas y sin contar con el apoyo de herramientas para la estimación de la productividad y los costos que presentará la maquinaria de cosecha en respuesta a las características del rodal intervenido y del raleo realizado.

La mayor parte de los modelos desarrollados para estimar la productividad del aprovechamiento con el sistema *harvester-forwarder* consideran al volumen de los árboles y la distancia de extracción como las únicas variables predictoras. Los efectos de la densidad de la forestación, la intensidad de extracción en el raleo y el número de productos elaborados, han sido explorados en estudios aislados y aún se desconoce su efecto combinado sobre la productividad del aprovechamiento con el sistema

harvester-forwarder (Eliasson, 1999; Ackerman et al., 2016). El desarrollo de modelos de productividad que contemplen estos factores permitirá comprender mejor la condiciones que determinan la productividad y el costo de aprovechamiento alcanzado en los raleos. La integración de estos modelos como parte de sistemas de soporte a las decisiones (DSS) permitirá definir mejor la oportunidad y forma en que se realizan las faenas de raleo en un escenario de baja rentabilidad, aportando precisión al aprovechamiento forestal.

1.1. Características de los raleos mecanizados.

Los bosques de pino de Misiones y el norte de Corrientes comprenden forestaciones de *Pinus taeda* L, *Pinus elliottii* E. y del híbrido *Pinus elliotti* var. *elliotti* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, con una superficie de 694.270 ha. La densidad de plantación varía entre 1.111 y 2.222 árboles ha⁻¹. Según la tasa de crecimiento del rodal y la duración del ciclo forestal, la obtención de productos aserrables y laminables de alto valor al momento de la tala rasa requiere la realización previa de entre dos y tres raleos. El primer raleo se realiza entre el quinto y sexto año de la plantación, y la totalidad de la madera obtenida es comercializada como trozas triturables. La densidad del rodal luego de este raleo ronda los 550 a 800 árboles ha⁻¹.

En el segundo raleo, realizado entre el sexto y duodécimo año, una proporción de hasta un 70% de la madera obtenida corresponde a trozas aserrables con un diámetro en punta fina mayor a 14 cm, y la proporción restante a trozas triturables. Sin embargo, la fracción de trozas aserrables puede disminuir fuertemente -bajo un 35%-, cuando los árboles cosechados tienen un volumen medio menor a 0,3 m³ (Kohler et al., 2015).

El volumen medio de los árboles aprovechados en un raleo depende de la edad del rodal, de la densidad de plantación, la calidad del sitio, el historial de intervenciones previas y del tipo e intensidad del raleo aplicado. Estos últimos dos factores son los únicos que pueden ser modificados al momento de realizar la intervención, variando la proporción de árboles cortados o el criterio de selección aplicado. En este sentido, en el noreste argentino el raleo mecanizado comprende el ingreso del *harvester* en el rodal cortando una de cada cinco líneas de árboles y realizando la extracción selectiva de individuos de dimensiones reducidas o forma deficiente en las líneas remanentes. De esta forma se realiza la extracción sistemática del 20% de los árboles y la corta selectiva de un 30% adicional (Lopes et al., 2016), conformando una operación mixta que extrae el 50% de los individuos (Russell y Mortimer, 2005). Sin embargo, cuando ya existen vías de saca de un raleo anterior o cuando la distancia entre las líneas de árboles es mayor a 4 m, pueden realizarse raleos 100% selectivos en los que el *harvester* ingresa por la vía de saca existente o por el entre línea, dejando sólo los árboles con mejores características comerciales hasta el final del ciclo.

1.2. Raleos mecanizados y factores de influencia

En la actualidad el proceso de mecanización ha llevado a que -aproximadamente- el 70% del volumen de madera producida en los raleos sea elaborada por PyMES contratistas que remplazaron los equipos de motosierristas por *harvesters* y, en menor medida, los tractores con carretas autocargables por *forwarders*, siguiendo la tendencia observada a nivel mundial, la cual permitió una importante reducción de costos en la actividad (Russell y Mortimer, 2005; Spinelli, Lombardini y Magagnotti, 2014). No obstante, aún existe una proporción de

contratistas semi-mecanizados, que emplean motosierras para el corte y tractores para la extracción, pero cuyas faenas alcanzan productividades menores a las 3.000 t mes⁻¹.

En la región se utilizan tanto *harvesters* sobre ruedas diseñados para el trabajo forestal con 4, 6 u 8 ruedas (Mac Donagh et al., 2013b) como *harvesters* “forestizados”, constituidos por una excavadora sobre orugas equipada con un cabezal cosechador y protecciones especiales instaladas en la cabina (Mac Donagh et al., 2013a). Ambos diseños se utilizan tanto en raleos como en cortas finales. Los *forwarders* más difundidos son equipos con tracción 4×4 o 6×6 de fabricación nacional diseñados para el trabajo forestal. La productividad efectiva de estos equipos depende del tiempo que necesitan para realizar cada ciclo de operación y del volumen de madera que son capaces de elaborar en ese tiempo (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006). Las actividades no productivas y las pausas en el trabajo de los operarios o las máquinas impactan en la eficiencia operacional y limitan la productividad real que pueden alcanzar.

En tiempo requerido para la ejecución del volteo, desrame y trozado con *harvester* aumenta al incrementarse el volumen de los árboles, siendo éste el principal factor que explica la productividad (McNeel y Rutherford, 1994; Bramucci y Seixas, 2002; Kärhä, Rönkkö y Gumse, 2004; Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Martins, Seixas y Stape, 2009; Simões, Fenner y Tsutsui, 2010). De esta forma para cada máquina existe un rango de volumen óptimo, en relación con su tamaño y potencia, donde la productividad efectiva se maximiza (Visser et al., 2009). Sin embargo, debido a que el volumen de los árboles explica cerca del 50% de la variación en productividad, existe la necesidad de cuantificar la importancia de otros factores. En este sentido Purfürst y Erler (2011) indican que el 37% de la variabilidad en la productividad del *harvester* se debe a las diferencias en la forma en que los operarios ejecutan la cosecha.

La velocidad con la que el *harvester* puede desplazarse dentro del bosque depende de su potencia, el diseño de la transmisión, el sistema rodante, y el tipo de suelo. Pero también es afectada por el tipo de raleo (sistemático, selectivo o mixto) y, la densidad y disposición de los árboles, factores que establecen restricciones al movimiento de la máquina (Ackerman et al., 2016). El tiempo necesario para la selección de los árboles a cosechar y la ubicación del cabezal alrededor del fuste dependen de la existencia de marcación previa, la densidad del rodal, la altura del sotobosque y la habilidad del operario para desenvolverse en el entorno (Eliasson et al., 1999; Ovaskainen, Uusitalo y Väättäinen, 2004, Ovaskainen, Uusitalo y Sassi, 2006).

En este sentido Eliasson (1999), halló que la productividad del *harvester* se incrementa al aumentar la intensidad de los raleos debido a la reducción de la distancia que se debe recorrer entre cada árbol cosechado. Lageson (1997) comprobó que el tiempo insumido en el movimiento del *harvester* se reduce, al aumentar la cantidad de árboles cosechados por hectárea, siendo mayor en los raleos realizados “por lo alto” donde se cosechan menos árboles de mayores dimensiones. Sin embargo, Eliasson y Lageson (1999) indican que la productividad en estos raleos puede ser entre un 30 y un 40% mayor a la de un raleo tradicional debido a que el mayor volumen de los árboles cosechados compensa el aumento de la duración de las distintas actividades.

En el corte con *harvester*, el número de productos elaborados y sus características están definidos por la instrucción de trozado configurada en el sistema de control del cabezal (también conocida como esquema de trozado o *bucking instruction*). Esta contiene la lista de productos que se elaboran simultáneamente en un rodal, con su nombre comercial, longitud mínima, diámetro mínimo en punta fina,

y valor de comercialización (Labelle, Bergen y Windisch, 2017). El sistema de control del *harvester* emplea esta instrucción de trozado para definir como realizar los cortes al convertir los fustes en trozas industrializables. Por esta razón, el conjunto de productos definidos en la instrucción de trozado depende tanto del volumen de los árboles existentes en el rodal como de la demanda de las industrias que consumirán las trozas generadas durante el raleo.

Mientras que el tiempo de desrame y trozado es directamente proporcional a la longitud del fuste de los árboles, la velocidad de alimentación del cabezal tiende a disminuir al aumentar su diámetro (Nakagawa et al., 2007). Esto se acentúa en rodales con baja densidad donde los árboles presentan ramas más gruesas. También el número de productos elaborados afecta al tiempo requerido para el trozado, complejizando la clasificación de las trozas en pilas homogéneas. Tolan y Visser (2015) encontraron que el aumento del número de productos elaborados y la reducción en el volumen de las trozas provocan una disminución de la productividad del desrame y trozado a borde de camino para fustes cosechados con el sistema de árbol entero. Alam et al. (2014) indican que las diferencias en la productividad observada entre distintos operarios se deben a la forma de ejecución de las actividades asociadas al trozado, como el arrastre de los fustes hacia la vía de saca, el corte del extremo del fuste, el movimiento del cabezal durante el desrame y los movimientos realizados al ubicar los productos en el suelo.

Para la operación de extracción con *forwarder* los principales factores que determinan su productividad son la potencia, el volumen transportado, el tipo de suelo, la pendiente y la distancia recorrida durante el proceso de extracción (McNeel y Rutherford, 1994; Minette et al., 2004; Tiernan et al., 2004; Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Coneglian et al., 2010). En la extracción con *forwarder* la formación de la carga y la descarga insumen más tiempo que el movimiento vacío y cargado del equipo. Por esta razón la distancia de extracción deja de ser el principal factor explicativo de la productividad, haciendo necesario el análisis detallado de los elementos que intervienen en la formación de la carga (Tiernan et al., 2004; Stankić et al., 2011; Eriksson y Lindroos, 2014).

La cantidad de madera transportada, entre 8 y 20 t, está determinada por el tamaño de la caja del *forwarder*, su potencia y el número de ejes con tracción (Stankić et al., 2011). Sin embargo, también está condicionada por el diámetro y largo de los productos extraídos (Stankić et al., 2012). El tiempo que se necesita para estibar la carga depende del volumen de las trozas, la capacidad de la grúa y la distribución de la madera en el rodal (Ghaffarian, Stampfer y Sessions, 2007). El transporte de volúmenes menores a la capacidad máxima del *forwarder*, debido a la forma en que se acomodan las trozas o a un reducido soporte del suelo, conlleva una importante reducción de la productividad y a un aumento del consumo de combustible y del costo unitario de la extracción (Nordfjell, Athanassiadis y Talbot, 2003; Poršinsky et al., 2012; Đuka et al., 2014).

La velocidad de desplazamiento del *forwarder* cargado está determinada por el volumen transportado, la potencia del equipo, el tipo de sistema de transmisión, el número de ejes con tracción y la transitabilidad del terreno (Lindroos y Wästerlund, 2014). La distancia recorrida durante la extracción está relacionada con la distancia óptima de extracción (recíproco de la densidad óptima de caminos), la cual representa la distancia media de extracción que permite minimizar el costo de cosecha y construcción de caminos para un rodal, siendo un criterio muy utilizado para la selección del equipo adecuado para cada situación (Spinelli et al., 2004; Tiernan et al., 2004; Kühmaier y Stampfer, 2012; Carmo et al., 2013).

Por otra parte, estudios realizados en raleos y cortas finales en Europa indican que la cantidad de madera cosechada y el volumen de trozas extraídas por hectárea para cada tipo de producto elaborado impactan sobre el tiempo de carga y sobre la productividad global de la extracción con *forwarders* (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Stankić et al., 2012; Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013). El aprovechamiento de una gran variedad de productos implica un incremento en el número de ciclos necesarios para la extracción y una reducción en el volumen acumulado en el rodal para cada producto (concentración de trozas sobre la vía de saca, expresado en $\text{m}^3 \text{m}^{-1}$), incrementando la complejidad de la operación (Tolan y Visser, 2015). La extracción simultánea de diferentes productos en una misma carga, poco utilizada en el noreste argentino, reduce la eficiencia de la extracción e implica un mayor tiempo de clasificación en la playa de acopio (Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013).

1.3. Efecto de las características del raleo sobre los productos elaborados.

La distribución diamétrica del rodal, el tipo e intensidad del raleo y la instrucción de trozado utilizada determinan el volumen de madera cosechada, el número y las dimensiones de los productos obtenidos (Suadicani y Nordfjell, 2003). Mientras que en la cosecha de árboles con un volumen inferior a $0,2 \text{ m}^3$ la obtención de productos aserrables es mínima, en árboles mayores son los productos indicados en la instrucción de trozado los que determinan el volumen de trozas aserrables y pulpables obtenido y el valor total de la madera elaborada (Tolan y Visser, 2015).

El conocimiento de la estructura de los rodales por medio de inventarios previos al raleo, junto al empleo de funciones de ahusamiento y volumen, permiten estimar el volumen obtenible para cada producto en un raleo. Los modelos de simulación determinísticos desarrollados en la región (Crechi et al., 2005; INTA, 2013; EMBRAPA, 2014) estiman el volumen del fuste hasta un diámetro mínimo límite para cada producto, pero no contemplan la combinación real de piezas de diferente longitud que ocurre durante el trozado mecanizado. Otros modelos, como los desarrollados por Arce, Mac Donagh y Friedl (2004), Kivinen (2004) y el Optimizador de Trozado de INTA optimizan el trozado de fustes individuales, pero no permiten el análisis integrado de una operación de raleo. El desarrollo de modelos de simulación y optimización del trozado a nivel de rodal posibilitaría la identificación de esquemas de trozado adaptados a los raleos del noreste argentino (NEA).

Aún existe un limitado conocimiento sobre como la densidad de los rodales, la intensidad de los raleos y la instrucción de trozado afectan a la productividad del sistema *harvester-forwarder*. Algunos estudios indican que el aumento en la intensidad de los raleos selectivos permitiría la cosecha de árboles con un mayor volumen individual, favoreciendo a la productividad de ambas operaciones (Kärhä, Rönkkö y Gumse, 2004; Laitila y Väätäinen, 2013). Mederski et al. (2016) determinaron que la productividad de un *harvester* realizando raleos en bosques de *Pinus sylvestris* se incrementa en un 20% al aumentar el volumen cosechado de 20 a $80 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$. Esta también se duplica al aumentar el diámetro de los árboles aprovechados de 15 a 28 cm. En cambio, la productividad mostró una reducción del 40% cuando la densidad del bosque previa al raleo aumentó de 500 a $1.600 \text{ árboles ha}^{-1}$. Esto representa un importante avance, pero la comprensión de los mecanismos responsables de estos cambios en la productividad requiere de un mejor análisis de la forma en que cada factor afecta a los tiempos parciales de las distintas actividades.

1.4. Sistemas de soporte a la decisión.

Los estudios de tiempos y movimientos son la principal vía para el análisis de la productividad de la maquinaria forestal. Estos evolucionaron desde la medición de los ciclos de trabajo con cronómetros manuales, continuando con el registro manual de las actividades mediante computadores de campo y la filmación de las operaciones desde fuera de las máquinas (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006). En las últimas décadas, el avance de la tecnología permitió la instalación de cámaras digitales y dispositivos de seguimiento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) a bordo de las máquinas (McDonald y Fulton, 2005; Ovaskainen, Uusitalo y Sassi, 2006; Strandgard y Mitchell, 2015; Alam et al., 2014; Spinelli et al., 2015). Además, el desarrollo de los sistemas de control computarizados en *harvesters* y *forwarders* junto a la implementación de un estándar de registro de la información permitió contar con información detallada generada por la propia maquinaria posibilitando estudios extensivos (Purfürst y Erler, 2011; Arlinger, Möller y Räsänen, 2013; Palander et al., 2013; Strandgard, Walsh y Acuna, 2013; Eriksson y Lindroos, 2014). Sin embargo, en nuestra región la incorporación de esta tecnología fue tardía y la filmación de actividades y el aprovechamiento de la información generada por los sistemas de control recién comenzó a desarrollarse en los últimos años (Olivera et al., 2015; Olivera y Visser, 2016, Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019).

Hasta el momento, las investigaciones realizadas a nivel global y local se centraron en la ejecución de estudios de tiempos y el ajuste de funciones de productividad para equipos individuales o conjuntos de equipos operando bajo condiciones determinadas (McNeel y Rutherford, 1994; Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Mac Donagh et al., 2013a; Mac Donagh et al., 2013b). Estos modelos resultan útiles para la planificación de la cosecha y para la selección de las máquinas adecuadas para condiciones de trabajo particulares.

Sin embargo, la selección de la intensidad de raleo en función de su viabilidad económica o la determinación del efecto de un esquema de trozado sobre el valor comercial de la madera cosechada, son decisiones que requieren el desarrollo de sistemas de soporte a la decisión (DSS) más complejos. Estos deben integrar modelos predictivos de la productividad para *harvesters* y *forwarders*, sensibles a las características del rodal, a la prescripción de corta y a los productos elaborados (Tiernan et al., 2004).

Esta tesis realiza un aporte al sustento del proceso decisión sobre la intensidad de raleo y el esquema de trozado adecuado para las operaciones de raleo mecanizado con el sistema *harvester-forwarder*. Para ello se desarrollaron modelos de productividad detallados para las etapas de elaboración y extracción de la madera, y se diseñó un sistema de simulación del trozado que posibilita un análisis integral del efecto que tienen la intensidad de raleo y el esquema de trozado sobre el valor de la madera, la productividad y los costos de la cosecha.

1.5. Objetivos e hipótesis generales.

El **objetivo general** de esta tesis es evaluar los efectos de la densidad del rodal, la intensidad de raleo y el conjunto de productos elaborados, sobre la productividad del sistema de aprovechamiento con *harvester-forwarder*, el costo de cosecha y el valor neto de la madera elaborada, en bosques de *Pinus* spp. del noreste argentino. La **hipótesis** propuesta es que los rodales con alta densidad y los raleos con una baja intensidad de extracción favorecen la cosecha de árboles con un bajo volumen

individual, generando una mayor proporción de trozas triturables con bajo valor industrial. Esto afecta al resultado general de la operación de raleo, reduciendo la productividad del *harvester* y del *forwarder*, incrementando el costo del corte y la extracción, y limitando el margen obtenido en la operación. En el caso del *harvester*, su productividad disminuye cuando el tiempo de búsqueda de los árboles aumenta y el volumen de los árboles aprovechados se reduce, debido a la disminución de la intensidad de raleo. En cambio, la productividad de la extracción con *forwarder* disminuye al reducirse la intensidad de raleo y al elaborarse más de dos productos diferentes, debido a la disminución en la concentración de trozas para cada producto, lo que implica un mayor tiempo de búsqueda y formación de la carga. El conjunto de productos elaborado tiene el potencial de afectar el resultado de toda la operación, impactando en la productividad del *harvester* y del *forwarder*, y determinando el valor final de la madera cosechada. Se espera que el desarrollo de modelos de producción para *harvesters* y *forwarders*, y su integración en un sistema de soporte a las decisiones, contribuyan a la mejora de las operaciones de raleo mecanizado de plantaciones forestales de *Pinus* spp. del NEA, generando información para lograr una planificación más detallada respecto a la oportunidad e intensidad de las intervenciones.

1.6. Aproximación metodológica y estructura de la tesis.

Esta tesis se basó en el estudio a campo de operaciones de raleo mecanizado, para identificar los principales factores, a nivel de rodal, que afectan a las distintas actividades realizadas por *harvesters* y *forwarders*. Mediante el desarrollo de modelos de productividad y su combinación con la simulación del proceso de trozado se buscó generar un conjunto de herramientas de ayuda a la toma de decisiones críticas durante la planificación de los raleos. En el Capítulo 2 se analizó la forma en que la densidad del rodal y la intensidad del raleo aplicado afectaron la cosecha mecanizada con *harvesters* de ruedas y *harvesters* forestizados sobre orugas, ajustándose modelos predictivos de la duración de las actividades y de la productividad. En el Capítulo 3 se analizaron los principales factores que afectan al proceso de extracción con *forwarders* 4×4 y 8×8, ajustándose modelos predictivos de tiempo y productividad. En el Capítulo 4 se desarrolló un sistema de simulación de trozado, utilizándolo en conjunto con los modelos de los capítulos 2 y 3 para evaluar el efecto de diferentes instrucciones de trozado e intensidades de raleo sobre el valor bruto de la madera cosechada, la productividad y costos de cosecha y el resultado neto de las operaciones de raleo. El Capítulo 5 presenta una discusión final de los resultados obtenidos y sus implicancias para las operaciones de raleo en general y para la situación de los raleos en el NEA.

Capítulo 2

Efectos de la densidad del rodal y la intensidad del raleo sobre la cosecha con *harvester*

Los resultados de este capítulo se encuentran publicados en:

Hildt, E., Leszczuk, A., Schlichter, T., Mac Donagh, P.M. 2019. Efecto de la densidad de las forestaciones y la intensidad de cosecha en raleos mecanizados con *harvester*. *Scientia Forestalis*, 47: 440-450.

Capítulo 2. Efectos de la densidad del rodal y la intensidad del raleo sobre la cosecha con *harvester*

2.1. Introducción

La mecanización de las operaciones de raleo por medio de la incorporación de *harvesters*, tanto con neumáticos como con orugas, ha supuesto una disminución en el costo de cosecha y una mejora en las condiciones de trabajo. Sin embargo, en un ambiente competitivo, las empresas contratistas necesitan reducir sus costos de operación e incrementar su productividad de forma continua (Mac Donagh et al., 2017). Al mismo tiempo, la productividad del *harvester* puede verse reducida al cosecharse un bajo volumen por hectárea, al elaborar árboles con un bajo volumen individual, y al elaborar varios tipos de productos (Bramucci y Seixas, 2002). En cambio, es menos conocida la forma en que la densidad del bosque y la intensidad de los raleos impactan sobre la productividad del *harvester*, los productos obtenidos y el costo de cosecha.

El volumen de los árboles es el principal factor que rige la productividad del corte y trozado con *harvester*, explicando entre el 50% y 70% de la variabilidad (Bramucci y Seixas, 2002; Visser y Spinelli, 2012; Mederski et al., 2016). Aunque esta relación muestra una tendencia lineal para árboles con un volumen menor a 0,5 m³, la productividad puede decrecer cuando el tamaño de los árboles supera un umbral determinado por el tamaño y potencia del *harvester* (Kärhä, Rönkkö y Gumse, 2004; Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Visser y Spinelli, 2012). Esto se debe a que, el tamaño de los árboles incrementa también el tiempo requerido para el corte del fuste, el desrame y el trozado, actividades que en conjunto representan entre el 45% y 75% del tiempo total del ciclo (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Niemistö et al., 2012).

La cosecha de rodales con densidades altas está asociada a una baja productividad del *harvester* (Fulvio y Bergström, 2013). En el noreste argentino la densidad de los rodales al momento de realizarse el segundo raleo varía entre 500 y 800 árboles ha⁻¹, pudiendo ser mayor si el primer raleo extrajo menos del 50% de los árboles. Mederski et al. (2016) observaron una reducción del 18% en la productividad al incrementarse la densidad inicial del rodal de 800 a 1.200 árboles ha⁻¹. Fulvio y Bergström (2013) determinaron que se requieren 5,2 s m⁻³ adicionales por cada 100 árboles ha⁻¹ de incremento de la densidad en un bosque mixto de Suecia con una densidad media de 4.000 árboles ha⁻¹, debido al reducido volumen medio de los árboles cosechados. Por otra parte, los movimientos de la grúa del *harvester* se ven limitados por los árboles circundantes que el operario debe evitar dañar (Suadicani y Nordfjell, 2003; Mederski et al., 2016).

En los raleos selectivos que extraen los árboles con menor vigor (*thinning from below*), la reducción de la intensidad de extracción implica la cosecha de árboles con un menor volumen individual (Bergström, Bergsten y Nordfjell, 2010). Además, la disminución en el número de árboles cosechados por hectárea incrementa el tiempo de búsqueda para cada árbol (Eliasson et al., 1999; Suadicani y Fjeld, 2001; Petty y Kärhä, 2014). Al mismo tiempo, los árboles remanentes restringen la visibilidad de operador y los movimientos de la grúa (Ovaskainen, Uusitalo y Sassi, 2006). Por ejemplo, una disminución del 34% en la intensidad de raleo en bosques de *Pinus sylvestris* L. implica un incremento del 54% en el tiempo de movimiento del *harvester* (Eliasson et al., 1999). En cambio, un incremento de la intensidad de raleo (del 25% al 45% del área basal) pone más árboles al alcance del *harvester* desde cada posición, reduciendo

en un 21% el tiempo de movimiento entre árboles (Suadicani y Fjeld, 2001). Esto también ha sido observado por Laitila y Väätäinen, (2013) en un raleo de *Pinus sylvestris*, donde el tiempo de movimiento durante la búsqueda disminuyó en un 17% al duplicarse la intensidad de raleo.

La productividad del *harvester* disminuye al incrementarse el número de productos cosechados (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Eriksson y Lindroos, 2014; Hildt et al., 2018a). En este sentido, el corte de un pequeño número de productos, la elaboración del material triturable con largos variables y la ubicación de las trozas en una única pila, son medidas recomendadas para simplificar la operación de trozado e incrementar la productividad del *harvester* (Fulvio y Bergström, 2013; Petty y Kärhä, 2014; Lazdiņš et al., 2016). Por ejemplo, Nurminen, Korpunen y Uusitalo, (2006) y Hildt et al. (2018a) encontraron que en los raleos el desrame y trozado del fuste requiere entre un 4 y 10% más de tiempo al elaborar dos productos en lugar de uno. Esto se debe al incremento en la complejidad del trozado y a una mayor carga de trabajo sobre el operario al clasificar cada producto elaborado en distintas pilas.

La estimación de la productividad de los raleos con *harvester* es fundamental para el cálculo de los costos de cosecha (Laitila y Väätäinen, 2013; Lazdiņš et al., 2016; Mederski et al., 2016). Sin embargo, gran parte de los modelos de productividad existentes han sido ajustados para situaciones puntuales. Los antecedentes del análisis de los factores que afectan a los raleos, por medio del estudio de un conjunto amplio de *harvesters*, son escasos (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Eriksson y Lindroos, 2014).

En los segundos raleos, el distanciamiento entre los árboles cosechados y su volumen individual dependen de la densidad del rodal y de la intensidad de raleo. De esta forma, al aumentar la densidad y al reducirse la intensidad de raleo la productividad del *harvester* disminuirá debido al incremento del tiempo de búsqueda de los árboles y a la disminución del volumen medio aprovechado. El objetivo de este estudio es determinar cómo la densidad del bosque y la intensidad del raleo afectan a la duración de las distintas actividades que conforman el ciclo operacional y a la productividad del *harvester*.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Área de estudio

Este estudio fue realizado en bosques de *Pinus taeda* y del pino híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* ubicados en el noreste de la República Argentina. Se evaluaron cuatro faenas de raleo en el departamento de Santo Tomé (Corrientes) y cinco en el departamento de Iguazú (Misiones), entre el 2015 y 2017 (Figura 2.1). Estos bosques, con una edad de entre 11 y 12 años, estaban destinadas a la producción de trozas aserrables y triturables por lo que ya contaban con un primer raleo. Sin embargo, al pertenecer a distintas empresas forestales, estos rodales presentaron diferencias en su densidad, volumen medio, espaciamiento e historia de manejo (Figura 2.2). Los sitios 1 a 7 correspondieron a bosques de *Pinus taeda*, mientras que el sitio 8 fue el único rodal implantado con pino híbrido.

En este estudio se demarcaron un total de 155 parcelas rectangulares de 375 m², buscando maximizar la variabilidad en la densidad e intensidad de raleo existente entre parcelas (Bergström, Bergsten y Nordfjell, 2010; Mederski et al., 2016; Olivera y Visser, 2016). Las parcelas fueron instaladas en la vía de ingreso del *harvester*, ubicadas de forma consecutiva y abarcando el número de líneas alcanzadas por la grúa (Laitila y Väätäinen, 2013; Erber et al., 2016). El número de parcelas

evaluadas fue distinto en cada sitio (Cuadro 2.1). Se relevó con una forcípula el diámetro a la altura del pecho de todos los árboles existentes antes del raleo. Las alturas fueron estimadas por medio de una función hipsométrica ajustada para cada rodal (Olivera y Visser, 2016).

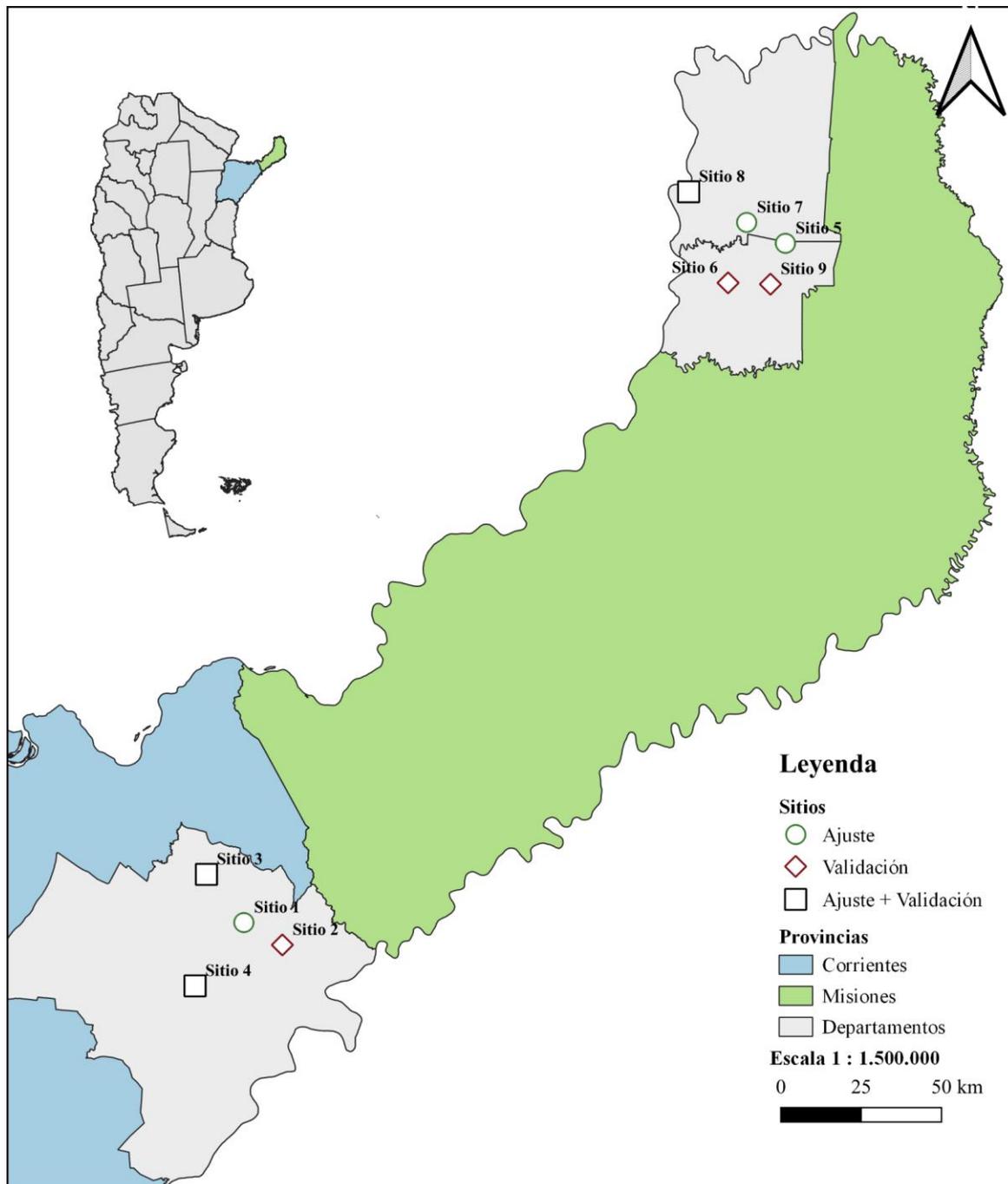


Figura 2.1: Distribución de los sitios donde se evaluaron raleos con *harvester* en las provincias de Misiones y Corrientes.

Las operaciones de raleo fueron prescriptas y supervisadas por los propietarios de los bosques, indicando la extracción del 50% de los árboles. En aquellos sitios que no contaban con vías de extracción se realizó la remoción sistemática de una línea cada 5 existentes, y la cosecha selectiva de los árboles de menores dimensiones o de forma deficiente en las líneas restantes. Los árboles seleccionados para su extracción fueron identificados mediante marcas pintura en los sitios 6 a 9 y por una menor altura de poda en los sitios 1 a 5.

El trozado comprendió la elaboración de entre uno y tres productos aserrables, y un producto triturable. La instrucción de trozado fue definida por la empresa propietaria de cada bosque evaluado. En los sitios 1 a 3 se cosecharon trozas triturables de 2,4 m de longitud. En cambio, en los sitios 5 a 9, estas tuvieron longitudes variables comprendidas entre 2,4 m y 4,5 m. En el sitio 4 sólo se trozaron dos productos aserrables, aprovechándose el fuste hasta un diámetro en punta fina (DPF_{min}) de 18 cm.

2.2.2. Características de los *harvesters* evaluados

Se estudiaron siete modelos de *harvester* diferentes. Los sitios 3 y 4 fueron cosechados por la misma máquina, pero por operarios diferentes. En el sitio 9 se utilizó una máquina de similares características a la utilizada en los sitios 3 y 4, pero propiedad de otro contratista. El Cuadro 2.1 contiene las principales características de los equipos evaluados en cada sitio.

Cuadro 2.1: Características de los *harvesters* evaluados y cantidad de parcelas medidas en cada sitio.

Características	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3, 4, 9			Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7	Sitio 8
Máquina base	John Deere 160GLC	Doosan DX225LC	Caterpillar 312D			Logman 821H	Logman 801H	Hyundai 160LC-7	Doosan DX180LC
Potencia (kW)	90	124	94			166	125	94	98
Masa (kg)	17717	21900	13470			14900	12000	17400	18500
Alcance (m)	8,7	9,8	8,5			10,3	9,3	8,9	9,2
Cabezal cosechador	Waratah H414	Waratah HTH616C	Log Max 5000			Keto 450 Eco Supreme	Keto 150 Supreme	Kesla 25 RHS-II	Waratah H415
Masa (kg)	1030	1800	895			1100	810	840	1330
Diámetro de desrame (cm)	43	51	41			60	45	40	46
Sistema de control	Timbermatic		Log Mate			Technion xLogger	Motomit IT 6,5"	Timbermatic	
Parcelas Ajuste	10	--	20	20	-	10	--	20	20
Parcelas Validación	--	5	6	14	5	--	6	--	19
Distancia entre líneas (m)	3	3	4	4	4	3	3	3	3,25
Vías de extracción	Sin vías	Sin vías	Sin vías			Sin vías	Cada 21 m	Cada 15 m	Cada 15 m

2.2.3. Relevamiento de la información

Los estudios de tiempos y rendimientos fueron realizados mediante la metodología de tiempos continuos minimizando la intervención en la operación de cosecha (Petty y Kärhä, 2014). Por medio de filmaciones se registraron las actividades realizadas por el *harvester*, las características de los árboles cosechados y los productos elaborados. Para ello se utilizó una cámara digital Genius DVR-FHD590 instalada a bordo del *harvester* grabando, de forma simultánea y sin interrupciones, los movimientos efectuados por el cabezal cosechador y la información presentada por su sistema de control (Ovaskainen, Uusitalo y Sassi, 2006; Erber et al., 2016). Estas grabaciones fueron visionadas y procesadas con la ayuda de un *software* desarrollado a tal efecto, determinando la duración de las actividades identificadas y transcribiendo la información suministrada por el sistema de control: diámetros, largos y tipos de producto (Niemistö et al., 2012).

El ciclo operacional fue dividido en las siguientes actividades: búsqueda del árbol (T_{BUSQ}), ubicación del cabezal cosechador (T_{POS}), corte y volteo (T_{CORTE}), desrame y trozado del fuste (T_{PROC}) y liberación de las ramas (T_{LIB}). Las paradas fueron identificadas y discriminadas del ciclo operacional (Mederski et al., 2016). El tiempo total de actividades efectivas (TAE) requerido para cosechar un árbol fue calculado según la ecuación [2.1] (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006).

$$TAE = T_{BUSQ} + T_{POS} + T_{CORTE} + T_{PROC} + T_{LIB} \quad [2.1]$$

Para cada parcela evaluada se calculó la densidad (N_i : árboles ha^{-1}), el área basal (G_i : $m^2 ha^{-1}$), el volumen de árbol medio (V_{mi} : m^3) y el volumen total (V_i : $m^3 ha^{-1}$) previo al raleo. Luego del raleo se determinaron la densidad (N_{ap} : árboles ha^{-1}), el área basal (G_{ap} : $m^2 ha^{-1}$), el volumen de árbol medio (V_{map} : m^3) y el volumen total cosechados (V_{ap} : $m^3 ha^{-1}$). Se calcularon diferentes índices para la intensidad de raleo: proporción del número de árboles ($I_N = N_{ap}/N_i$), proporción del área basal ($I_G = G_{ap}/G_i$), y proporción del volumen total ($I_V = V_{ap}/V_i$) (Bergström, Bergsten y Nordfjell, 2010).

La productividad efectiva de los *harvesters* fue calculada según la ecuación [2.2], donde PEF es la productividad horaria sin considerar las paradas ($m^3 h^{-1}$), V_{mRec} es el volumen total de madera obtenida de cada árbol (m^3) y TAE es el tiempo medio de actividades efectivas empleado en la cosecha (s).

$$PEF = V_{mRec}/(TAE * 3600) \quad [2.2]$$

2.2.4. Análisis estadístico

Se ajustaron modelos mixtos al nivel de parcela para la duración de cada actividad, considerando como predictoras fijas a las características de los árboles cosechados (V_{map}), las características de las parcelas (N_i , G_i , V_i), la intensidad de raleo y otras características de la operación (I_N , I_G , I_V , DPF_{min} , número de productos) (Harrison et al., 2018). El sitio fue incorporado como un factor aleatorio, representado el efecto combinado de cada *harvester* y su operador, y aportando además la estructura de anidamiento de las observaciones (Niemistö et al., 2012, Hiesl y Benjamin, 2015, Hiesl, Benjamin y Roth, 2015). El modelo correspondiente al T_{PROC} fue ajustado al nivel de ciclo operacional para captar la variabilidad en el número de productos elaborados existente dentro de cada parcela (Niemistö et al., 2012). Los modelos fueron ajustados por medio del método de máxima verosimilitud (ML) utilizando la

función “lme” del *software* R (Bates et al., 2015). Fueron retenidas las variables cuyos efectos fueron significativos para una probabilidad $p < 0,05$, sin presentarse multicolinealidad. Los mejores modelos fueron seleccionados según el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el R^2 marginal (R^2M), disponibles en el paquete “piecewiseSEM” (Lefcheck, 2016). Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianza, modelando esta por medio de una estructura de varianza diferente entre sitios (varIdent).

Los sitios donde se relevaron menos de 10 parcelas fueron destinados a conformar una muestra de validación independiente. De esta forma el conjunto con el que se ajustaron todos los modelos estuvo conformado por 100 parcelas de 3 sitios de Misiones y 3 sitios de Corrientes. Por otra parte, el conjunto utilizado como muestra de validación estuvo formado por 55 parcelas de 6 sitios, 3 de ellos independientes respecto de conjunto de ajuste y los restantes conformados una muestra aleatoria de parcelas de los sitios mejor representados que no formaron parte de la muestra de ajuste (Cuadro 2.1).

2.3. Resultados

Los estudios de tiempos registraron la cosecha de 2.076 árboles, totalizando 707 m³ madera cosechada en 24 h efectivas de trabajo, con 537 m³ concentrados en trozas aserrables y 170 m³ en trozas triturables. Las parcelas cosechadas tuvieron una densidad inicial media de 656 árboles ha⁻¹ con un área basal media de 36,1 m² ha⁻¹, de los que se cosecharon 299 árboles ha⁻¹ (N_{ap}), extrayendo 13,4 m² ha⁻¹ de área basal (G_{ap}) (Figura 2.2 y Figura 2.3).

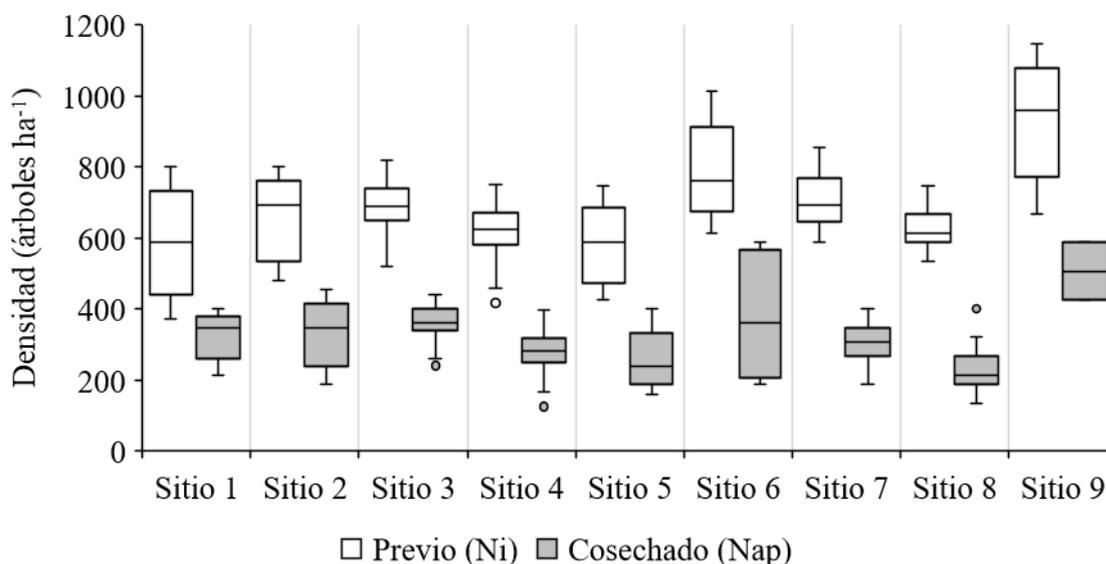


Figura 2.2: Densidad de los rodales evaluados. N_i : número de árboles previo al raleo; N_{ap} : número de árboles cosechados.

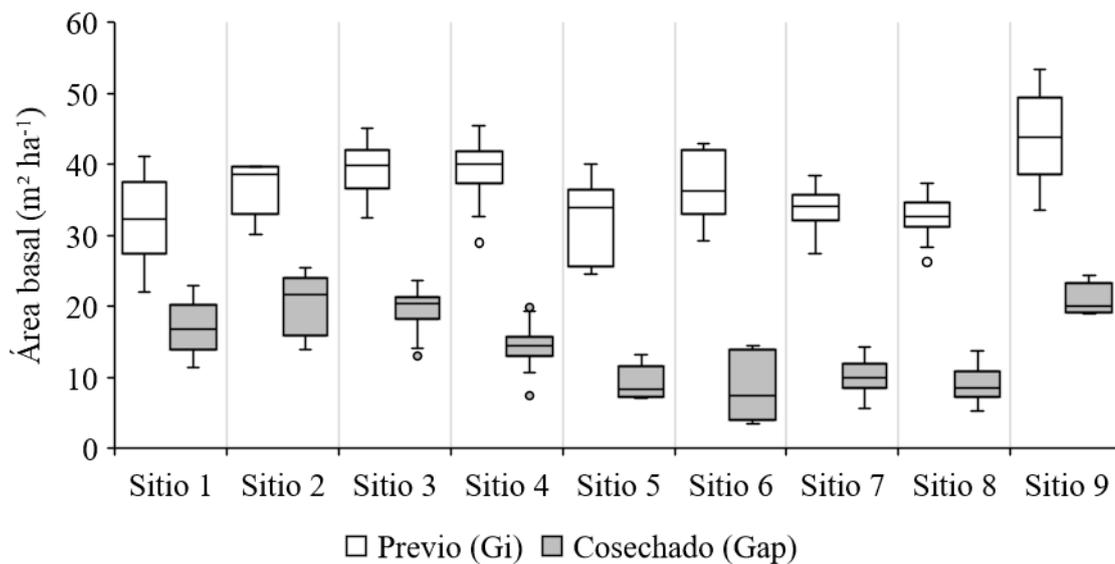


Figura 2.3: Área basal de los rodales evaluados. G_i : área basal antes del raleo; G_{ap} : área basal de los árboles cosechados.

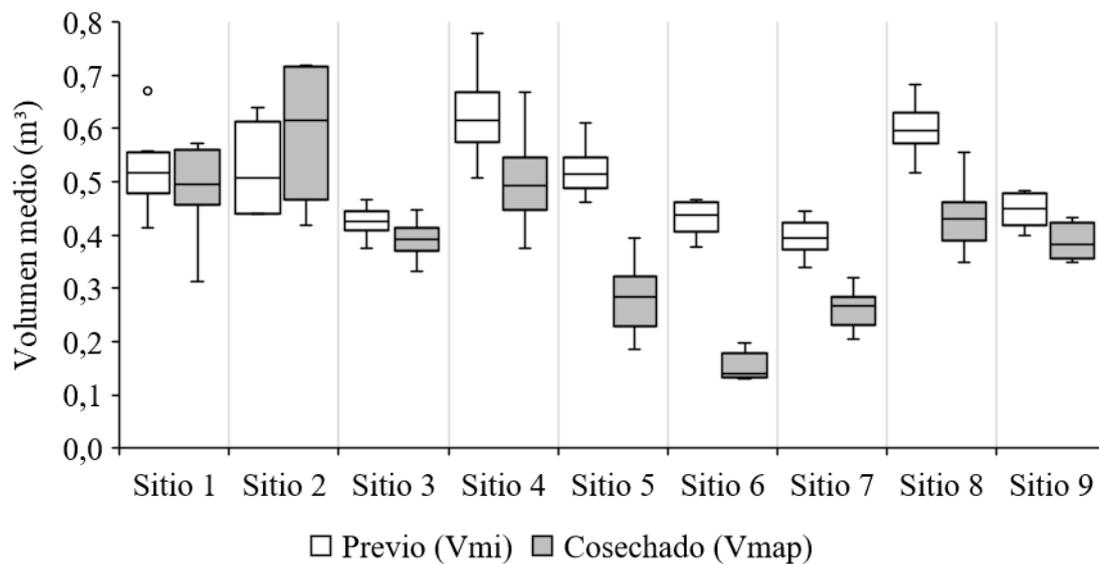


Figura 2.4: Volumen medio de los árboles. V_{mi} : volumen medio previo al raleo; V_{map} : volumen medio de los árboles cosechados.

Los rodales evaluados tuvieron un V_{mi} promedio de $0,53 \text{ m}^3$ con un desvío estándar (SD) de $0,10 \text{ m}^3$. Sin embargo, la aplicación del raleo selectivo a los árboles de menores dimensiones implicó un V_{map} promedio de $0,4 \text{ m}^3$ (SD: $0,11 \text{ m}^3$) (Figura 2.4). El V_{map} estuvo relacionado al V_{mi} , aumentando también en $0,03 \text{ m}^3$ con cada incremento de $0,1$ en la proporción I_V , explicando esto el 52% de la variabilidad observada (Modelo 1 – Cuadro 2.2). El volumen de madera elaborada en cada árbol (V_{mRec}) estuvo determinado por el V_{map} ($R^2 = 0,7$), disminuyendo además en $0,011 \text{ m}^3$ con cada centímetro de incremento en el diámetro final de la última troza cortada (DPF_{min}) (Modelo 2 – Cuadro 2.2). La PEF media alcanzada a nivel global fue de $30,27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (SD: $7,96 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$).

Los distintos sitios evaluados, comprendiendo diferentes combinaciones de rodales, *harvesters* y operarios. Estos presentaron una productividad efectiva (PEF) media de $30,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, variando entre 11 y $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para las distintas situaciones. Esta PEF fue resultado del V_{map} de cada sitio y del tiempo de actividades efectivas (TAE) alcanzado en cada sitio. Los *harvester* requirieron en promedio entre $43,5 \text{ s árbol}^{-1}$, variando entre 36 y $66,6 \text{ s árbol}^{-1}$ en las distintas situaciones (Figura 2.5). Esto corresponde a un ritmo de trabajo medio de $83 \text{ árboles h}^{-1}$. La PEF más baja se dio en el sitio 6, como resultado de la combinación entre el V_{map} más bajo y el TAE más alto que caracterizó a este *harvester*.

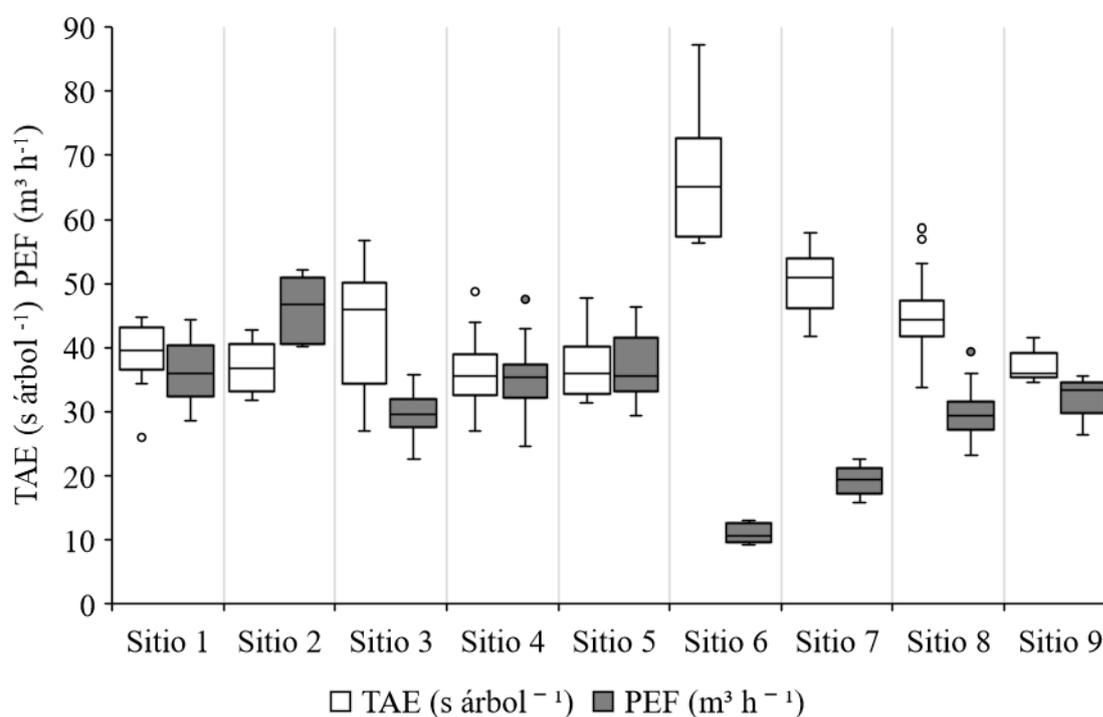


Figura 2.5: Tiempo total de actividades efectivas (TAE) y productividad efectiva (PEF) alcanzada por los *harvesters* evaluados.

Cuadro 2.2: Coeficientes de los modelos ajustados para el volumen y los tiempos parciales.

Modelo	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4	Mod. 5	Mod. 6	Mod. 7	Mod. 8
Variable	V_{map} (m ³)	V_{mRec} (m ³)	Fracción triturable (relativo)	T_{BUSQ} (s árbol ⁻¹)	T_{POS} (s árbol ⁻¹)	T_{CORTE} (s árbol ⁻¹)	T_{PROC} (s árbol ⁻¹)	T_{LIB} (s árbol ⁻¹)
Intercepto	-0,1257 (0,0379)	0,8419 (0,042)	-0,4752 (0,3269)	2,6227* (1,755)	3,4889 (0,5075)	2,4081* (1,1667)	1,0043* (2,3772)	0,9083 (0,8464)
V_{map}			0,9098 (0,4166)		3,1018 (0,9399)	7,4971 (2,1695)	40,3006 (1,5712)	-3,4496 (1,2237)
$\ln(V_{map})$		0,345 (0,0194)	-0,6177 (0,1616)					
G_i							0,1254 (0,0451)	
G_i^{-1}				109,1102 (44,1318)	-31,0485 (11,4861)			
I_N^{-1}				1,3976 (0,4985)				
I_v	0,2922 (0,043)							
N_{Prod}							5,3213 (0,4618)	
DPF_{min}		-0,0114 (0,0021)	-0,0119 (0,0052)				-0,772 (0,0704)	0,3443 (0,0463)
V_{mi}	0,7966 (0,0609)							
Sitio (SD)	0,038	0,050	0,096	1,346	0,761	1,920	3,240	0,837
Res. (SD)	0,069	0,033	0,056	1,270	0,477	1,320	2,492	0,536
Intercepto aleatorio								
Sitio 1	-0,090	0,782	--	1,885	2,320	0,266	1,494	-0,255
Sitio 3	-0,092	0,867	--	3,197	3,074	2,045	2,632	1,411
Sitio 4	-0,109	0,803	--	0,375	4,091	0,411	-2,174	2,063
Sitio 5	-0,196	0,904	--	2,978	3,099	2,224	-0,534	1,133
Sitio 7	-0,138	0,898	--	4,462	4,569	5,673	6,940	-0,066
Sitio 8	-0,128	0,796	--	2,839	3,781	3,830	-2,333	1,163
R²M	0,52	0,70	0,39	0,22	0,14	0,10	0,82	0,55
R²C	0,63	0,91	0,85	0,63	0,76	0,71	0,93	0,87
AIC	-379,79	-391,67	-230,01	426,21	230,20	389,58	8397,69	273,62
BIC	-353,74	-365,62	-198,05	452,26	256,25	413,02	8464,20	299,67
n	100	100	100	100	100	100	1232	100

(*) Coeficiente no significativo a una probabilidad $p < 0,05$. Los valores entre paréntesis corresponden al error estándar del parámetro estimado. N_{Prod} = Número de productos. Sitio (SD) = Desvío estándar del intercepto explicado por el sitio. Res. (SD) = Desvío estándar residual. R^2C = R^2 Condicional (Lefcheck, 2016)

La intensidad de raleo media compendió la cosecha del 45% de los árboles (I_N 0,45 SD: 0,095) variando entre el 20% y 73% para distintas parcelas. El área basal inicial media fue de $36,1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, variando entre 22 y $45,5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. La intensidad de raleo y el área basal aprovechada fueron mayores cuando se efectuó un raleo mixto, con el corte sistemático de una línea para abrir una vía de extracción (I_N Mixto = 0,52; G_{ap} Mixto = $16,48 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), a diferencia de cuando se realizó un raleo totalmente selectivo (I_N Mixto = 0,38; G_{ap} Selectivo = $8,27 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) (Diferencias significativas según la prueba LSD de Fisher con $\alpha = 0,001$, aplicada a las 163 parcelas estructuradas en un modelo lineal mixto donde el sitio actuó como efecto aleatorio para representar la estructura de los datos).

La proporción de trozas triturables obtenida mostró una relación inversa con el V_{map} , con un coeficiente de correlación de Pearson $\rho = -0,43$. Esta tendencia no fue proporcional, superando el 40% para árboles menores a $0,3 \text{ m}^3$ y disminuyendo al aumentar el tamaño de los árboles, hasta alcanzar una proporción inferior al 25% para árboles mayores a $0,5 \text{ m}^3$. También estuvo relacionada con el DPF_{min} , reduciéndose en 12% por cada 10 cm de incremento (Coeficiente de correlación de Pearson $\rho = -0,65$). Esto se debió a que al finalizar el trozado con un diámetro mayor no se trozó el material triturable concentrado en el extremo del fuste (Modelo 3 – Cuadro 2.2).

El desplazamiento del *harvester* y los movimientos de la grúa durante la búsqueda del árbol (T_{BUSQ}) representaron en conjunto el 21,7% del tiempo total del ciclo, requiriendo un promedio de 9,2 segundos por árbol (SD: 2,91 s). El T_{BUSQ} estuvo afectado por el área basal del rodal y la intensidad del raleo, disminuyendo al incrementarse ambas (Modelo 4 – Cuadro 2.2, Ecuación [2.3]). La incorporación de los recíprocos de estas variables en el modelo (G_i^{-1} , I_N^{-1}) indica que este cambio en el T_{BUSQ} fue mayor para densidades o intensidades bajas, como puede observarse en las curvas de la Figura 2.6A. El modelo ajustado explicó el 22% de la variabilidad observada. Al considerar el intercepto aleatorio para cada sitio el nivel de explicación del modelo alcanzó el 63%.

$$T_{BUSQ} = 2,6227 + 109,1102 * G_i^{-1} + 1,3976 * I_N^{-1} \quad [2.3]$$

El tiempo requerido para ubicar el cabezal alrededor de la base del fuste, orientándolo en la dirección de volteo, representó en promedio el 9,4% del TAE, con una duración media de 4 segundos (SD: 1,08 s). El T_{POS} estuvo relacionado con el volumen medio de los árboles cosechados (V_{map}) y con el recíproco de la densidad del rodal (G_i^{-1}) (Modelo 5 – Cuadro 2.2, Ecuación [2.4]). El T_{POS} se incrementó en un 17,4% al aumentar el V_{map} de $0,3$ a $0,5 \text{ m}^3$ debido a la dificultad de la ubicación del cabezal en los árboles más grandes (Figura 2.7A). Además, aumentó en un 7% al incrementarse el G_i de 30 a $40 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, debido a que la mayor densidad requiere una planificación cuidadosa de la dirección volteo en base a la observación de los árboles circundantes. Estos factores explicaron el 14,4% de la variabilidad observada. Por otra parte, el intercepto aleatorio del modelo capturó las diferencias en el T_{POS} medio de cada situación ajenas a los factores estudiados, elevando el nivel de explicación al 76%.

$$T_{POS} = 3,4889 + 3,1018 * V_{map} - 31,0485 * G_i^{-1} \quad [2.4]$$

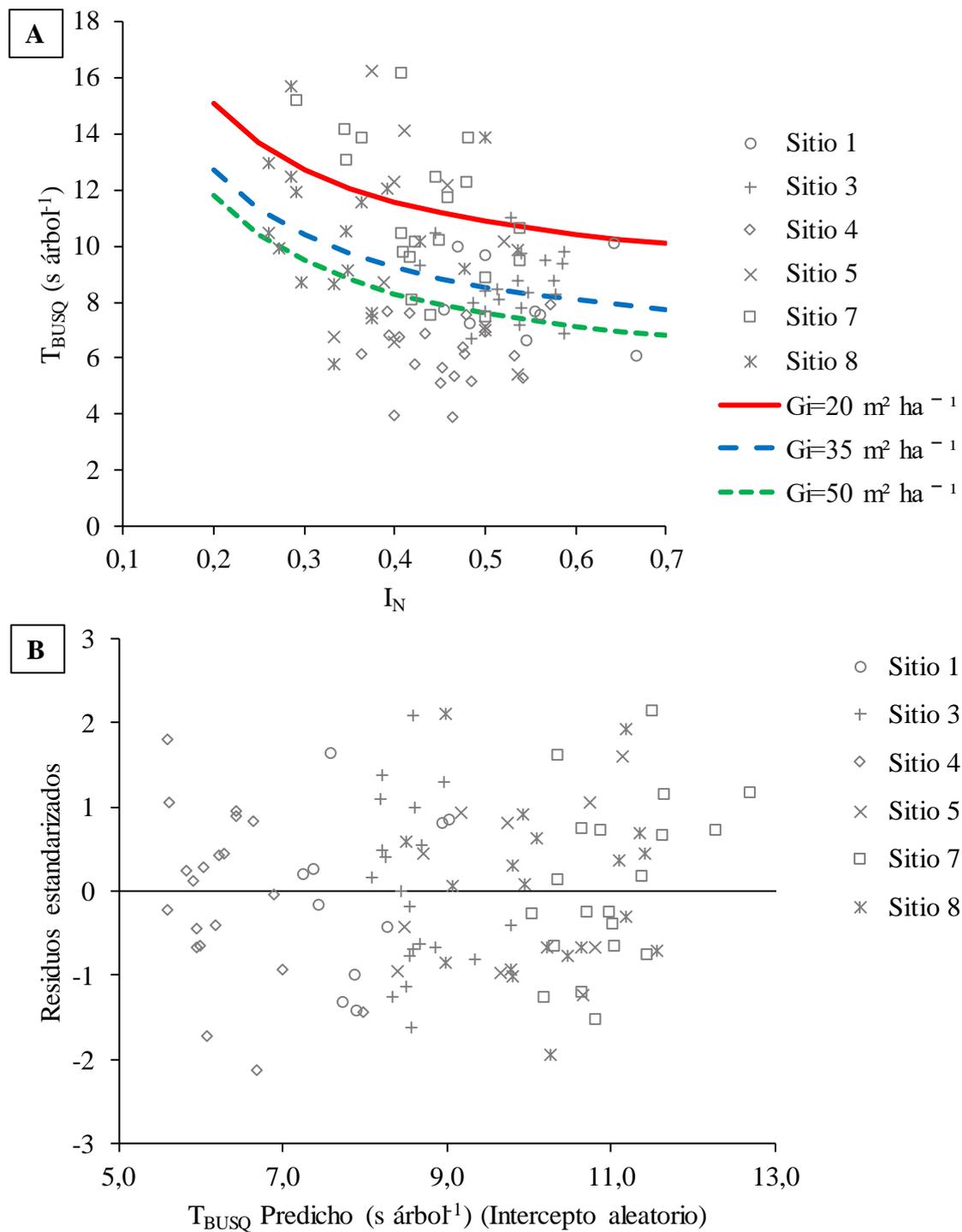


Figura 2.6: A. Efecto del área basal y la intensidad de raleo sobre el tiempo de búsqueda del *harvester*. I_N : intensidad de raleo; G_i : área basal inicial; T_{BUSQ} : tiempo medio de búsqueda del árbol. B. Residuos estandarizados del modelo lineal mixto ajustado (Modelo 4).

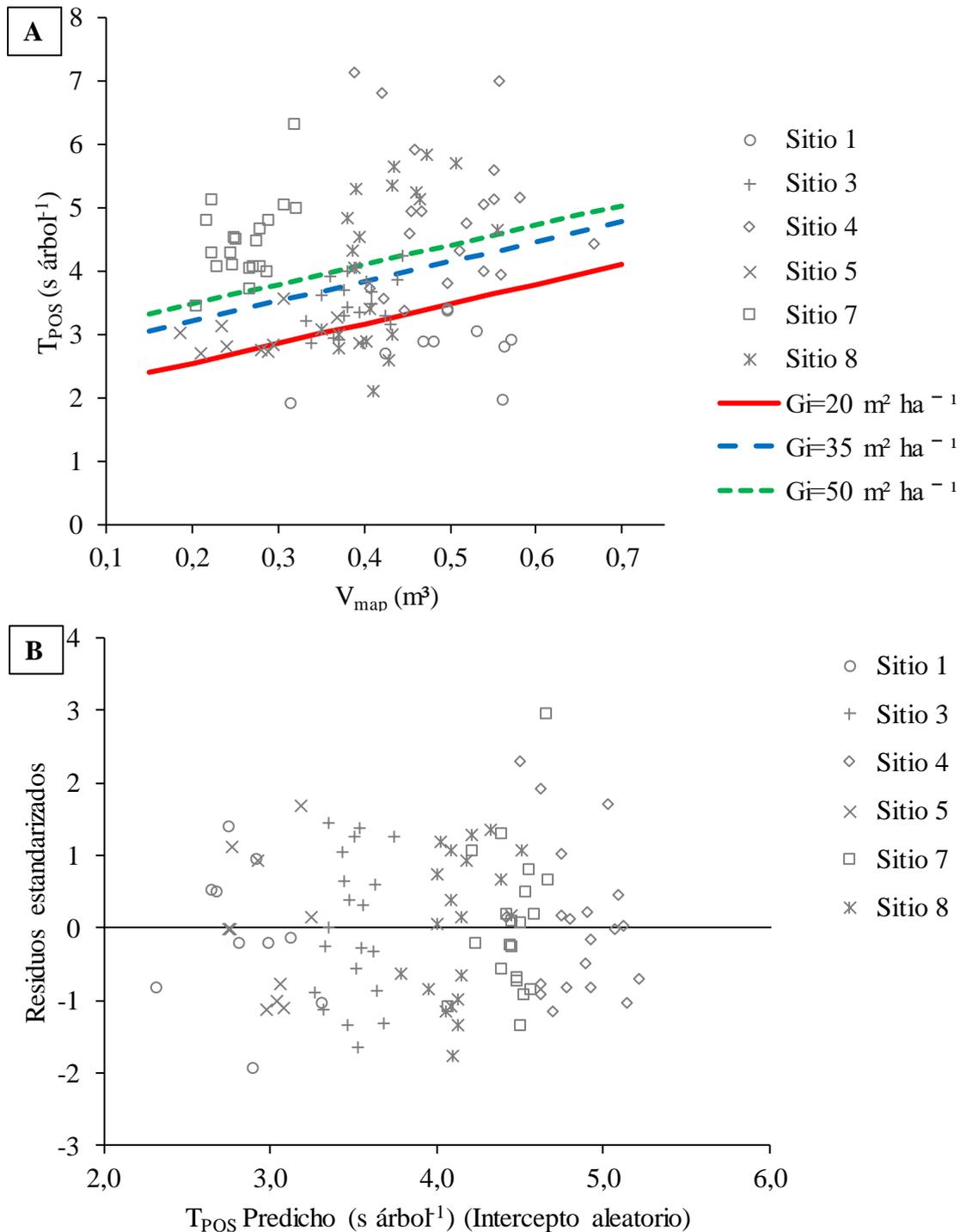


Figura 2.7: A. Efecto del área basal y el volumen medio aprovechado sobre el tiempo de ubicación del cabezal. G_i : área basal inicial; V_{map} : volumen medio de los árboles aprovechados; T_{POS} : tiempo medio de ubicación del cabezal. B. Residuos estandarizados del modelo lineal mixto ajustado (Modelo 5).

El corte y volteo de los árboles (T_{CORTE}) representó un 13% del TAE, con una duración media de 5,5 segundos (SD: 2,2 s). Este se incrementó en un 32% al aumentar el V_{map} de 0,3 a 0,5 m³. Debido a la gran variabilidad existente entre el tiempo medio requerido por cada sitio evaluado, la parte fija del modelo alcanzó a explicar solamente un 10% de la variabilidad. Sin embargo, el efecto aleatorio del sitio sobre el intercepto aportó un desvío estándar de 1,92 segundos, alcanzándose un R^2 Condicional de 0,71 (Modelo 6 - Cuadro 2.2, Ecuación [2.5]). Esto indica que la mayor parte de la variabilidad en el T_{CORTE} tuvo su origen en las distintas combinaciones de *harvesters*, rodales y operarios.

$$T_{CORTE} = 2,4081 + 7,4971 * V_{map} \quad [2.5]$$

El desrame y trozado del fuste (T_{PROC}) fue la actividad más importante del ciclo, representando el 45,4% del TAE, con una duración media de 19,6 segundos (SD: 6,2 s). El T_{PROC} se incrementó en un 46% al aumentar el V_{map} de 0,3 a 0,5 m³ (Figura 2.8A). El área basal afectó en menor medida a esta actividad, incrementando su duración en 1,25 segundos al aumentar en 10 m² el G_i . En promedio, la elaboración de un nuevo producto implicó un incremento de 5,32 segundos en el T_{PROC} (29% de incremento), debido a los movimientos adicionales de la grúa requeridos para desplazar el cabezal entre las distintas pilas correspondientes a cada producto (Ecuación [2.6]). No se observaron diferencias en la relación entre V_{map} y el T_{PROC} para distintos números de productos.

$$T_{PROC} = 1,0043 + 40,3006 * V_{map} + 0,1254 * G_i + 5,3213 * N_{prod} - 0,772 * DPF_{min} \quad [2.6]$$

El incremento en 1 cm en el DPF_{min} provocó una reducción de 0,77 segundos en el T_{PROC} . El aumento del DPF_{min} desde los 6 cm hasta los 18 cm implicó, para un volumen medio de 0,4 m³, una reducción del 33,5% en el T_{PROC} . En este sentido el sitio 4, donde sólo se elaboraron productos aserrables hasta un DPF_{min} de 18 cm, presentó un T_{PROC} medio significativamente menor (14,4 s). Los efectos fijos del Modelo 7 (Cuadro 2.2, Ecuación [2.6]) alcanzaron a explicar el 82% de la variabilidad observada. La proporción del T_{PROC} destinada a la elaboración de trozas triturables se incrementó al disminuir el V_{map} y el DPF_{min} , superando el 50% con árboles menores a 0,4 m³ o cuando se aprovechó el fuste hasta los 6 cm. Con independencia del volumen de los árboles, la elaboración de trozas triturables siempre requirió una mayor proporción del T_{PROC} que la proporción de volumen aportada por este producto.

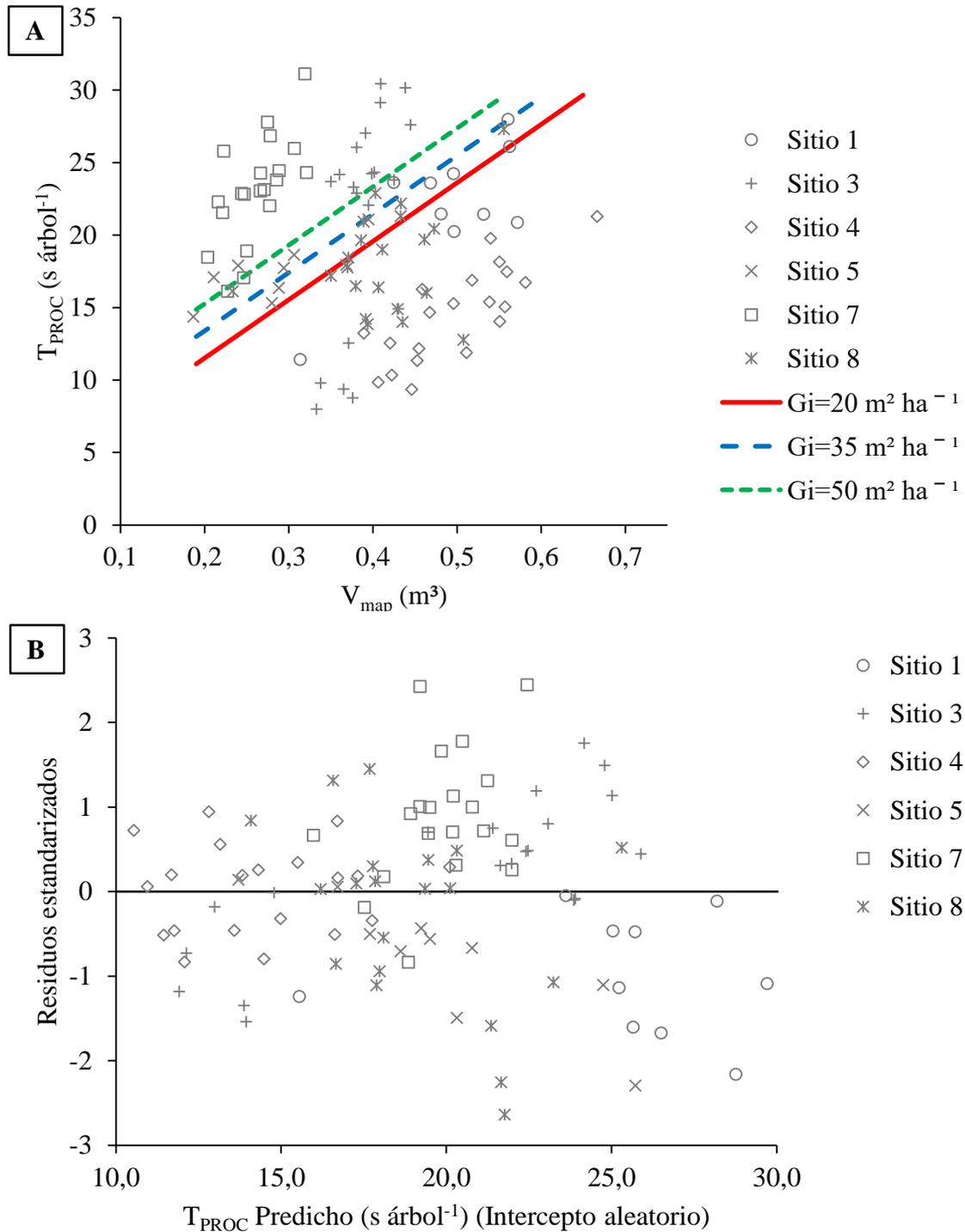


Figura 2.8: A. Efecto del área basal y el volumen medio aprovechado sobre el tiempo de desrame y trozado del fuste. G_i : área basal inicial; V_{map} : volumen medio de los árboles cosechados; T_{PROC} : tiempo medio de desrame y trozado. Las líneas consideran la elaboración de dos productos y el aprovechamiento del fuste hasta los 13,9 cm en punta fina. B. Residuos estandarizados del modelo lineal mixto ajustado (Modelo 7).

La liberación del ápice y las ramas (T_{LIB}) requirió en promedio 4,46 segundos (SD: 1,81 s), representando el 10,4% del TAE. Los efectos fijos del Modelo 8 (Cuadro 2.2, Ecuación [2.7]) alcanzaron a explicar el 55% de la variabilidad observada. En cambio, las diferencias explicadas por la combinación sitio-*harvester*-operario por medio del intercepto aleatorio elevaron el nivel de explicación al 87%. El T_{LIB} se incrementó en 3,44 segundos por cada 10 cm de aumento en el DPF_{min} . Este efecto se apreció bien en el sitio 4, que tuvo un T_{LIB} significativamente superior a los demás (6,6 s), debido a que al aprovechar el fuste hasta los 18 cm se incrementó el volumen de ramas y fuste que el *harvester* debió desechar para liberar el cabezal. A su vez el T_{LIB} disminuyó un 15% al incrementarse el V_{map} de 0,3 a 0,5 m³. Esto puede deberse a la frecuente rotura del fuste en los árboles más pequeños, incrementándose la cantidad de ramas que se deben descartar.

$$T_{LIB} = 0,9083 - 3,4496 * V_{map} + 0,3443 * DPF_{min} \quad [2.7]$$

El tiempo total efectivo fue estimado mediante la expresión [2.8], resultado de la suma de los efectos fijos de los modelos parciales ajustados, según la ecuación [2.1]. La Figura 2.9A presenta el comportamiento general del modelo, al variar únicamente el V_{map} . Los demás factores fueron fijados en sus valores medios para cada sitio (líneas grises, con intercepto aleatorio) o para una situación promedio (línea roja, sólo con efectos fijos). La Figura 2.9B presenta los residuos de este modelo compuesto, considerando el intercepto aleatorio de cada sitio y las características (V_{map} , G_i , I_N , N_{Prod} y DPF_{min}) de cada parcela. El efecto aleatorio del sitio resulta determinante para representar las diferencias en el TAE observado en las distintas situaciones.

$$TAE (s \text{ árbol}^{-1}) = 10,4324 + 47,4499 * V_{map} + 0,1254 * G_i + 78,0617 * G_i^{-1} + 1,3976 * I_N^{-1} + 5,3213 * N_{Prod} - 0,4277 * DPF_{min} \quad [2.8]$$

Donde: TAE: tiempo medio de actividades efectivas; V_{map} : volumen medio de los árboles cosechados; G_i : área basal inicial; I_N : intensidad de raleo; N_{Prod} : número de productos cosechados; DPF_{min} : diámetro límite de utilización.

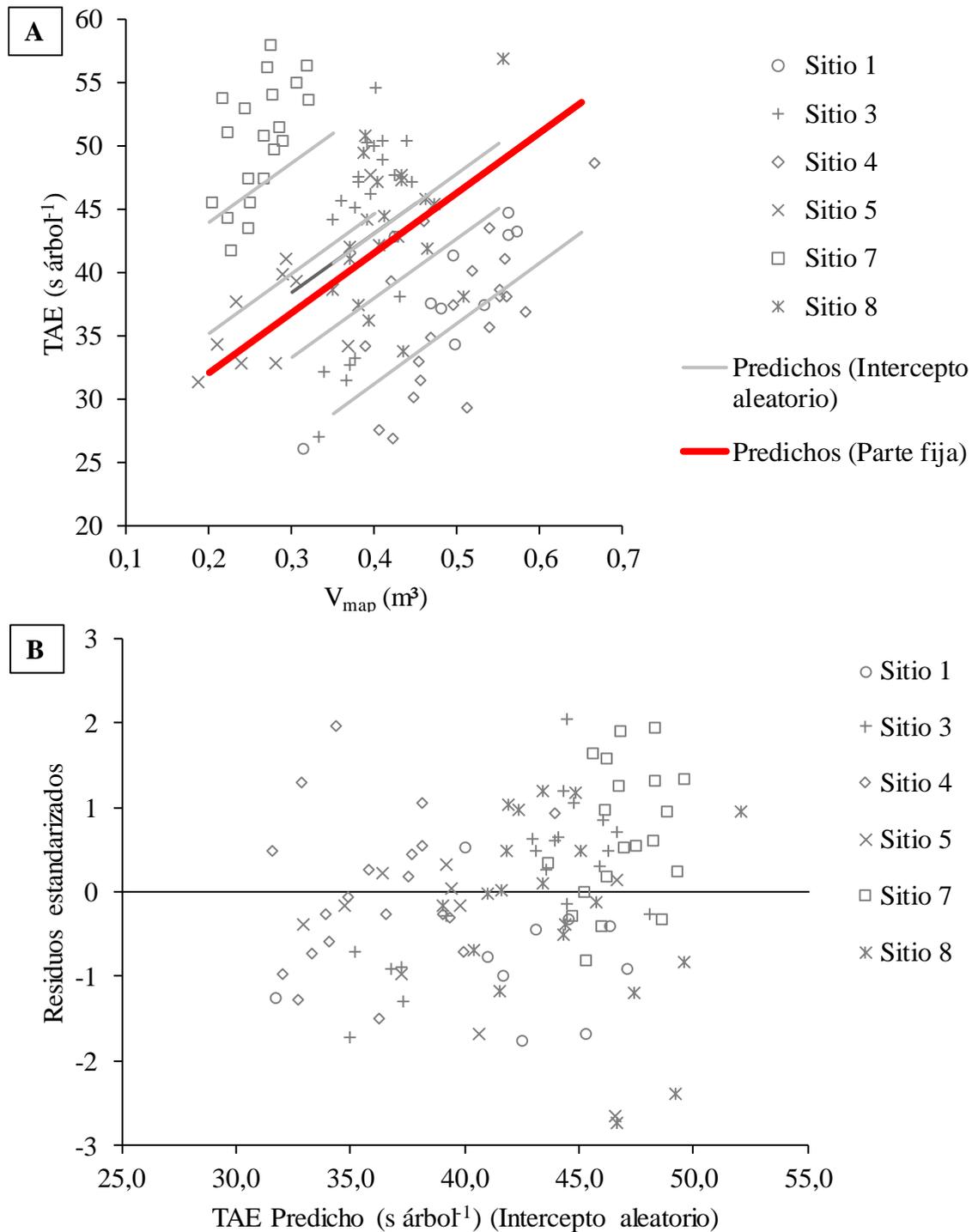


Figura 2.9: A. Estimación del tiempo total de actividades efectivas lograda por el modelo combinado. V_{map} : volumen medio de los árboles cosechados; TAE: tiempo total de actividades efectivas. Las demás variables fueron fijadas en sus valores medios para cada sitio (líneas grises) y para una situación media (línea roja). B. Residuos estandarizados del modelo combinado incorporando el intercepto aleatorio de cada sitio.

La Figura 2.10A presenta las productividades efectivas estimadas mediante la ecuación [2.9], al realizar el cociente entre el volumen medio de madera recuperada (V_{mRec} , estimado por medio del Modelo 2 - Cuadro 2.2) y el TAE calculado con el modelo general combinado [2.8]. Estas productividades son consistentes con las observadas en la muestra principal, y las diferencias existentes entre los distintos sitios son representadas por el efecto del intercepto aleatorio para cada combinación de sitio-*harvester*-operador. La productividad efectiva estuvo determinada en gran medida por el V_{map} , con una tendencia de crecimiento lineal para volúmenes menores a $0,3 \text{ m}^3$ y luego decreciente hasta alcanzar un máximo por sobre $0,5 \text{ m}^3$.

$$PEF (m^3 h^{-1}) = \frac{0,842 + 0,345 * \ln(V_{map}) - 0,011 * DPF_{min}}{\frac{TAE}{3600}} \quad [2.9]$$

Donde: PEF: productividad efectiva; TAE: tiempo medio de actividades efectivas; V_{map} : volumen medio de los árboles cosechados; DPF_{min} : diámetro límite de utilización.

La Figura 2.11A presenta una comparación de las productividades efectivas observadas respecto de las predichas por el modelo combinado, empleando las parcelas de la muestra de ajuste. El modelo combinado alcanza a explicar el 73% de la variabilidad en la productividad efectiva. Por otra parte, la Figura 2.11B presenta la relación entre la PEF observada y la PEF predicha por el modelo para las parcelas agrupadas en la muestra de validación independiente. Estas productividades predichas fueron calculadas empleando la expresión [2.9], a partir del V_{map} , G_i , I_n , N_{prod} y DPF_{min} de cada una de las parcelas que conformaron la muestra de validación. Para los sitios 2, 6 y 9 que no formaron parte de la muestra de ajuste, se utilizó la parte fija de los modelos. La relación entre la PEF observada respecto de la PEF predicha alcanzó un coeficiente de determinación de 0,70, con una pendiente cercana a 1. Esto indica que las predicciones del modelo son válidas para parcelas y situaciones distintas a la muestra de ajuste, sin presentar fuertes tendencias. Sin embargo, se destaca el sitio 2 donde la productividad predicha por el modelo fue un 26% inferior a la productividad observada. Esto destaca la importancia de la información aportada por el intercepto aleatorio.

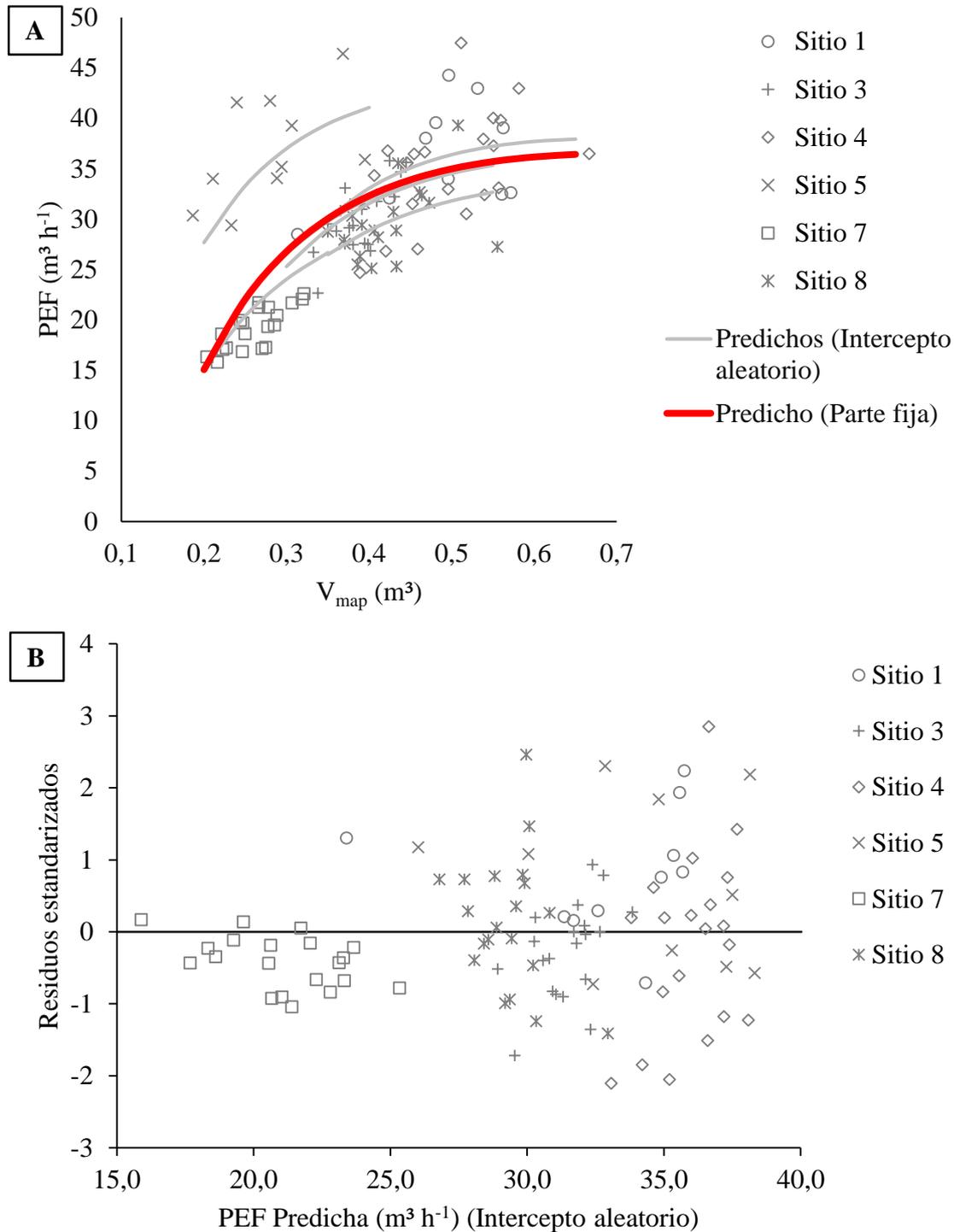


Figura 2.10: A. Estimación de la productividad efectiva lograda por el modelo combinado. V_{map} : volumen medio de los árboles cosechados; PEF: productividad efectiva. Las demás variables fueron fijadas en sus valores medios para cada sitio (líneas grises) y para una situación media (línea roja). B. Residuos estandarizados del modelo combinado incorporando el intercepto aleatorio de cada sitio.

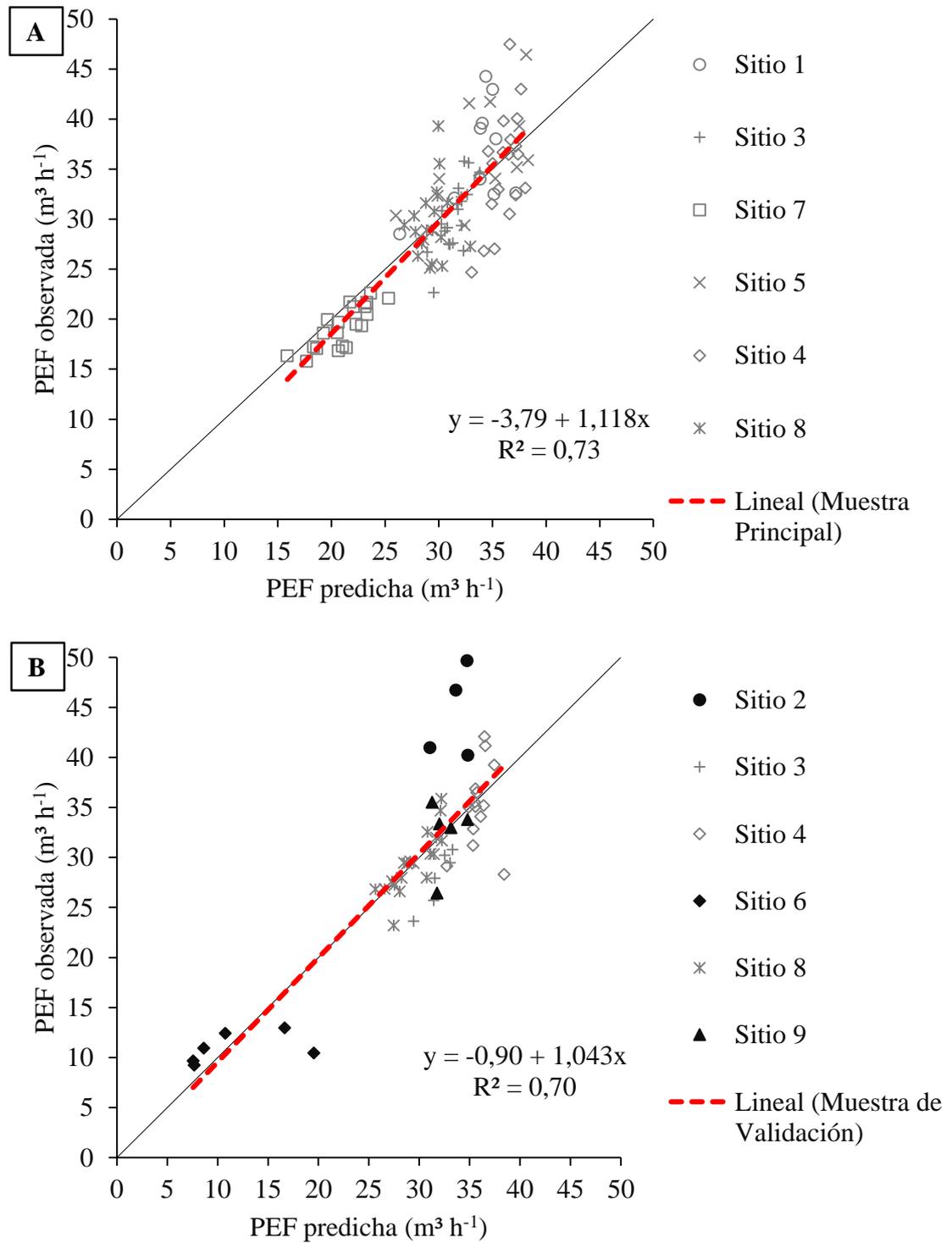


Figura 2.11: A. Comparación de la productividad efectiva estimada por el modelo respecto de la observada para la muestra principal. B. Comparación de la productividad efectiva estimada por el modelo respecto de la observada para la muestra de validación. Los puntos rellenos indican los sitios independientes de la muestra de ajuste. La línea de tendencia muestra el nivel de explicación y sesgo del modelo combinado para la PEF.

2.4. Discusión

Los sitios analizados en este estudio cubrieron un amplio rango de densidades iniciales, entre 400 y 1.100 árboles ha^{-1} (Figura 2.2). Estos resultan representativos de los segundos raleos realizados en la región, donde las densidades de plantación varían desde 1.111 árboles ha^{-1} hasta 1.666 árboles ha^{-1} y luego del primer raleo los rodales llegan al segundo raleo con una densidad de entre 500 y 900 árboles ha^{-1} (Martiarena et al., 2011).

El raleo implicó la cosecha de los árboles de menores dimensiones, generando un V_{map} 24,5% menor al V_{mi} de las parcelas. Este volumen medio aprovechado resultó similar al de otros raleos observados en la región (Hildt et al., 2018a) (Figura 2.4). La proporción de trozas triturables obtenida resultó compatible con las proporciones reportadas por Kohler et al. (2015) para *Pinus taeda* de Paraná y Santa Catarina en Brasil.

El incremento acelerado del tiempo de búsqueda (Figura 2.6A), observado para intensidades de cosecha inferiores al 40% coincide con la tendencia reportada por Laitila y Väätäinen (2013) para un *harvester* sobre orugas en bosques de *Pinus sylvestris* de Finlandia con una densidad media de 3.100 árboles ha^{-1} . Una reducción del 20% en la I_N implicó un incremento del 16% en el T_{BUSQ} , debido a la presencia de un menor número de árboles disponibles para la cosecha (Eliasson et al., 1999; Suadicani y Fjeld, 2001). Pese a que el modelo ajustado sólo alcanzó a explicar el 22% de la variabilidad observada, esto supera el nivel de explicación logrado en otros estudios que relacionaron esta actividad con el N_{ap} (Suadicani y Fjeld, 2001; Laitila y Väätäinen, 2013). Estos bajos niveles de explicación se deben a que el tiempo de búsqueda de los árboles también se encuentra afectado por otros factores difíciles de cuantificar: entrenamiento y experiencia del operario, presencia de obstáculos en el terreno como árboles caídos o rocas y la necesidad de realizar maniobras para alcanzar los árboles de las líneas más alejadas (Ovaskainen, Uusitalo y Sassi, 2006).

El tiempo requerido para la ubicación del cabezal alrededor de la base del fuste (T_{POS}) estuvo determinado por el V_{map} y el G_i (Figura 2.7A). Ambos factores indican que, al aumentar el tamaño de los árboles y el nivel de ocupación del rodal, aumenta también la complejidad de la tarea de capturar la base del fuste con las garras del cabezal y rotar este buscando la dirección correcta para orientar la caída del árbol sin dañar la masa remanente. Estudios anteriores analizaron al T_{BUSQ} y el T_{POS} como una misma actividad, sugiriendo que el tamaño de los árboles afectaba tanto a la búsqueda del árbol como al posicionamiento del cabezal (Suadicani y Fjeld, 2001; Suadicani y Nordfjell, 2003; Hildt et al., 2018a). En cambio, la filmación detallada de las operaciones permitió diferenciar entre ambas actividades, comprobando que el V_{map} no afecta al tiempo requerido para la localización del árbol dentro del rodal.

El incremento observado en el tiempo de corte y volteo al aumentar el V_{map} de los árboles fue un 60% superior al observado por otros autores para diferentes *harvesters* de ruedas de medianas dimensiones (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Niemistö et al., 2012; Hildt et al., 2018a). La elevada proporción de la variabilidad explicada por el efecto aleatorio de la combinación del sitio, *harvester* y operario indica que en cada situación se observó un tiempo medio de corte diferente. Debido a que el tamaño de los cabezales de corte no fue una limitante en relación con el diámetro de los árboles cosechados, es probable que estas diferencias se deban a la forma de trabajo de cada operador. Ovaskainen, Uusitalo y Väätäinen (2004) encontraron que cuando los operarios cortan los árboles y los desplazan a más de 3 m de distancia antes de iniciar el desrame y trozado, la etapa de corte y volteo requiere

un tiempo adicional de alrededor de 2 segundos. Esto coincide con la magnitud de la variabilidad explicada por el efecto aleatorio en el modelo.

La tasa de incremento del tiempo de desrame y trozado al aumentar el volumen de los árboles cosechados (Figura 2.8A) fue un 33% mayor a la observada por Niemistö et al. (2012) y Hildt et al. (2018a), pero un 40% inferior a la observada por Nurminen, Korpunen y Uusitalo, (2006). El incremento del tiempo de desrame y trozado al aumentar el área basal inicial se debió a la restricción impuesta por los árboles existentes a los movimientos de la grúa durante el trozado y la ubicación de las trozas cortadas (Niemistö et al., 2012). Por otra parte, el incremento del 29% en el tiempo de desrame y trozado, observado al incorporar la elaboración de un producto adicional, resulta superior al incremento del 10% observado por Nurminen, Korpunen y Uusitalo, (2006) y Hildt et al. (2018a) al realizar el trozado de dos productos en lugar de uno solo. La principal diferencia con ambos estudios radica en que estos sólo evaluaron *harvesters* con ruedas, diseñados para el trabajo forestal y equipados con grúas de barras paralelas, con extensión telescópica. En cambio, en este estudio dos sitios correspondieron a *harvesters* de diseño forestal, mientras que en los siete sitios restantes se emplearon equipos forestizados con una menor capacidad de maniobra. Esto puede ser la causa de que el conjunto de *harvesters* evaluados fueran, en promedio, más sensibles al incremento en el número de productos a ser clasificados. A pesar de incorporar un conjunto heterogéneo de *harvesters*, se alcanzó a explicar un 82% de la variabilidad del T_{PROC} únicamente por medio de los efectos fijos estudiados (Modelo 7 - Cuadro 2.2), superando al 62% alcanzado por Nurminen, Korpunen y Uusitalo (2006) para *harvesters* de diseño forestal o al 77% explicado por Laitila y Väätäinen (2013) para un único *harvester* forestizado.

El nivel de explicación alcanzado por el Modelo 8 (Cuadro 2.2) para el tiempo de liberación del ápice y las ramas (55%), resulta muy superior al 6% alcanzado en un estudio anterior donde no se consideró el diámetro en el que descarta el ápice como una variable predictora (Hildt et al., 2018a). Por otra parte, esta actividad no suele ser individualizada en los estudios de tiempos, quedando agrupada junto con el desrame y trozado o con el movimiento ocasional de trozas (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Niemistö et al., 2012). Su discriminación y análisis permitió ajustar un modelo específico para la actividad, reduciendo también la variabilidad no explicada en el tiempo de desrame y trozado.

La relación observada entre la productividad efectiva y el volumen medio de los árboles cosechados (Figura 2.10A) respondió a lo establecido por Visser y Spinelli (2012). Estos indican que la productividad crece hasta alcanzar un máximo para el tamaño de árbol más adecuado para el *harvester*, (*piece-size law*). Aunque el volumen de los árboles cosechados no permitió observarlo, para la cosecha de árboles más grandes se esperaría un incremento del tiempo total del ciclo y una reducción de la productividad debida a dificultades durante el volteo y el procesamiento (Hildt et al., 2018a). La estimación de la productividad efectiva por medio de la combinación de los efectos fijos de los modelos de tiempos parciales alcanzó a explicar un 70% de la variabilidad observada. En comparación, el modelo mixto de la productividad ajustado por Hiesl, Benjamin y Roth (2015) para un único *harvester* realizando raleos con diferentes intensidades en bosques mixtos de *Picea rubens* S. y *Abies balsamea* L. alcanzó un $R^2 = 0,36$ para los efectos fijos.

Este estudio consiguió relevar un conjunto amplio de situaciones, con distintos rodales y *harvesters* con características diferentes. Las productividades medias para cada sitio, reportadas en la Figura 2.5, se encuentran dentro del rango representado por los antecedentes existentes para la región. La productividad observada en el sitio 5

($36,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), resultó un 2,5% superior a la predicha por Hildt et al. (2018a) para un *harvester* similar, pero de menor potencia, realizando segundo raleo de *Pinus taeda*. Los sitios 3, 4 y 9 fueron cosechados por el mismo modelo de *harvester*, presentando una productividad media de $32,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sin diferencias significativas entre sitios ($p = 0,24$) y un 15% inferiores a las predichas para ese modelo de *harvester* trabajando en raleos (Mac Donagh et al., 2013). La productividad observada en el sitio 6 fue un 62,3% inferior a la predicha para un *harvester* similar con un operario más experimentado (Hildt et al., 2018a).

El área basal del rodal (G_i) tuvo un efecto negativo en la productividad provocando una reducción media del 4% al variar entre 22 y $53 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, con independencia del V_{map} . Esto fue resultado de su efecto contrapuesto sobre las actividades, reduciendo el T_{BUSQ} e incrementando el T_{POS} y el T_{PROC} al dificultar los movimientos de la grúa y requerir una mayor atención para evitar daños a la masa remanente (Figura 2.6A, Figura 2.7A y Figura 2.8A) (Fulvio y Bergström, 2013). Debido a que estos efectos se contraponen entre actividades, no han sido identificados por los estudios que realizaron ajustes directos para la productividad efectiva (Kärhä, Rönkkö y Gumse, 2004; Hiesl, Benjamin y Roth, 2015; Mederski et al., 2016). Por otra parte, el volumen medio de las parcelas estuvo relacionado con el N_i ($r = -0,57$), lo que implica que, en rodales densos, el menor volumen de los árboles aprovechados limitará la productividad (Mederski et al., 2016).

El aumento de la intensidad de raleo tuvo un efecto positivo en la productividad, generando un incremento medio del 12% al variar entre el 20 y 70% la proporción de los árboles cosechados, con una variación de $3,23 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para un V_{map} de $0,4 \text{ m}^3$. Este efecto estuvo relacionado con la reducción del tiempo de búsqueda (Figura 2.6A) al aumentar la intensidad de raleo. En este sentido, Laitila y Väätäinen, (2013) reportaron para bosques con una alta densidad y un V_{mi} de entre $0,023$ y $0,089 \text{ m}^3$, un incremento de la productividad de $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ al aumentar la intensidad de raleo de 800 a 2.400 árboles ha^{-1} . Por otra parte, Hiesl, Benjamin y Roth (2015) no reportan un incremento significativo en la productividad al incrementar la intensidad de raleo del 33 al 66%, en bosques mixtos con una densidad superior a los 1500 árboles h^{-1} . En este sentido, Mederski et al. (2016) advierten que el incremento en la productividad al aumentar el volumen total aprovechado sólo se da en aquellos sitios donde esto implica la cosecha de árboles más grandes. Por esta razón, el efecto de la intensidad de raleo sobre la productividad depende tanto de su efecto sobre el T_{BUSQ} como sobre el V_{map} , $0,11 \text{ m}^3$ mayor al aumentar del 30% al 70% la intensidad de raleo (I_V) (Modelo 1 – Cuadro 2.2).

El número de productos elaborados tuvo un fuerte efecto sobre la productividad. Para un volumen medio de $0,4 \text{ m}^3$ la incorporación de un producto al esquema de trozado redujo la productividad en un 11,5% ($3,71 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), debido al tiempo requerido para la ubicación de las trozas de cada nuevo producto. En este sentido, Nurminen, Korpunen y Uusitalo, (2006) y Hildt et al. (2018a) observaron que la elaboración de un nuevo producto en raleos puede causar una disminución de la productividad de entre 2 y 4%. El diámetro hasta el que se aprovechó el fuste también afectó a la productividad. Pese a que, para un volumen medio de $0,4 \text{ m}^3$, el tiempo total del ciclo solo se incrementó en un 12,2% al realizarse el despunte en 18 cm en lugar de en 6 cm, la productividad efectiva cayó en un 20,1% debido la pérdida del material triturable concentrado en el fuste por debajo del DPF_{min} (Modelo 2 – Cuadro 2.2).

Los modelos de tiempos parciales ajustados y combinados permitieron explicar el 73% de la variabilidad observada en la productividad efectiva para las distintas situaciones evaluadas y el 70% de la variabilidad observada en la muestra

independiente. Los efectos fijos consiguieron capturar los efectos medios del V_{map} , y de I_N , G_i , N_{Prod} , DPF_{min} , generales para todas las situaciones. Sin embargo, la explicación de las diferencias absolutas observadas entre las distintas combinaciones de sitio-*harvester*-operador recayó en el intercepto aleatorio aportado por el efecto aleatorio del sitio. Esto indica que las diferencias entre los distintos modelos de *harvesters* y en el nivel de habilidad de los operadores tiene una gran importancia. Futuros estudios a mayor escala deberían identificar estos factores y analizar de qué forma afectan a la productividad y a las distintas actividades que componen el ciclo de trabajo del *harvester*.

2.5. Conclusiones

La productividad de los *harvesters* dependió del volumen medio de los árboles cosechados. Este factor definió que el sitio 2 haya sido el más productivo, mientras que el sitio 6 fue el menos productivo. Además, el volumen medio se incrementó al aumentar la intensidad de raleo, disminuyendo, en cambio, al aumentar la densidad del rodal.

La disminución en la intensidad del raleo implicó una menor productividad, debido al incremento en el tiempo de búsqueda y por la cosecha de árboles con un menor volumen individual. Por otra parte, el incremento en el área basal tuvo efectos contrapuestos sobre las distintas actividades del *harvester*, reduciendo el tiempo de búsqueda de los árboles e incrementando el tiempo de posicionamiento del cabezal, desrame y trozado, con un efecto menor sobre la productividad para un mismo volumen medio.

La elaboración de un mayor número de productos requirió un mayor tiempo de desrame y trozado, reduciendo la productividad. El diámetro en punta fina hasta el que se aprovechó el fuste afectó al volumen de madera recuperado, reduciendo en menor medida el tiempo de trozado. Esto resulta de gran importancia para el análisis de las decisiones tomadas por las empresas forestales en las operaciones de raleo. En estas, el reducido volumen de los árboles combinado con un escenario de baja demanda para las trozas con diámetros menores a 18 cm en punta fina, y altos costos de transporte puede llevar a dos alternativas: a) reducción del número de productos, elaborando todas las trozas con diámetros menores como material triturable; b) elaboración del fuste hasta alcanzar un DPF_{min} de 18 cm, desechando el resto del fuste en el campo. Los resultados alcanzados demuestran que en el primer caso la productividad de la cosecha con *harvester* se verá incrementada, mientras que en la segunda opción la reducción en el tiempo de trozado no compensará la pérdida de volumen aprovechable, resultando en una menor productividad.

Los modelos ajustados consiguieron representar el efecto de estos factores, alcanzando a explicar el 70% de la variación observada en la productividad para todo el conjunto de sitios evaluados. Estos modelos tienen una aplicación directa en la estimación de la productividad de la cosecha con *harvester* durante la planificación de las operaciones de raleo. Además, sirven como línea base para la productividad del corte en segundos raleos con *harvester*, necesaria para el análisis comparativo de otras operaciones de cosecha. En ambos casos, su empleo en el sector forestal se verá favorecido por su incorporación en sistemas de soporte a las decisiones (DSS)

Los resultados alcanzados ponen en evidencia que, al momento de planificar las operaciones de raleo, estimar la capacidad de abastecimiento de un frente de cosecha, y negociar la tarifa del servicio, deben tenerse en cuenta otros factores además del volumen medio de los árboles cosechados. La intensidad de raleo, el número de

productos elaborados y el diámetro mínimo de utilización tienen el potencial de modificar la productividad del *harvester* y deben ser tenidos en cuenta para conseguir los mejores resultados en cada situación.

Capítulo 3

Factores que afectan a la productividad de la extracción con *forwarders* en segundo raleo

Los resultados de este capítulo se encuentran publicados en:

Hildt, E., Leszczuk, A., Mac Donagh, P.M., Schlichter, T. 2020. Time Consumption
Analysis of Forwarder Activities in Thinning. *Croatian Journal of Forest
Engineering*, 41(1):13-24.

Capítulo 3. Factores que afectan a la productividad de la extracción con *forwarders* en segundo raleo

3.1. Introducción

La extracción con *forwarders* es una actividad compleja, integrada por diferentes etapas, cada una afectada por distintos factores (Manner et al., 2016). El análisis teórico de esta actividad y la planificación de las operaciones de cosecha dependen de la existencia de modelos de tiempos y productividad precisos (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Lindroos y Wästerlund, 2014). Estos modelos, además de ser independientes de la situación en que fueron ajustados, deben considerar el efecto de las principales características de los rodales y la operación: distancia de extracción, intensidad de raleo y tipo de productos elaborados. Las aproximaciones más recientes a este problema desarrollaron modelos de productividad y tiempos por medio del análisis de datos de seguimiento o por medio de estudios de tiempos y movimientos realizados sobre varios *forwarder* trabajando en talas rasas y raleos (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Eriksson y Lindroos, 2014; Manner, Nordfjell y Lindroos, 2016). En general, la mayor parte de estos estudios fueron realizados en Europa. Sin embargo, los *forwarders* son utilizados en los bosques plantados del cono sur y resulta necesario desarrollar y ajustar modelos que describan estas operaciones.

En los raleos realizados en el noreste argentino, se suele cosechar entre el 40 y 50% de los árboles de menor diámetro o con forma deficiente (raleo por lo bajo). El volumen medio de los árboles aprovechados no suele superar los 0,4 m³, y el volumen total extraído ronda los 100 - 200 m³ ha⁻¹. Estos árboles son trozados en hasta tres productos (dos clases de trozas aserrables y una clase destinada a trituración), y la proporción de material triturable ronda entre 20 y 30% (Hildt et al., 2018a). Gran parte de estas operaciones se encuentran mecanizadas bajo el sistema *cut-to-length*. En este, un *harvester* voltea los árboles seleccionados, desrama y troza los fustes, mientras que un *forwarder* transporta las trozas hasta el camino. El éxito de los contratistas de raleo depende de un constante incremento en la productividad y una reducción continua de los costos (Mac Donagh et al., 2017).

La productividad de la extracción con *forwarders* depende del volumen de madera transportado en una carga y del tiempo insumido en el ciclo (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006). El ciclo de extracción está conformado por cinco actividades principales: tránsito vacío, carga, movimiento durante la carga, tránsito cargado y descarga (Manner et al., 2016). Además, otras actividades pueden ser consideradas, como el tránsito vacío y cargado sobre caminos. En base a su capacidad de carga, los *forwarders* pueden clasificarse en livianos (<10 t), medianos (10 a 14 t) y pesados (>14 t) (Stankić et al., 2012). Para una distancia de extracción de hasta 250 m, el tiempo insumido en el tránsito vacío y cargado no representa más del 25% del ciclo operacional. El 75% restante es requerido por el desplazamiento durante la carga, y por la operación de la grúa para la carga y la descarga (Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013; Manner et al., 2016). De esta forma, la distancia de extracción no es el principal factor explicativo de la productividad, siendo necesario analizar qué factores afectan la formación de la carga y la descarga (Stankić et al., 2012; Eriksson y Lindroos, 2014; Manner et al., 2006).

La carga puede ser dividida en dos actividades identificables: la operación de la grúa durante la carga de las trozas y el desplazamiento del *forwarder* entre las pilas de madera (Stankić et al., 2012, Strandgard, Mitchell y Acuna, 2017). El tiempo insumido en el desplazamiento durante la carga depende de la densidad de madera

acumulada en la vía de saca, también conocida como concentración de trozas ($\text{m}^3 \text{100 m}^{-1}$) (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006). La concentración total de trozas está determinada por el volumen de madera existente en el rodal y por la intensidad de raleo. Esta puede calcularse como el cociente entre el volumen de madera cosechada ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y la longitud de la red de vías de saca (m ha^{-1}) (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006).

Manner, Nordfjell y Lindroos (2013), analizando el proceso de carga bajo condiciones controladas, hallaron que el tiempo insumido en el desplazamiento entre pilas disminuye cuando se incrementa la concentración de trozas del producto extraído. De la misma forma, este tiempo también disminuye cuando se incrementa el número de productos extraídos de forma conjunta en una misma carga. Por otra parte, Manner et al. (2016) encontraron que la distancia de desplazamiento durante la carga explica el 57,2% de la variabilidad en el tiempo total del ciclo. En contraste, la distancia de extracción sólo alcanza a explicar el 49,5% de la variabilidad total.

El tiempo insumido en la carga es afectado por el tipo de producto cargado (trozas aserrables y triturables de diferente longitud), por el volumen de madera acumulada en cada pila, el número de productos cargados de forma simultánea y el volumen transportado en cada ciclo de extracción (Nurminen, Korpunen y Uusitalo., 2006; Ghaffarian, Stampfer y Sessions., 2007; Stankić et al., 2012). Väätäinen et al. (2006) encontraron que el tiempo insumido en la carga disminuye cuando el volumen de las pilas de trozas se incrementa, lo que resulta en un aumento de la productividad. Por otra parte, el volumen de la carga está condicionado por el diámetro y longitud de los productos extraídos (Stankić et al., 2012). Nurminen, Korpunen y Uusitalo., (2006) encontraron que el tiempo necesario para la carga de 1 m^3 de madera es un 55% inferior para trozas aserrables en comparación con trozas triturables, con menor volumen individual. Además, la carga de un único producto requiere un tiempo 42% menor que la carga combinada de dos o más productos.

Los modelos predictivos son herramientas útiles para estimar la productividad de las operaciones de raleo. Estos pueden estimar el efecto de la intensidad de cosecha, el número de productos elaborados, el tamaño de las trozas, la densidad de vías de saca y la distancia de extracción. Nurminen, Korpunen y Uusitalo, (2006) han desarrollado modelos predictivos del tiempo insumido en las actividades para un grupo de *forwarders* trabajando en raleos y talas rasas en Finlandia. Estos alcanzan a explicar el 59% de la variabilidad en el tiempo de carga estimando el efecto fijo de cada producto transportado. Stankić et al. (2012) analizando una base de datos de operaciones de cosecha en Croacia, determinaron que el número de trozas transportadas explica el 53% de la variabilidad en el tiempo de carga y descarga. Eriksson y Lindroos (2014) analizaron datos de seguimiento de operaciones en Suecia, consiguiendo explicar el 33,4% de la variación en la productividad de la extracción en raleos como una función de la distancia de extracción, el volumen medio de los árboles, el volumen total cosechado, las características del terreno y el número de productos elaborados. Proto et al. (2018a) estudiaron dos *forwarders* medianos en raleos de Italia, explicando el 59% de la variabilidad del tiempo de carga (carga y desplazamiento entre pilas) debido al efecto de la distancia del desplazamiento durante la carga, y al número y volumen medio de las trozas cargadas. El uso combinado del seguimiento por medio de sistemas de navegación satelital (GNSS) y la grabación en video con cámaras a bordo de la maquinaria posibilita el desarrollo de estudios de tiempo de alta precisión, con un análisis más detallado de cada actividad, permitiendo el desarrollo de mejores modelos predictivos (Strandgard et al., 2017).

El objetivo del estudio desarrollado en este capítulo es determinar como la concentración de trozas para cada producto transportado y su tamaño medio afectan a la duración de las actividades del *forwarder* y a su productividad. Para ello se estudió a campo un conjunto de operaciones de raleo realizadas con *forwarders* en bosques plantados de pino en el noreste argentino. Se ajustaron modelos de actividades parciales que en conjunto conforman un modelo predictivo general.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Área de estudio

Este estudio fue realizado en segundos raleos de *Pinus taeda* localizados en el noreste de la República Argentina. Fueron evaluados dos sitios diferentes en el departamento de Santo Tomé (Provincia de Corrientes) y tres sitios en los departamentos de Iguazú y Eldorado (Provincia de Misiones) (Figura 3.1). Los raleos fueron realizados en bosques plantados de entre 11 y 12 años, que contaban con un manejo orientado a la producción de trozas aserrables y triturables. El clima en los sitios de estudio es subtropical sin estación seca. El terreno tiene un relieve suavemente ondulado, con una buena capacidad de soporte. El estudio se realizó en periodos con buenas condiciones meteorológicas, sin lluvias que afectaran la faena de raleo.

Se empleó el sistema de cosecha con corte a medida, donde un *harvester* cortó y trozó los árboles, mientras que un *forwarder* transportó los productos hasta el borde del camino. En el sitio 1 se evaluó un *forwarder* John Deere 1510E, clasificado como un *forwarder* pesado (Stankić et al., 2012). En el sitio 2 fue evaluado un *forwarder* mediano, John Deere 1410D. En los sitios 3 y 4 se evaluó la extracción con *forwarders* Bertotto 160TH, equipos livianos de fabricación local. En el sitio 5 trabajó un *forwarder* liviano Timberjack 230D. Las características técnicas de estas máquinas evaluadas se presentan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1: Características de los *forwarders* evaluados.

	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5
Tamaño del <i>forwarder</i>	Pesado	Mediano	Liviano	Liviano	Liviano
Modelo del <i>forwarder</i>	John Deere 1510E	John Deere 1410D	Bertotto 160TH	Bertotto 160TH	Timberjack 230D
Modelo de la grúa	CF785	CF785	PenzSaur 5,53W	Guerra 67A	Kesla 305
Potencia (kW)	155,8	129	119,3	119,3	119,3
Tracción	8×8	8×8	4×4	4×4	4×4
Masa (kg)	18.630	17.500	11.700	11.700	10.718
Capacidad de carga (kg)	15.000	14.000	9.000	9.000	7.250

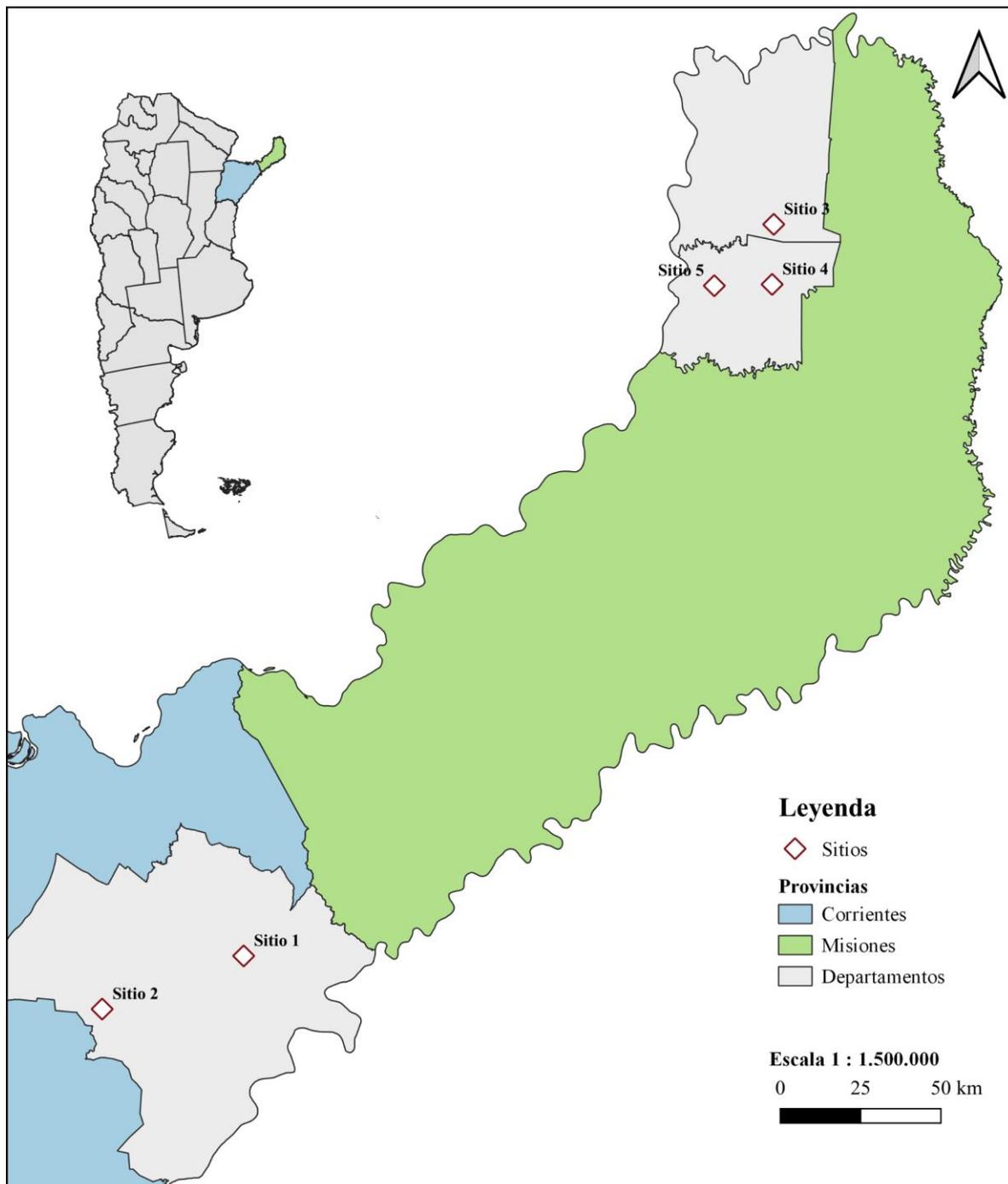


Figura 3.1: Distribución de los sitios donde se evaluó la extracción con *forwarder*.

La Cuadro 3.2 presenta las características de los rodales antes y después del raleo. La intensidad de raleo varió, aprovechándose entre el 48 y el 54% de los árboles en los distintos sitios. En cada sitio se elaboró un conjunto de productos diferente. Sin embargo, los *forwarders* transportaron un único producto en cada ciclo de extracción. En el sitio 2 la distancia entre las líneas de árboles fue de 4 m y se realizó un raleo 100% selectivo, sin cortar una fila de árboles para habilitar la vía de saca. El *forwarder* mediano realizó la extracción ingresando por un entrelineo, cada 5 líneas de plantación, con una distancia de 20 m entre vías de saca. En los demás sitios la distancia entre líneas fue de 3 m y los raleos realizados implicaron la cosecha completa de la quinta línea, abriendo una vía de saca para permitir el ingreso del *forwarder*. En estos, la distancia entre vías de extracción fue de 15 m. La Figura 3.2 muestra, como ejemplo, un detalle parcial de la red de caminos y la estructura de vías de saca existente en el sitio 3.

Cuadro 3.2: Características de los rodales evaluados en cada sitio.

	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5
Antes del raleo					
Densidad (árboles ha ⁻¹)	600	600	735	933	787
Área basal (m ² ha ⁻¹)	33	35	38	44	37
Volumen medio (m ³)	0,515	0,500	0,383	0,449	0,433
Después del raleo					
Densidad (árboles ha ⁻¹)	276	300	368	426	409
Área basal (m ² ha ⁻¹)	16	17	22	23	28
Volumen medio (m ³)	0,553	0,550	0,290	0,523	0,685
Características de la masa cosechada					
Madera cosechada (m ³ ha ⁻¹)	156	135	175	196	60
Tamaño de árbol medio (m ³)	0,48	0,45	0,48	0,34	0,16
Productos					
Aserrable 3,75 m			X		
Aserrable 3,15 m	X	X	X	X	X
Aserrable 2,5 m	X	X		X	X
Triturable	X		X		X

3.2.2. Estudio de tiempos

En cada sitio evaluado se realizó un estudio de tiempos y movimientos. En estos se evitó interferir en la forma de trabajo de los operarios y en las instrucciones recibidas por los contratistas de cosecha. Las actividades realizadas por los *forwarders* fueron registradas por medio de cámaras digitales Genius DVR FHD590 instaladas a bordo. Estas capturaron los movimientos de la grúa durante la carga y descarga de las trozas (Strandgard et al., 2017). El video generado fue analizado con ayuda de una herramienta desarrollada de acuerdo con las especificaciones de Niemistö et al. (2012). Esto permitió medir con precisión la duración de todas las actividades realizadas durante el ciclo de extracción (Cuadro 3.3). En este estudio las paradas y actividades no productivas no fueron consideradas, siendo identificadas y excluidas del análisis (Berg et al., 2017). Los desplazamientos de los *forwarders* fueron registrados por medio de un receptor portátil GNSS modelo Garmin MAP 62s (Strandgard y Mitchell, 2015; Apăfăian, Proto y Borz, 2017) (Figura 3.2). Este fue configurado para registrar la posición del *forwarder* cada 3 segundos. A su vez, la cámara fue sincronizada con el receptor GNSS de forma que resultó posible determinar la distancia recorrida durante cada actividad.

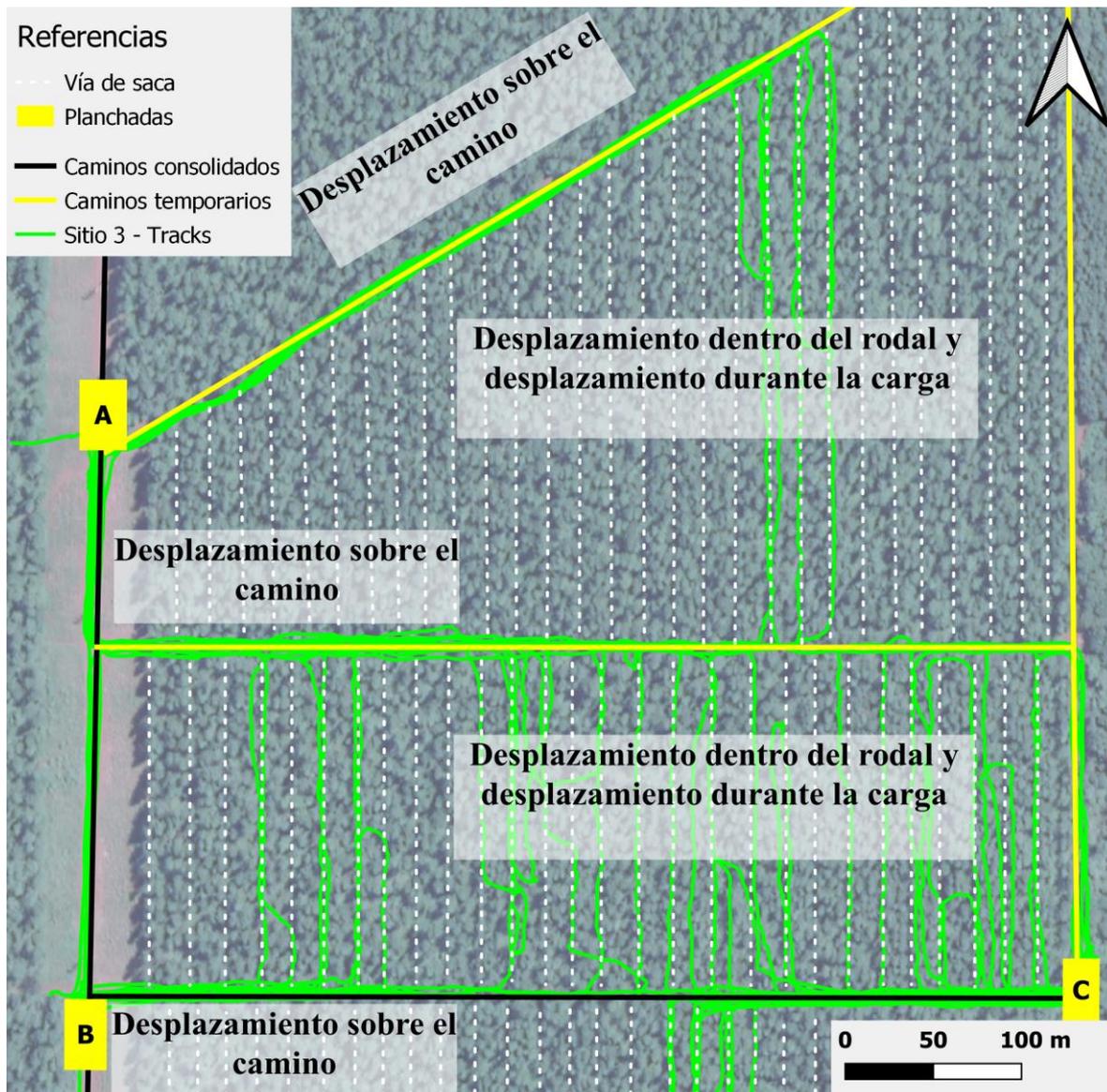


Figura 3.2: Detalle parcial de la red de caminos, estructura de las vías de saca y recorrido realizado por el *forwarder* en el sitio 3.

El número de trozas cargadas en cada ciclo fue contado a partir de las imágenes de la grúa registradas en video. El volumen total de la carga (P_L) fue estimado como el producto entre el número de trozas cargadas y el volumen medio de las trozas del producto transportado (V_t). Este fue obtenido de los reportes de producción del *harvester* que realizó el trozado de la madera (Apáñáian et al., 2017). La concentración de trozas sobre la vía de saca para cada producto extraído (C_t), expresada para 100 metros de vía ($m^3 100 m^{-1}$), fue calculada como el cociente entre la carga transportada en un ciclo determinado y la distancia recorrida por el *forwarder* durante la carga (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013).

Cuadro 3.3: Definición de las actividades realizadas por los *forwarders*.

Actividad	Abreviatura	Definición
Viaje vacío sobre camino	T _{VVC}	Comienza cuando el <i>forwarder</i> vacío inicia el movimiento desde la playa de acopio y finaliza cuando abandona el camino para introducirse en el rodal.
Viaje vacío en el rodal	T _{VVR}	Comienza cuando el <i>forwarder</i> vacío ingresa al rodal y finaliza cuando la grúa comienza a moverse para cargar la primera pila de trozas.
Carga	T _{CARGA}	Comienza cuando el operador inicia el movimiento de la grúa para cargar las trozas y finaliza cuando estas son depositadas en la caja del <i>forwarder</i> . La duración de esta actividad incluye todos los ciclos de carga realizados por la grúa durante el ciclo de extracción.
Desplazamiento durante la carga	T _{MC}	Comienza cuando el <i>forwarder</i> inicia el movimiento hacia una nueva pila, finalizando cuando la grúa reanuda la carga.
Viaje cargado en el rodal	T _{VCR}	Comienza cuando el <i>forwarder</i> cargado inicia su desplazamiento hacia el exterior del rodal, finalizando cuando alcanza el camino.
Viaje cargado sobre camino	T _{VCC}	Comienza cuando el <i>forwarder</i> cargado inicia el tránsito sobre el camino, finalizando cuando este alcanza la playa de acopio.
Descarga	T _{DESC}	Comienza cuando el <i>forwarder</i> alcanza la playa de acopio e inicia la descarga de las trozas, finalizando cuando todas las trozas han sido descargadas en la zona de acopio, o transferidas a un camión.

3.2.3. Análisis de los datos

Las cuatro actividades vinculadas al desplazamiento del *forwarder* sobre los caminos y dentro del rodal fueron analizadas considerando a la velocidad de tránsito como una constante para cada actividad (Stankić et al., 2012). De esta forma, una velocidad media fue calculada para cada actividad (Manner et al., 2016). La duración de cada actividad luego puede ser estimada como el cociente entre las distancias recorridas y la velocidad media de desplazamiento de la actividad.

Para las actividades de carga, desplazamiento durante la carga y descarga, se ajustaron modelos lineales mixtos con intercepto aleatorio (Hiesl, Benjamin y Roth, 2015). En estos, la duración de la actividad (min ciclo^{-1}) fue explicada por diferentes variables independientes, como el volumen de la carga transportada, el volumen medio de las trozas y la concentración de trozas para el producto transportado. El sitio fue incluido en los modelos como un factor aleatorio, que representa el efecto combinado de la máquina y su operador. Este, además, ayudó a explicar la estructura de anidamiento de los datos (Niemistö et al., 2012). Los modelos fueron ajustados por medio del método de máxima verosimilitud (ML), utilizando la función “lme” del *software* R (Bates et al., 2015; Harrison et al., 2018). Solo los factores significativos ($p < 0,05$) fueron incluidos en los modelos. El R^2 marginal (basado en el aporte de los efectos fijos) y el R^2 condicional (basado en el aporte conjunto de los efectos fijos y aleatorios) fue calculado utilizando el paquete “piecewiseSEM” para ecuaciones estructurales en R (Lefcheck, 2016). La duración de las actividades fue transformada aplicando el logaritmo natural para satisfacer los requerimientos de homocedasticidad y normalidad de los modelos mixtos.

El tiempo total de actividades efectivas (TAE) del ciclo de extracción fue estimado sumando las duraciones predichas por los modelos para cada una de las actividades [3.1]. A las estimaciones obtenidas con los distintos modelos se les aplicó la transformación anti-logarítmica. La productividad efectiva (PEF) fue estimada como el cociente entre la carga transportada y el tiempo total de actividades efectivas (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006).

$$TAE = \frac{D_{SC}}{Vel_{VVC}} + \frac{D_{SR}}{Vel_{VVR}} + e^{\ln(T_{CARGA})} + e^{\ln(T_{MC})} + \frac{D_{SR}}{Vel_{VCR}} + \frac{D_{SC}}{Vel_{VCC}} + e^{\ln(T_{DESC})} \quad [3.1]$$

Donde: TAE = Tiempo total de actividades efectivas, (min ciclo⁻¹); D_{SC} = Distancia de desplazamiento sobre el camino, (m); D_{SR} = Distancia de extracción en el rodal, (m); Vel_{VVC} = Velocidad del desplazamiento vacío sobre el camino, (m min⁻¹); Vel_{VVR} = Velocidad del desplazamiento vacío en el rodal, (m min⁻¹); Vel_{VCR} = Velocidad del desplazamiento cargado en el rodal, (m min⁻¹); Vel_{VCC} = Velocidad del desplazamiento cargado sobre el camino, (m min⁻¹); T_{CARGA} = Tiempo insumido en la carga, (min ciclo⁻¹); T_{MC} = Tiempo de desplazamiento durante la carga, (min ciclo⁻¹); T_{DESC} = Tiempo insumido en la descarga, (min ciclo⁻¹); e = El valor de la constante e ≈ 2,71828; ln(...) = El logaritmo natural.

3.3. Resultados

Los estudios de tiempos realizados alcanzaron en total 70 h de trabajo efectivo y 29,6 h de demoras o actividades no productivas. De esta forma, la eficiencia media de las operaciones observadas fue del 70%. El Cuadro 3.4 presenta el tiempo total registrado en cada situación, desglosado entre actividades efectivas y actividades complementarias o paradas. En este tiempo los equipos completaron un total de 136 ciclos de extracción, con un volumen transportado total de 1.684 m³. De este volumen, el 83,5% correspondió a productos aserrables.

Cuadro 3.4: Tiempo total registrado, tiempo de actividades efectivas y número de ciclos evaluados.

Tamaño del <i>forwarder</i>	Liviano	Mediano	Pesado
Duración del estudio (días)	9	3	5
Tiempo registrado (horas)	46:30	14:54	38:12
Total, de actividades efectivas (horas)	35:30	8:54	25:36
Paradas y act. complementarias (horas)	11:00	6:00	12:36
Eficiencia (%)	76	60	67
Número de cargas	67	28	41

El Cuadro 3.5 presenta el tiempo medio por ciclo insumido en cada actividad, discriminado según el tamaño del *forwarder*. A continuación, se presenta un análisis detallado de estas actividades.

3.3.1. Desplazamiento sobre el camino

El tiempo medio insumido en el desplazamiento en vacío sobre el camino, desde la zona de acopio hasta el rodal (T_{VVC}) fue de 1,61 min para una distancia promedio de 130 m (Cuadro 3.5). Estos valores variaron entre sitios debido a las diferencias en la ubicación de las zonas de acopio en cada rodal. La velocidad media alcanzada por los *forwarders* vacíos fue de 71,6 m min^{-1} , variando entre 51,2 y 92,8 m min^{-1} entre diferentes sitios. Esta actividad representó en promedio un 5,4% del tiempo total de actividades efectivas, disminuyendo al incrementarse el tamaño del *forwarder*.

El viaje cargado sobre el camino (T_{VCC}) requirió un tiempo medio de 1,58 min por ciclo. En esta actividad la velocidad media alcanzada fue de 75,7 m min^{-1} , variando entre 61,2 y 90 m min^{-1} para los diferentes sitios. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas para la velocidad alcanzada entre *forwarders* de diferente tamaño. Esta actividad representó el 5,4% del tiempo total efectivo.

Cuadro 3.5: Resumen de los estudios de tiempos para las distintas actividades y los diferentes tamaños de *forwarder*.

Tamaño del <i>forwarder</i>		Liviano		Mediano		Pesado	
		Promedio \pm SD	%	Promedio \pm SD	%	Promedio \pm SD	%
Actividad (min ciclo ⁻¹)	T_{VVC}	2,47 \pm 1,51	7,7	0,57 \pm 0,44	3,0	1,04 \pm 1,09	2,7
	T_{VVR}	1,6 \pm 1,34	5,0	2,2 \pm 1,43	11,4	4,26 \pm 3,49	11,1
	T_{MC}	3,4 \pm 2,2	10,6	1,54 \pm 0,8	8,0	4,9 \pm 2,87	12,8
	T_{CARGA}	12,53 \pm 6,74	39,1	6,64 \pm 1,48	34,4	12,95 \pm 3,02	33,7
	T_{VCR}	2,17 \pm 1,49	6,8	2,89 \pm 1,88	15,0	3,3 \pm 2,96	8,6
	T_{VCC}	2,43 \pm 1,37	7,6	0,59 \pm 0,21	3,1	1,07 \pm 1,07	2,8
	T_{DESC}	7,45 \pm 3,41	23,2	4,83 \pm 1,43	25,1	10,9 \pm 2,74	28,4
Carga transportada (P_L) (m ³ ciclo ⁻¹)		8,28 \pm 2,66		13,59 \pm 3,11		19,06 \pm 4,43	
Distancia sobre el camino (D_{sc}) (m)		198,4 \pm 154,1		43,1 \pm 41,1		85,7 \pm 104,0	
Distancia de extracción (D_{SR}) (m)		104,9 \pm 87,8		186,1 \pm 137,1		227,3 \pm 204,5	
Tiempo total efectivo (TAE) (min ciclo ⁻¹)		31,3 \pm 9,67		19 \pm 4,91		38,21 \pm 8,97	
Productividad efectiva (PEF) (m ³ h ⁻¹)		17,22 \pm 6,7		44,02 \pm 10,42		30,49 \pm 6,22	

Donde: T_{VVC} : Tiempo de viaje vacío sobre el camino; T_{VVR} : Tiempo de viaje vacío en el rodal; T_{MC} : Tiempo de desplazamiento durante la carga; T_{CARGA} : Tiempo de carga; T_{VCR} : Tiempo de viaje cargado en el rodal; T_{VCC} : Tiempo de viaje cargado sobre el camino; T_{DESC} : Tiempo de descarga; SD: desvío estándar.

3.3.2. Desplazamiento dentro del rodal

El desplazamiento del *forwarder* vacío dentro del rodal (T_{VVR}) requirió en promedio 2,64 min por ciclo, para una distancia media de extracción de 166 m. Esta actividad representó en promedio el 8,2% del tiempo total efectivo. Los *forwarders* alcanzaron una velocidad media de 56,9 m min⁻¹, variando entre 46,4 y 89,2 para los distintos sitios, sin diferencia significativas explicadas por el tamaño del *forwarder*.

El tiempo medio requerido para el desplazamiento del *forwarder* cargado dentro del rodal (T_{VCR}) fue de 2,68 min, para una distancia media de 159 m. Esta actividad representó el 8,4% del tiempo de actividades efectivas. La velocidad media alcanzada por los *forwarders* fue de 52,2 m min⁻¹, sin diferencias significativas explicadas por el tamaño del equipo. Esta velocidad tampoco mostró correlación significativa con el volumen de trozas transportado. Por otra parte, el *forwarder* de mayor antigüedad, empleado en el sitio 5, sólo alcanzó una velocidad de tránsito cargado de 23,3 m min⁻¹.

3.3.3. Carga

La operación de la grúa durante la carga requirió en promedio 11,3 min por cada ciclo de extracción. Esta fue la actividad más importante, representando el 35,4% del tiempo de actividades efectivas, variando entre el 25 y el 41% para los diferentes sitios. En relación con el volumen de madera cargada, la carga requirió en promedio 0,91 min m⁻³, variando entre 0,5 y 1,8 min m⁻³ entre sitios. El tiempo requerido por esta actividad se incrementó en un 96% cuando el volumen cargado en el *forwarder* pasó de los 7 m³ (*forwarder* liviano) a los 14 m³ (*forwarder* mediano). Por otra parte, este disminuyó cuando el volumen de las trozas cargadas (V_t) se incrementó. El tiempo de carga mínimo se alcanzó al trabajar con las trozas más grandes, con un $V_t = 0,17$ m³ troza⁻¹. El tamaño de las trozas aserrables superó los 0,1 m³ mientras que las trozas triturables no alcanzaron los 0,05 m³ (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6: Características de los productos extraídos por cada tipo de *forwarder*.

Tamaño del <i>forwarder</i>	Liviano		Mediano		Pesado	
	C_t	V_t	C_t	V_t	C_t	V_t
Aserrable 2,5 m	5,08 ± 1,81	0,10	22 ± 7,05	0,11	17,68 ± 3,85	0,10
Aserrable 3,15 m	7,07 ± 3,82	0,12	23,87 ± 5,16	0,15	16,65 ± 4,44	0,15
Aserrable 3,75 m	10,5 ± 3,91	0,13				
Triturable	9,32 ± 5,12	0,04			5,95 ± 0,92	0,05

Donde: C_t : Concentración de trozas (m³ (100 m)⁻¹), indicando su valor medio ± desvío estándar; V_t : volumen medio de las trozas (m³ troza⁻¹).

El modelo ajustado para esta actividad explicó el 56% de la variabilidad observada en el tiempo de carga (Cuadro 3.7 – Modelo 1, Ecuación [3.2]). Se aplicó el logaritmo natural para satisfacer el supuesto de normalidad de los residuos. El tiempo necesario para la carga estuvo explicado por el tamaño de las trozas cargadas y el volumen total de la carga.

$$\ln(T_{CARGA}) = -1,426 + 0,9726 * \ln(P_L) - 0,5955 * \ln(V_t) \quad [3.2]$$

Donde: T_{CARGA} = Tiempo de carga, (s); P_L = Volumen total de la carga, (m³); V_t = Volumen medio de las trozas transportadas, (m³).

La Figura 3.3A muestra el comportamiento del modelo ajustado en función a la capacidad de carga del *forwarder*, considerando únicamente los efectos fijos. Un *forwarder* mediano (con una capacidad de carga de 14 m³), cargando trozas aserrables de 2,5m ($V_t = 0,11 \text{ m}^3$) requiere un tiempo de carga 20% mayor respecto a cuando carga trozas aserrables de 3,15 m ($V_t = 0,15 \text{ m}^3$). De la misma forma, la carga de trozas triturables ($V_t = 0,05 \text{ m}^3$) insuere un tiempo 92% mayor que las trozas aserrables de 3,15 m (Figura 3.3A). El intercepto aleatorio correspondiente al efecto combinado de los factores agrupados en el sitio (características particulares del *forwarder*, habilidades del operador y características del terreno) explicó 0,42 min de la variabilidad del intercepto del modelo, incrementando el nivel de explicación al 97%. La Figura 3.3B presenta las estimaciones generadas por el modelo para los diferentes sitios, agrupados según el tamaño de los *forwarders* empleados, fijando la capacidad de carga en los valores medios observados para cada equipo.

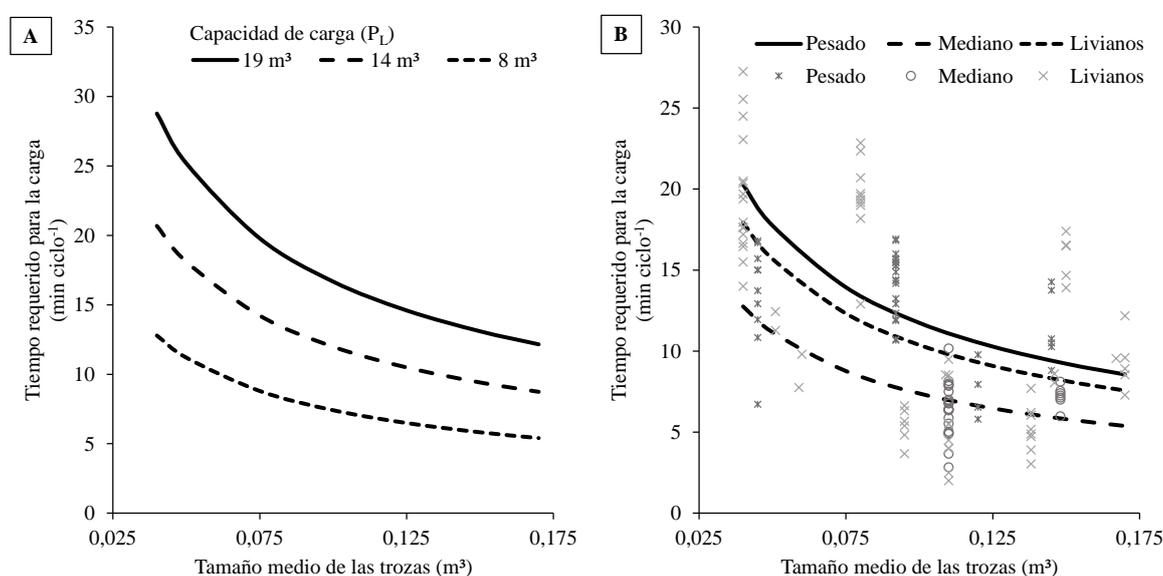


Figura 3.3: A. Variación del tiempo de carga requerido para diferentes tamaños de carga y distintos tamaños de trozas. B. Predicciones del modelo ajustado, incluyendo el intercepto aleatorio para las distintas situaciones evaluadas agrupadas según el tamaño del *forwarder*. La capacidad de carga se fijó en los valores medios observados para cada equipo.

3.3.4. Desplazamiento durante la carga

El tiempo medio requerido para el desplazamiento del *forwarder* entre las pilas cargadas (T_{MC}) fue de 3,45 min. Esta actividad representó el 10,8% del tiempo total efectivo. El desplazamiento requirió en promedio 0,28 min m⁻³ de trozas cargadas, variando entre 0,11 y 0,71 min m⁻³ entre sitios. Los *forwarders* recorrieron en promedio 117,8 m hasta completar la carga. Sin embargo, esta distancia fue diferente para cada situación y producto transportado, dependiendo de la concentración de trozas existente para cada producto en cada rodal. Las trozas aserrables tuvieron una concentración superior a los 10 m³ (100 m)⁻¹, mayor a la concentración de las trozas triturables (Cuadro 3.6). El tiempo de desplazamiento durante la carga aumentó al disminuir la concentración de trozas del producto transportado. La disminución en la concentración de trozas desde 15 m³ (100 m)⁻¹ a 10 m³ (100 m)⁻¹ incrementó en un 36,6% el tiempo de desplazamiento entre pilas. Sin embargo, este aumento no siguió

una relación lineal. Para concentraciones inferiores a los $5 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$ se observó un rápido incremento en el tiempo de desplazamiento entre pilas (Figura 3.4A).

El modelo ajustado (Cuadro 3.7 – Modelo 2, Ecuación [3.3]) explicó el 50% de la variabilidad observada en el tiempo de desplazamiento durante la carga. Este modelo sólo incorporó el efecto fijo de la distancia recorrida durante la carga, expresado como el cociente entre el volumen de la carga y la concentración de trozas del producto transportado. La Figura 3.4A presenta el comportamiento de este modelo para concentraciones de trozas y volúmenes de la carga. A Por otra parte, el efecto aleatorio del sitio explicó una variación de 0,25 min en el intercepto del modelo, elevando el nivel de explicación general al 67%. La Figura 3.4B presenta los resultados del modelo incorporando el intercepto aleatorio correspondiente a las características propias de cada situación evaluada.

$$\ln(T_{MC}) = -2,5239 + 0,7698 * \ln(P_L / (\frac{C_t}{100})) \quad [3.3]$$

Donde: T_{MC} = Tiempo de desplazamiento durante la carga, (s); P_L = Volumen total de la carga, (m^3); C_t = Concentración de trozas sobre la vía de saca, ($\text{m}^3/100 \text{ m}$).

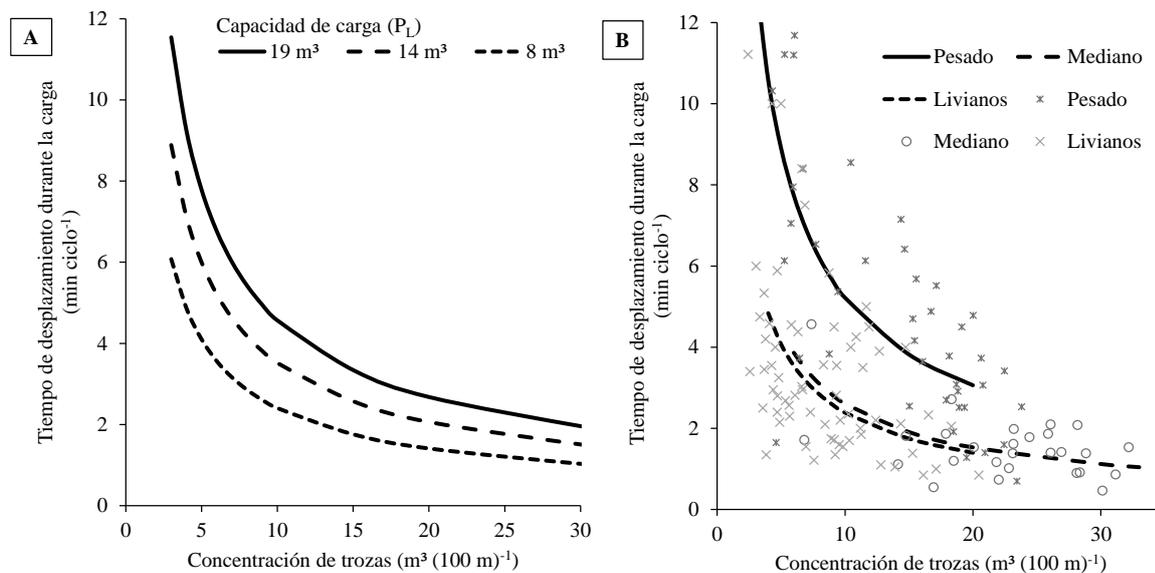


Figura 3.4: A. Variación del tiempo de desplazamiento durante la carga requerido para diferentes tamaños de carga y distintas concentraciones de trozas. B. Predicciones del modelo ajustado, incluyendo el intercepto aleatorio para las distintas situaciones evaluadas agrupadas según el tamaño del *forwarder*. La capacidad de carga se fijó en los valores medios observados para cada equipo.

3.3.5. Descarga

La descarga de las trozas en la playa de acopio requirió en promedio 8,4 min, representando el 26,4% del tiempo total efectivo. Esta actividad requirió en promedio 0,68 min m⁻³, e incluyó tanto la descarga en pilas ubicadas a borde de camino, como la descarga directa sobre camiones forestales.

El modelo ajustado para esta actividad alcanzó a explicar el 49% de la variabilidad en el tiempo de descarga (Cuadro 3.7 – Modelo 3, Ecuación [3.4]). El tiempo de descarga estuvo directamente relacionado con el volumen total transportado e inversamente relacionado con el volumen individual de las trozas. El nivel de explicación del modelo ascendió hasta el 91% cuando se consideró el efecto aleatorio del sitio, que contribuyó a explicar una variación de 0,29 min en el intercepto del modelo.

$$\ln(T_{DESC}) = 0,7263 + 0,6240 * \ln(P_L) - 3,5094 * V_t \quad [3.4]$$

Donde: T_{DESC} = Tiempo de descarga, (s); P_L = Volumen total de la carga, (m³); V_t = Volumen medio de las trozas transportadas, (m³).

Cuadro 3.7: Modelos predictivos del tiempo requerido por la carga, el desplazamiento durante la carga y la descarga. El error estándar del parámetro estimado es presentado entre paréntesis.

Parámetros de los modelos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Variable dependiente	Ln(T _{CARGA})	Ln(T _{MC})	Ln(T _{DESC})
Efectos fijos			
Intercepto	-1,4260 (0,2597)	-2,5239 (0,3962)	0,7263 (0,1778)
ln(P _L)	0,9726 (0,0504)		0,6240 (0,0590)
V _t			-3,5094 (0,6203)
ln(V _t)	-0,5955 (0,0392)		
ln(P _L /(C _V /100))		0,7698 (0,0816)	
Efectos aleatorios			
Efecto del sitio (SD)	0,4173	0,2529	0,2927
Residuo (SD)	0,1161	0,3501	0,1392
Intercepto aleatorio			
Sitio 1	-1,7761	-2,3909	0,8728
Sitio 2	-1,9096	-2,8235	0,3568
Sitio 3	-0,972	-2,5419	1,1771
Sitio 4	-1,5749	-2,7123	0,4846
Sitio 5	-0,8975	-2,1511	0,7402
R ² M	0,56	0,50	0,49
R ² C	0,97	0,67	0,91
AIC	-54,69	198,16	18,39
BIC	-28,61	221,34	44,20
n	134	134	130

3.3.6. Tiempo total de actividades efectivas.

El ciclo de extracción tuvo una duración media de 30,9 min, variando entre 19,1 y 37,4 min entre sitios. Esto representó un promedio de 2,5 min m⁻³ de madera extraída. El tiempo total de actividades efectivas fue estimado por medio de la ecuación [3.1], combinación aditiva de los tiempos estimados para cada actividad por los modelos de productividad ajustados. La ecuación [3.5] presenta la expresión final del modelo general para el tiempo total del ciclo, considerando sólo los efectos fijos de los modelos ajustados para cada actividad. La Figura 3.5A muestra el comportamiento esperado para el TAE al variar el volumen transportado y el tamaño medio de las trozas, fijando las demás variables en sus valores medios (C_t = 12,1 m³ (100 m)⁻¹, D_{SC} = 130 m, D_{SR} = 162,5 m). Si este modelo general se constituye contemplando el efecto aleatorio del sitio en el intercepto de cada submodelo (Cuadro 3.7), las predicciones obtenidas resultan insesgadas y alcanzan un nivel de explicación del 79% (Figura 3.6A).

$$TAE = \frac{D_{SC}}{71,6} + \frac{D_{SR}}{56,9} + e^{-1,43+0,97*\ln(P_L)-0,59*\ln(V_t)} + e^{-2,52+0,77*\ln\left(\frac{P_L}{C_t}\right)} + \frac{D_{SR}}{52,2} + \frac{D_{SC}}{75,7} + e^{0,73+0,62*\ln(P_L)-3,51*V_t} \quad [3.5]$$

Donde: TAE = Tiempo total de actividades efectivas, (min ciclo⁻¹); D_{SC} = Distancia de desplazamiento sobre el camino, (m); D_{SR} = Distancia de extracción en el rodal, (m); P_L = Volumen total de la carga (m³); V_t = Volumen medio de las trozas (m³); C_t = Concentración de trozas (m³ (100 m)⁻¹); e = El valor de la constante e ≈ 2,71828; ln(...) = El logaritmo natural.

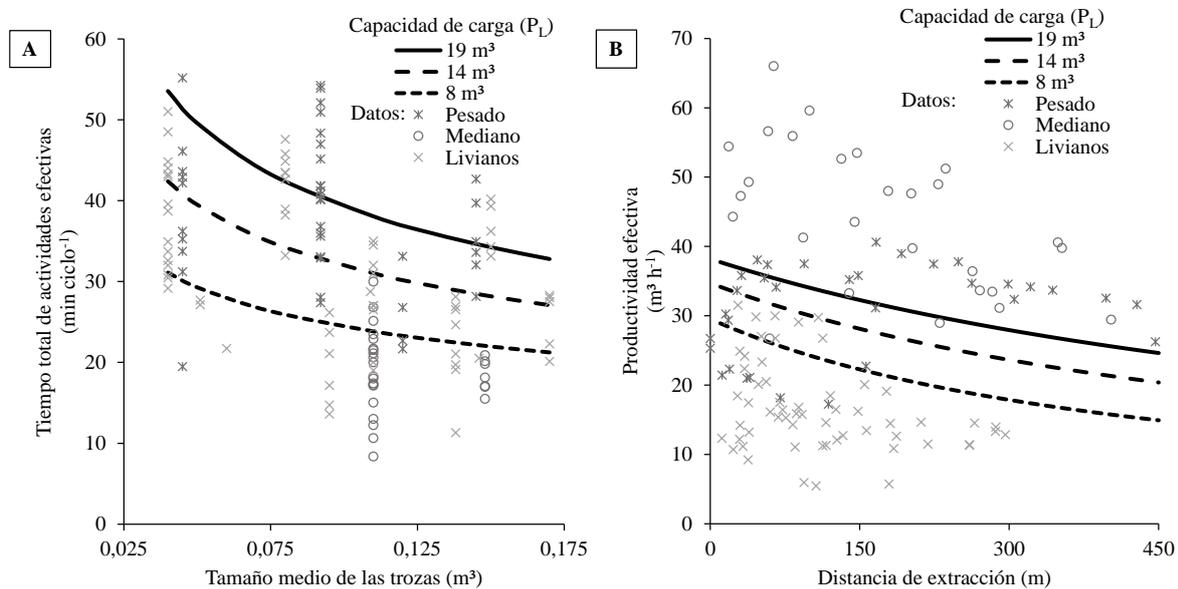


Figura 3.5: A. Variación del tiempo total del ciclo para diferentes capacidades de carga y tamaños de trozas. B. Variación de la productividad efectiva para diferentes capacidades de carga y distancias de extracción. Las curvas responden al volumen transportado y a la variación de la abscisa. Los demás factores permanecen fijos: distancia de extracción: (162,5 m), distancia sobre caminos (130 m), volumen de las trozas (0,13 m³) y concentración de trozas (12,1 m³ (100 m)⁻¹).

3.3.7. Productividad efectiva

La extracción con *forwarders* presentó una productividad efectiva media de $27,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, variando entre 15 y $44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para los diferentes sitios. Esta dependió del volumen de la carga transportada y del tiempo total efectivo necesario para completar cada ciclo. Cuando el tamaño de la carga cambió de 7 m^3 en los *forwarders* livianos a 14 m^3 en el *forwarder* mediano, la productividad se incrementó en un 40% (Figura 3.5B). Por otra parte, el cambio en el tamaño de las trozas, entre trozas triturables ($V_t = 0,05 \text{ m}^3$) y trozas aserrables de $2,5 \text{ m}$ ($V_t = 0,11 \text{ m}^3$) provocó un incremento del 27% en la productividad. En cambio, esta variación alcanzó el 40% para el cambio entre trozas triturables y trozas aserrables de $3,15 \text{ m}$ ($V_t = 0,15 \text{ m}^3$). En cambio, la concentración de trozas tuvo un efecto menor: un aumento en la concentración de 5 a $10 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$ estuvo asociado con un incremento de la productividad de $8,4\%$ para trozas aserrables y de $5,9\%$ para trozas triturables. Esto se debió a que este incremento en la concentración de trozas causó una reducción del 41% en el tiempo de desplazamiento durante la carga.

La productividad efectiva fue estimada como el cociente entre el volumen de la carga transportada y el tiempo total de actividades efectivas (Proto et al., 2018b). La estimación obtenida de esta forma, incluyendo el efecto aleatorio del sitio en los distintos modelos, resultó insesgada y alcanzó a explicar el 90% de la variabilidad observada (Figura 3.6B).

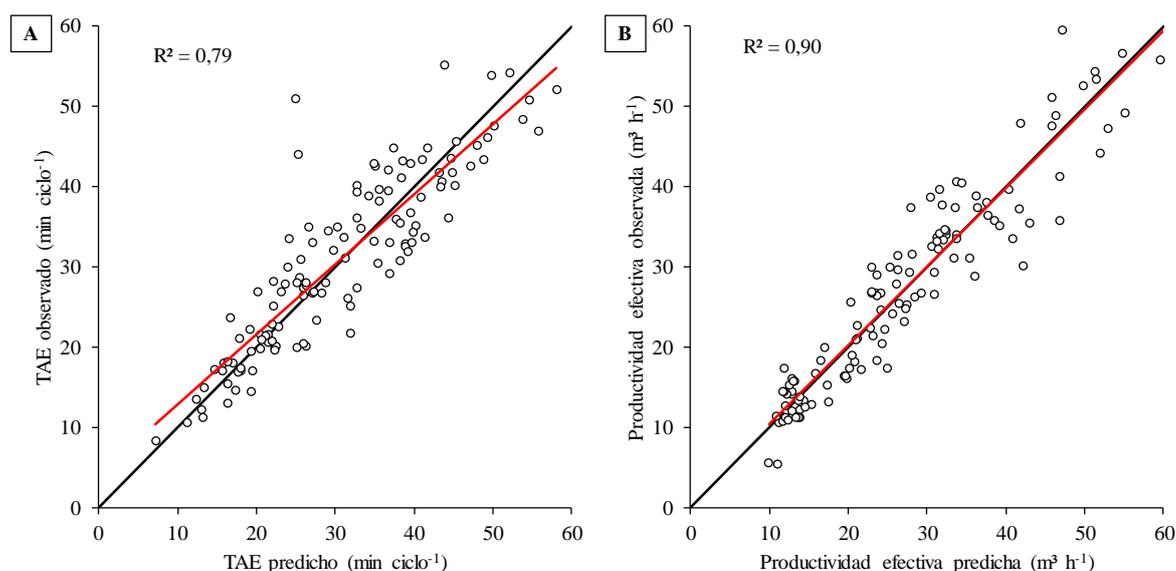


Figura 3.6: A. Comparación entre los valores observados y las predicciones del modelo ajustado para el tiempo total de actividades efectivas (TAE). B. Comparación entre los valores observados y las predicciones del modelo ajustado para la productividad efectiva. Las predicciones incluyen el efecto aleatorio del sitio sobre el intercepto de los modelos para cada actividad. La línea de tendencia roja representa el sesgo del modelo respecto de la diagonal 1:1, y se indica su coeficiente de determinación R^2 .

3.4. Discusión

Este estudio fue llevado adelante en cinco operaciones de raleo realizadas por *forwarders* livianos, medianos y pesados. Los sitios evaluados representan a la mayor parte de los segundos raleos mecanizados en el noreste argentino. Los resultados muestran que los factores analizados afectan a las distintas operaciones en la misma forma.

La filmación de las actividades y el registro de los movimientos por medio de receptores GNSS permitió incrementar la seguridad y eficiencia de las actividades realizadas a campo durante los ensayos. La combinación de ambas técnicas hizo posible cuantificar con precisión tanto actividades de pocos segundos de duración, como desplazamientos largos (Spinelli et al., 2015; Strandgard y Mitchell, 2015; Apăfaian, Proto y Borz, 2017). La metodología utilizada representa una evolución de las técnicas tradicionales de cronometraje y medición de distancias por medio de referencias visuales, siguiendo la tendencia observada a nivel mundial (Košir, Magagnotti y Spinelli, 2015). A pesar de su precisión, la duración de todas las actividades presentó una distribución log-normal, requiriendo que se aplique la transformación logarítmica previo al ajuste de los modelos. Otra transformación posterior mediante el antilogaritmo fue necesaria para obtener predicciones útiles y entendibles (Eriksson y Lindroos, 2014; Manner, Nordfjell y Lindroos, 2016).

La velocidad desarrollada por los *forwarder* sobre los caminos fue similar al transitar vacíos o cargados. La falta de correlación entre la velocidad del desplazamiento y el volumen de la carga transportada demuestra que el peso de la carga no resulta un factor limitante bajo las condiciones de este estudio. De la misma forma, la velocidad del desplazamiento dentro del rodal fue similar para los movimientos en vacío o con carga, sin mostrar correlación con el volumen de la carga (Proto et al., 2018b). Esta velocidad resultó un 26% menor que la alcanzada al transitar los caminos. La similitud entre las velocidades alcanzadas en los viajes vacíos y cargados pueden deberse a la buena capacidad de soporte del suelo y al relieve suave con pendientes menores al 10%, sin rocosidad u otros elementos que dificulten los movimientos del *forwarder* (Stankić et al., 2012).

El tiempo requerido por el movimiento de la grúa durante la carga representó una proporción menor que la presentada por Manner, Nordfjell y Lindroos (2013). El tiempo requerido para la carga de trozas con un volumen medio de $0,1 \text{ m}^3$, ($0,86 \text{ min m}^{-3}$), fue similar al observado por Apăfaian, Proto y Borz (2017) con trozas de $0,075 \text{ m}^3$ en cortas finales. Además, el *forwarder* pesado necesitó un tiempo 9,4% menor que el reportado por Manner et al. (2016) para equipos similares en un estudio extenso desarrollado en Suecia. La relación entre la duración de la carga y el volumen de las trozas sigue la “Ley del tamaño de las piezas” (Visser y Spinelli, 2012). De esta forma, el tiempo de movimiento de la grúa presenta un incremento proporcional al número de trozas cargadas, e inversamente proporcional al tamaño de estas trozas (Stankić et al., 2012; Holzfeind, Stampfer y Holzleitner, 2018) (Figura 3.3A).

El tiempo empleado en el desplazamiento entre pilas durante la carga fue un 48% inferior que el reportado por Manner et al. (2016), y un 18% superior que el observado por Apăfaian, Proto y Borz (2017). Este estuvo vinculado con la distancia recorrida durante la carga, estimada como el cociente entre el volumen cargado y la concentración de trozas existente sobre la vía de saca (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013). El tiempo de desplazamiento durante la carga tuvo un incremento exponencial cuando la concentración de trozas se redujo por debajo de $10 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$ (Figura 3.4A) (Stankić et al., 2012; Manner,

Nordfjell y Lindroos, 2013). Esto resalta el efecto de las concentraciones de trozas más bajas, debidas a un bajo volumen de madera cosechado para un producto determinado. El análisis del efecto de la concentración de trozas fue posible debido a la carga de un solo tipo de producto en cada ciclo de extracción (Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013).

La descarga estuvo afectada por los mismos factores que influenciaron a la carga. Sin embargo, requirió un tiempo 35% menor que ésta en el caso de las trozas aserrables, y un tiempo 52% menor para las trozas triturables. Esto se debió a que en la descarga resulta más sencillo para el operario tomar un gran número de trozas triturables con la garra de la grúa. En cambio, durante la carga la cantidad de trozas cargadas en cada ciclo de la grúa está limitada por su disponibilidad y distribución en el terreno. Por otra parte, la extracción de un único producto en cada ciclo evita la necesidad de clasificar las trozas durante la descarga (Stankić et al., 2012). El tiempo medio de descarga observado fue un 25% menor que el indicado por Apăfăian, Proto y Borz (2017) y por Proto et al. (2018b). La proporción del tiempo de actividades efectivas representada por esta actividad (26,4%) corresponde a la proporción general indicada para *forwarders* en otras situaciones (Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013). El modelo ajustado logró explicar el 49% de la variabilidad en el tiempo de descarga de los distintos sitios. En cambio, los antecedentes que han alcanzado altos niveles de explicación presentan modelos para situaciones aisladas (Proto et al., 2018b; Holzfeind, Stampfer y Holzleitner, 2018). Otros estudios, donde los modelos no resultan significativos, sólo reportan el tiempo de descarga promedio (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Niemistö et al., 2012).

El tiempo total de actividades efectivas estuvo determinado por la duración combinada de las distintas actividades observadas (Cuadro 3.5). Para un *forwarder* mediano, la duración del ciclo estimada fue similar a la obtenida por Apăfăian, Proto y Borz (2017) trabajando en cortas finales en Noruega donde el tamaño de los árboles y el volumen cosechado fue similar al de los raleos estudiados. El tiempo total de actividades efectivas se incrementó en respuesta al aumento en la distancia recorrida sobre caminos y en la distancia de extracción dentro del rodal. Sin embargo, debido a que los movimientos del *forwarder* vacío y cargado representan solo el 27,4% de la duración total del ciclo, la productividad efectiva apenas disminuye en un 12% cuando la distancia de extracción es extendida de 100 a 200 m. Eriksson y Lindroos (2014) presentaron un resultado similar en un estudio extensivo de la productividad de *forwarders* en raleos.

El tamaño de los *forwarders* (livianos, medianos y pesados) no presentó una correlación significativa con la velocidad alcanzada durante los desplazamientos en vacío y cargado. Sin embargo, este factor determinó en gran medida el volumen transportado en cada situación, afectando a la duración de la carga y la descarga y a la productividad final alcanzada. Según el modelo general ajustado, un incremento de 100 m en la distancia de extracción afecta en mayor medida a un *forwarder* liviano que puede cargar 8 m³ (reduciendo en un 15% la productividad), en relación con un *forwarder* pesado que puede transportar 19 m³ (reduciendo 10% la productividad). Además, los *forwarders* medianos y pesados pueden alcanzar productividades superiores a los 20 m³ h⁻¹ para distancias de extracción superiores a los 450 m (Figura 3.5B). En cambio, la productividad de un *forwarder* liviano cae por debajo de este límite cuando la distancia de extracción alcanza los 200 m. En el noreste argentino, esta productividad es considerada un umbral por debajo del cual la extracción deja de ser rentable, afectando al balance del sistema de cosecha y limitando también la productividad del *harvester* (Mac Donagh et al., 2017; Kelly y Germain, 2020).

Por otra parte, el tamaño de las trozas tuvo un fuerte efecto en la productividad. Para los *forwarders* livianos, la extracción de trozas triturables limitó la productividad por debajo de $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. La importancia del tamaño de las trozas se debe a que afecta a las actividades de carga y descarga, que juntas representan en promedio el 62% de la duración total del ciclo.

En cambio, el efecto de la concentración de trozas sobre la productividad estuvo limitado por la relativa menor importancia del desplazamiento durante la carga (10,8% del total del ciclo). Para un volumen transportado de 14 m^3 , la variación en la concentración de trozas de $5 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$ a $10 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$ apenas implicó una reducción del 7% en la duración total del ciclo y un incremento del 8% en la productividad. Esta variación se encuentra en concordancia con los resultados de Manner, Nordfjell y Lindroos (2013), que encontraron que la duración del ciclo se incrementa de forma exponencial solo para concentraciones inferiores a los $5 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$.

Los modelos ajustados demuestran que el tamaño de las trozas y el volumen de madera acumulado para cada producto afectan de la misma manera a los distintos *forwarders* estudiados. Las principales diferencias en la capacidad de carga de cada *forwarder* fueron explicadas por el volumen de trozas transportado (P_L) incorporado en los modelos. La incorporación, además, del efecto aleatorio del sitio, permitió analizar los efectos fijos de cada factor con independencia de las diferencias absolutas entre sitios y de las características particulares de cada máquina y de su operador. Esto resulta importante debido a que la productividad de las operaciones de cosecha está influenciada por la habilidad y experiencia de los operarios (Purfürst y Erler, 2011; Apăfăian, Proto y Borz, 2017).

Los modelos obtenidos para el tiempo total de actividades efectivas y para la productividad efectiva reflejan la incidencia de los cambios en los principales factores que afectan a las operaciones de raleo. Esto permitirá desarrollar simulaciones sensibles, no solo a la distancia de extracción, sino también al volumen transportado, tamaño de las trozas y volumen cosechado de cada producto. Esto puede ser de utilidad para apoyar la toma de decisiones relacionadas con la intensidad de raleo y la instrucción de trozado utilizada en diferentes situaciones (Manner et al., 2016). Para ello, este modelo general debe ser combinado con los resultados de un sistema de simulación del trozado que estime la concentración de trozas y el volumen medio de estas, para cada producto extraído.

3.5. Conclusiones

Este estudio analizó el efecto de los factores que impactan en las distintas actividades que componen el ciclo de extracción de un grupo de *forwarders* de diferente tamaño, trabajando en el noreste argentino. Los modelos desarrollados incorporaron los efectos de todos los factores estudiados, teniendo un gran potencial de aplicación en la simulación de operaciones de raleo, el cálculo de costos de cosecha, y en el análisis del efecto de la estructura espacial de los rodales sobre la productividad de la extracción.

La velocidad desarrollada por los *forwarders* sobre los caminos fue similar en los viajes vacíos y cargados. Dentro del rodal esta velocidad disminuyó, sin mostrar diferencias debido al volumen transportado. Esto denota que, aunque el tránsito dentro del rodal presenta más dificultades que sobre los caminos, las capacidades de los *forwarders* fueron adecuadas para las buenas condiciones de transitabilidad de los sitios evaluados. Sin embargo, el tamaño de los equipos afectó a la proporción del

tiempo dedicada a los desplazamientos sobre caminos y sobre el rodal. Para los *forwarders* livianos estos representaron más del 45% del ciclo, resultando en una productividad inferior a $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Una mayor capacidad de carga requirió un mayor tiempo para la carga, desplazamiento durante la carga y descarga. Sin embargo, este tiempo extra estuvo compensado por el volumen de madera extraída, incrementando en todos los casos la productividad. Estos resultados se condicen con la tendencia general en la evolución de los *forwarders*, que han ido incrementando su capacidad de carga y número de ejes. La adopción de *forwarders* pesados resulta una opción adecuada para operaciones de segundo raleo. Sin embargo, esta decisión también debe considerar la capacidad de soporte del terreno, un factor que no ha sido analizado en este estudio.

La concentración de trozas sólo afectó al desplazamiento durante la carga, con una influencia menor en la productividad para productos con concentraciones superiores a los $10 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$. Sin embargo, el modelo ajustado demuestra como el tiempo de desplazamiento durante la carga se incrementa de forma abrupta cuando la concentración de trozas disminuye por debajo de ese límite. Esto tiene implicancias en raleos que aprovechan un bajo volumen por hectárea (menos de $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) o con instrucciones de trozado complejas, con más de tres productos, resultando en concentraciones de trozas inferiores a $5 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$.

El tamaño de las trozas fue el factor de mayor importancia analizado, afectando a la carga y a la descarga, que en conjunto comprendieron el 62% del ciclo. Los productos con trozas pequeñas incrementaron el tiempo necesario para estas tareas, reduciendo la productividad. La extracción de un solo producto en cada ciclo permitió observar con claridad este efecto. Esto tiene una gran importancia en las operaciones de raleo, donde más del 50% del volumen cosechado corresponde a productos con reducido valor comercial y un tamaño de troza menor a $0,1 \text{ m}^3$.

Capítulo 4

Efecto de la instrucción de trozado y la intensidad de raleo sobre el valor de la madera y el costo del raleo

Capítulo 4. Efecto de la instrucción de trozado y la intensidad de raleo sobre el valor de la madera y el costo del raleo

4.1. Introducción

En la actualidad, los diferentes usos industriales de la madera rolliza han generado un amplio mercado con productos de diferentes dimensiones y características. Los productos obtenidos de una operación de aprovechamiento forestal, son enviados a diferentes industrias, con requerimientos específicos en longitud, diámetro y calidad (Barth et al., 2014). En plantaciones de *Pinus taeda* L. en Sudamérica más del 50% del volumen obtenido en el primer raleo corresponde a trozas triturables, siendo lo restante trozas aserrables de hasta 3,1 m de longitud (Kohler et al., 2015). En cambio, en el segundo raleo, alrededor del 70% del volumen cosechado puede ser trozado en al menos dos productos aserrables, cuyo valor está determinado por el largo y el diámetro en punta fina de las trozas (Kohler et al., 2015; Hildt et al., 2018a). Por otra parte, la forma de los árboles y las restricciones de calidad impuestas por la industria definen en gran medida los productos que se pueden obtener en un raleo (Malinen et al., 2006; Kangas et al., 2012).

El mercado actual de productos forestales originados en los raleos en el noreste argentino se caracteriza por un bajo nivel de estandarización de los productos aserrables. Los aserraderos establecen las dimensiones para cada tipo de troza, rondando entre los 2,4 m y hasta los 5 m de longitud -en múltiplos del pie (0,304 m)- y con diámetros en punta fina comprendidos entre los 14 cm y hasta los 35 cm. La comercialización de la madera obtenida en los raleos depende de la demanda específica de los aserraderos vinculados a la operación. Esto genera frecuentes cambios en la instrucción de trozado que el operador debe configurar en el sistema de control del *harvester* (Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019). En cambio, las trozas triturables son adquiridas por las fábricas de celulosa y de tableros de fibra como un único producto estandarizado, con diámetro y largo variables.

Además, en el mercado forestal del NEA el valor de los distintos productos forestales es fijado considerando como principal criterio al diámetro en punta fina de las trozas. En cambio, en otras regiones también se consideran clases de valor por largo y calidad (Murphy, Acuna y Dumbrell, 2010; Nakahata, Aruga y Saito, 2014; Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019). Por un lado, las trozas triturables se comportan como un *commodity*, con un valor de 12,7 USD m⁻³ (COIFORM, 2018) similar al valor internacional para este producto (Malinen et al., 2010; Murphy, Acuna y Dumbrell, 2010). En cambio, el valor de las trozas aserrables se encuentra regulado por la demanda de los aserraderos, incrementándose al aumentar el diámetro de las trozas desde los 15,6 USD m⁻³ para las trozas aserrables con menos de 18 cm en punta fina, hasta los 29,1 USD m⁻³ para las trozas aserrables con más de 35 cm de diámetro en la punta fina. Estos precios resultan inferiores a los 53 a 58 USD m⁻³ citados por Malinen et al. (2010) para trozas entre 14 y 20 cm en Finlandia. Esta escala de valores presenta una variación máxima de solo 13,4 USD m⁻³, y no valora a las trozas por su longitud, rectitud o conicidad. Esta realidad local condiciona el diseño de las instrucciones de trozado y limita los resultados de los sistemas de optimización disponibles en los *harvesters* (Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019).

En los raleos selectivos realizados “por lo bajo” se cosecha una proporción de los árboles, haciendo foco en los más pequeños, intermedios y suprimidos, dañados o con forma deficiente. El volumen individual reducido de estos árboles limita la productividad del *harvester* y favorece la obtención de trozas triturables y trozas

aserrables de bajo valor (Hildt et al., 2018a). En este escenario, un costo de cosecha acotado es una condición necesaria para asegurar la factibilidad de la operación. Sin embargo, el tamaño de los árboles no es el único factor que afecta a la productividad y al costo de la faena. La densidad del rodal, la intensidad del raleo y el número de productos elaborados también impactan en el corte y la extracción con *harvester* y *forwarder* (Tolan y Visser, 2015; Mederski et al., 2016).

El efecto combinado de estos factores es poco conocido y su estimación resulta necesaria para determinar qué instrucción de trozado es más adecuada en cada situación, teniendo en cuenta la intensidad de raleo y la productividad y costos de la faena de raleo (Mederski et al., 2016).

Akay et al. (2010), indican que las decisiones tomadas durante las operaciones de trozado dependen de experiencias previas y atienden a la demanda de las industrias destinatarias, con una planificación a corto plazo. Esto está en concordancia con lo observado por Kimmich, Hildt y Mac Donagh (2019) en raleos. El trozado orientado a satisfacer las necesidades de una industria (*bucking-to-order*) permite ajustar la oferta de productos a la demanda existente. Sin embargo, cuando la instrucción asignada al *harvester* no tiene en cuenta las características de los árboles que conforman el rodal, puede ocurrir una importante pérdida de valor (Kivinen, 2006). Dems, Rousseau y Frayret (2015) encontraron que el empleo de instrucciones de trozado (con hasta 5 productos) específicas a nivel de rodal o grupo de rodales, permite un incremento del 8% en la rentabilidad, respecto a una situación en la que la industria asigna una única instrucción para cada tipo de bosque en función de su demanda.

Por otra parte, el incremento en el número de productos que conforman una instrucción de trozado puede permitir un mejor aprovechamiento de los árboles e incrementar el valor bruto de la madera cosechada (Tolan y Visser, 2015). Sin embargo, este beneficio puede verse limitado por el aumento de la complejidad de la cosecha. La incorporación de un nuevo producto puede incrementar en 5,3 s el tiempo de trozado del *harvester*, impactando también sobre la productividad del *forwarder* debido a la reducción en la concentración de trozas por producto. Esto determina que en las decisiones vinculadas al trozado deba tenerse en cuenta no solo su influencia en el valor de la madera, sino también su efecto sobre la productividad y el costo de la cosecha.

Además, la planificación de las operaciones de raleo requiere contar con estimaciones del volumen obtenible de cada producto previas al inicio de la cosecha. Estas pueden obtenerse por medio de funciones de ahusamiento y volumen acumulado hasta un diámetro determinado (Keller y Crechi, 2015). También pueden emplearse estimaciones basadas en situaciones similares (Peuhkurinen, Maltamo y Malinen, 2008). Sin embargo, la simulación del proceso de trozado permite ensayar diferentes escenarios de trozado contemplando las dimensiones de los productos y la distribución diamétrica de los rodales de interés (Malinen et al., 2006; Malinen et al., 2007; Barth et al., 2014; Malinen, Kilpeläinen y Ylisirniö, 2014; Kohler et al., 2015). Las estimaciones obtenidas por estos métodos tienden a ser similares cuando se basan en las mismas funciones de ahusamiento y volumen (Malinen et al., 2007).

En los raleos, la intensidad de cosecha determina la presión de selección. En un raleo 100% selectivo realizado “por lo bajo”, los árboles cosechados son en su mayoría individuos intermedios y suprimidos. Un incremento en la intensidad de raleo permite ascender en la distribución diamétrica, aprovechando también árboles más grandes. Debido a que la productividad del *harvester* tiene una relación directa con el tamaño medio de los árboles cosechados, esta se ve beneficiada por el incremento en la intensidad de cosecha (Mederski et al., 2016) y por la reducción en la distancia entre

los árboles cosechados (Laitila y Väätäinen, 2013). La intensidad de raleo es definida por los objetivos del manejo forestal. Sin embargo, puede variar según las oportunidades de comercialización o requerimientos de la industria. La influencia de la intensidad de raleo sobre la productividad del corte y la extracción puede afectar al balance del sistema de cosecha.

Por otra parte, la productividad de la extracción se encuentra determinada por factores como la distancia de extracción, el volumen cosechado y las características de los productos que son extraídos. En este sentido, Manner, Nordfjell y Lindroos (2013) indicaron que la carga y los movimientos entre las pilas son actividades que representan en conjunto el 50% de total del ciclo. El tiempo necesario para la carga se incrementa al trabajar con productos que tienen un bajo volumen individual (Stankić et al., 2012), mientras que el tiempo de desplazamiento entre pilas aumenta de forma exponencial cuando la concentración de trozas sobre la vía de saca disminuye por debajo de $5 \text{ m}^3 (100 \text{ m})^{-1}$ (Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013).

El objetivo de este capítulo es analizar el efecto de la intensidad de raleo y la instrucción de trozado utilizada, sobre el valor bruto, los costos de cosecha y el valor neto de la madera elaborada. Para ello se combina un proceso de simulación del trozado con los modelos de productividad para *harvester* y *forwarder* desarrollados en los capítulos anteriores.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Origen de los datos

Este estudio está basado en datos de inventario provenientes de once rodales de pino de la provincia de Misiones, Argentina. De estos, cinco corresponden a *Pinus taeda* L. y los seis restantes al pino híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Estos rodales fueron implantados entre los años 2007 y 2008, pasando por un primer raleo a los 6 años. El inventario forestal consistió en la medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los árboles localizados en parcelas de 540 m^2 . Una muestra representativa de las alturas permitió ajustar una función hipsométrica individual para cada rodal. El Cuadro 4.1 presenta las características dasométricas de los rodales inventariados.

Cuadro 4.1: Características dasométricas de los rodales inventariados.

Rodal	Especie	Edad (años)	Superficie (ha)	Densidad (árboles ha^{-1})	Área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)	DAP (cm)	Altura (m)	Volumen individual (m^3)	Vol. total ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)
R 1	<i>P. taeda</i>	9	17,0	630	31,8	25,3	18,1	0,435	273,6
R 2	<i>P. taeda</i>	10	14,6	741	33,1	23,8	20,1	0,431	319,1
R 3	<i>P. taeda</i>	10	89,4	741	32,4	23,6	18,1	0,376	278,6
R 4	<i>P. taeda</i>	9	2,9	685	31,3	24,1	16,2	0,349	239,3
R 5	<i>P. taeda</i>	9	11,8	685	35,0	25,5	18,3	0,443	303,5
R 6	P. híbrido	11	7,4	574	34,7	27,7	21,2	0,648	372,2
R 7	P. híbrido	9	9,5	667	27,7	23,0	16,1	0,336	224,1
R 8	P. híbrido	11	16,8	602	29,3	24,9	20,6	0,519	312,5
R 9	P. híbrido	10	29,5	731	33,4	24,1	18,1	0,418	305,6
R 10	P. híbrido	9	8,9	685	26,8	22,3	20,0	0,411	281,6
R 11	P. híbrido	10	36,8	685	37,7	26,5	18,6	0,510	349,8

Donde: DAP: Diámetro a la altura del pecho; Vol. Total: Volumen total por hectárea.

4.2.2. Diseño del estudio

A partir de la información de inventario de la muestra de rodales utilizada, se construyó un experimento de simulación factorial, ordenado en un diseño de bloques completos. Los once rodales inventariados conformaron los bloques del experimento, a los que se aplicaron la totalidad de los tratamientos evaluados. De esta forma, cada rodal constituyó una repetición del experimento.

La intensidad de raleo (IR) fue evaluada probando tres intensidades de raleo selectivo: removiendo el 30%, el 50% y el 70% de los árboles, intensidades similares a las evaluadas por Hiesl, Benjamin y Roth (2015). Para la selección de los árboles a cortar se aplicó un raleo por lo bajo (Bergström, Bergsten y Nordfjell, 2010). De esta forma, en cada rodal se seleccionaron los árboles con menor DAP hasta alcanzar la intensidad de raleo deseada (Eliasson y Lageson, 1999).

Para analizar el efecto de la instrucción de trozado (IT) utilizada durante el raleo se evaluaron once instrucciones de trozado diferentes, conformadas por la combinación de cinco productos comercializados en los raleos de la región. El Cuadro 4.2 presenta las características de estos productos y las instrucciones de trozado evaluadas. Las instrucciones de trozado generadas fueron acotadas hasta un máximo de tres productos por instrucción, con una estructura similar a las instrucciones utilizadas por los *harvesters* en el Capítulo 2. Las dimensiones y precios de los productos empleados corresponden a los valores de referencia para la comercialización de trozas en la provincia de Misiones (COIFORM, 2018). El precio de las trozas está determinado por su diámetro en la punta fina, mientras que el largo no aporta un diferencial en el valor.

Cuadro 4.2: Características de los productos e instrucciones de trozado evaluadas.

Producto	Largo	Diámetro mínimo	Diámetro máximo	Valor	Probabilidad rechazo troza
	(m)	(cm)	(cm)	(USD m ⁻³)	torcida
Aserrable A	3,75	18	-	18,76	0,55
Aserrable B	3,15	18	-	18,76	0,25
Aserrable C	3,75	14	17,9	15,65	0,55
Aserrable D	3,15	14	17,9	15,65	0,25
Triturable	3,4 ± 0,2	5	24,9	14,29	0

Instrucción	Número productos	Orden en el proceso de trozado			Tipo
		1	2	3	
IT-1	1	Triturable			Triturable (TR)
IT-2	2	Aserrable A	Aserrable C		Aserrable (AS)
IT-3	2	Aserrable A	Aserrable D		Aserrable (AS)
IT-4	2	Aserrable B	Aserrable C		Aserrable (AS)
IT-5	2	Aserrable B	Aserrable D		Aserrable (AS)
IT-6	2	Aserrable A	Triturable		Simple (SI)
IT-7	2	Aserrable B	Triturable		Simple (SI)
IT-8	3	Aserrable A	Aserrable C	Triturable	Combinada (CO)
IT-9	3	Aserrable A	Aserrable D	Triturable	Combinada (CO)
IT-10	3	Aserrable B	Aserrable C	Triturable	Combinada (CO)
IT-11	3	Aserrable B	Aserrable D	Triturable	Combinada (CO)

4.2.3. Proceso de simulación

La aplicación de los tratamientos a cada rodal inventariado fue realizada por medio de un proceso de simulación en tres etapas: simulación del corte con *harvester*, simulación del trozado, y simulación de la extracción con *forwarder* (Ackerman et al., 2016). Estas simulaciones integraron los modelos de tiempos ajustados en el Capítulo 2 para el corte con *harvester* y en el Capítulo 3 para la extracción con *forwarder*. La Figura 4.1 muestra un diagrama general del proceso de cálculo aplicado.

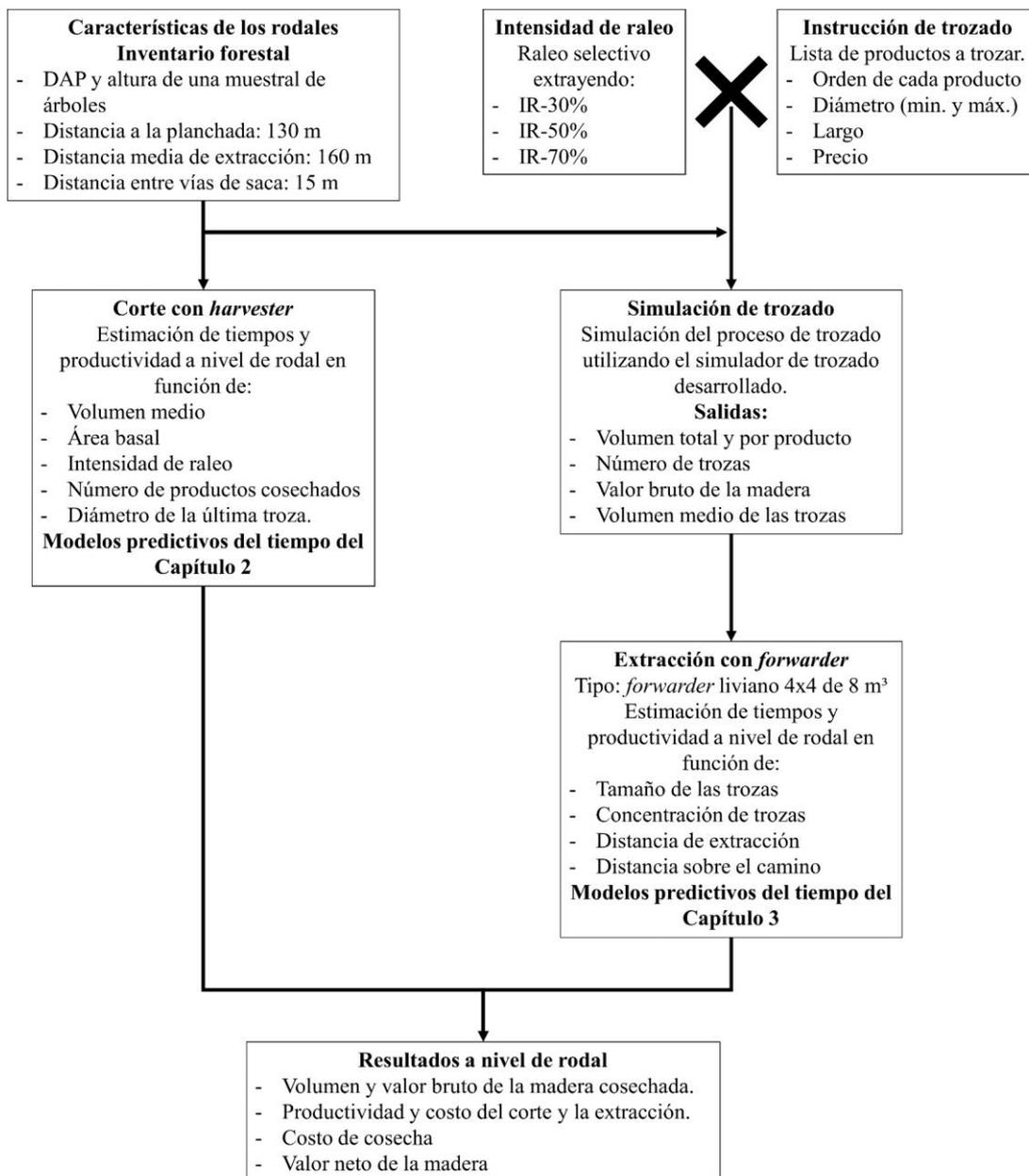


Figura 4.1: Esquema general del proceso de simulación aplicado en el ensayo.

4.2.4. Estimación de la productividad del *harvester*

La estimación del tiempo necesario para el corte y trozado de los árboles cosechados en cada rodal para cada tratamiento aplicado fue realizada por medio de los modelos de tiempos ajustados en el Capítulo 2 (Ecuación [2.8]). Estas estimaciones representan el tiempo que necesita un *harvester* promedio (en base a la muestra de *harvesters* sobre ruedas y orugas presentada en el Capítulo 2) para procesar los árboles, en función de las principales características del rodal y la operación: volumen medio de los árboles cosechados, área basal inicial, intensidad de raleo, número de productos elaborados y diámetro límite de utilización del fuste. La productividad efectiva del corte con *harvester* fue estimada como el cociente entre el volumen de las trozas elaboradas y la duración del ciclo (Ecuación [2.2]). La productividad real del corte fue calculada considerando una eficiencia del 80%.

4.2.5. Descripción del simulador de trozado

Para la etapa de simulación del trozado se empleó un *software* de simulación del proceso de trozado, de tipo heurístico e incorporando elementos estocásticos. Este fue desarrollado como una herramienta de asistencia al estudio de modalidades de raleo alternativas sin requerir de ensayos en sistemas de cosecha reales. Hildt et al. (2018b) lo utilizaron con éxito para predecir el volumen cosechado para diferentes productos en trece operaciones de cosecha, incluyendo talas rasas y raleos. En estas situaciones el simulador demostró poder explicar el 91,5% de la variabilidad en el volumen cosechado, superando al 50% explicado por las funciones de forma y volumen que suelen emplearse para esta tarea. Este simulador de trozado fue desarrollado emulando la lógica que subyace en el proceso de trozado, observada en las filmaciones registradas en los sitios descritos en el Capítulo 2. El análisis de estos registros permitió identificar, para cada situación, los principales factores que afectaron al trozado y las respuestas de los operarios frente a ellos:

- Instrucción de trozado: es el conjunto de productos configurados en el sistema de control del *harvester*, que rige el proceso de transformación de los fustes en trozas industrializables. Suele ser definida por el encargado de la comercialización de la empresa forestal que contrata el servicio de cosecha. Cada producto declarado en la instrucción de trozado posee límites precisos para el largo de las trozas y para el diámetro en punta fina mínimo y máximo admisible. Los productos triturables destinados a la industria celulósica pueden permitir trozas de largo variable, dentro de ciertos límites indicados en la instrucción de trozado.

- Presencia de defectos en los árboles: una cierta proporción de los árboles presenta bifurcaciones o segmentos tortuosos en el fuste (Malinen et al., 2006). El operario del *harvester* evalúa si los defectos observados en el fuste son admitidos por el tipo de producto elaborado, determinando si corresponde tomar la decisión de procesar las trozas defectuosas como material triturable o descartar el fuste (Kärhä et al., 2017). Cuando el operario del *harvester* toma una decisión de este tipo, interrumpe el proceso de trozado automatizado y define la longitud de las trozas de forma manual.

- Diámetro límite de utilización: el desrame y trozado de los árboles finaliza cuando el operario considera que no puede obtener una nueva troza del fuste, ya sea porque la instrucción de trozado no admite productos finos, por la existencia de ramas gruesas o por la rotura del fuste durante el desrame. Las observaciones realizadas en el Capítulo 2 indicaron que en segundos raleos el diámetro en la punta fina de la última troza elaborada tiene una media de 11,1 cm, con un desvío estándar de 3,8 cm.

- Largo variable de las trozas triturables: si el producto triturable permite la elaboración de trozas de largo variable (con un largo mínimo), el operario del *harvester*

puede reducir el largo de la última troza hasta alcanzar el diámetro mínimo del producto, incrementando el volumen total aprovechado en cada árbol (Cuadro 4.2).

Tomando como base estas observaciones se desarrolló un algoritmo de trozado heurístico, encargado de evaluar el fuste de cada árbol y definir en qué puntos realizar los cortes para obtener las trozas (Figura 4.2). Este sistema incorporó funciones de forma y volumen para modelar la estructura de los fustes y predecir el diámetro y el volumen acumulado en los árboles a distintas alturas (Crechi et al., 2006; Keller y Crechi, 2015). La presencia de defectos en los árboles se consideró por medio de la incorporación de variables estocásticas, con distribuciones de probabilidad asociadas a la frecuencia de estos defectos (Barth et al., 2014).

Al simular el trozado de cada árbol cosechado el algoritmo de simulación realiza una serie de actividades emulando las acciones realizadas por el *harvester* en la realidad:

- 1- Asignación de defectos: antes de iniciar el trozado, por medio de un proceso aleatorio se determina si el fuste a procesar será recto o torcido, de acuerdo con la proporción de árboles torcidos esperable para la especie y el rodal al que se aplica la simulación. De la misma forma, se determina si el fuste presentará una bifurcación y la altura a la que esta ocurrirá. Las proporciones de defectos observados en los rodales del Capítulo 2 se presentan en el Cuadro 4.3. La elevada proporción de árboles tortuosos y bifurcados se debe a que en los segundos raleos se busca mejorar la calidad del rodal, orientando la cosecha hacia los árboles defectuosos (Lu et al., 2018).

Cuadro 4.3: Proporción de árboles defectuosos para cada especie analizada.

Especie	Proporción	Proporción de árboles	Altura relativa de la	
	árboles bifurcados	torcidos no bifurcados	bifurcación	
	Media	Media	Media	Desvío
<i>Pinus taeda</i>	0,150	0,487	0,319	0,085
Pino híbrido	0,436	0,390	0,194	0,081

- 2- Corte basal: a una altura de 15 cm se simula el corte basal realizado durante el volteo del árbol. Esta altura representa la distancia existente entre la base del cabezal cosechador y el punto en el que se encuentra montada la sierra. El volumen correspondiente al tocón se estima considerando que a los fines prácticos este tiene forma cilíndrica. El volumen de aserrín generado en el corte se estima considerando que la espada del *harvester* tiene un grosor (*kerf*) de 8,9 mm. Ambos volúmenes son acumulados como residuos. En la faena de raleo el volteo se realiza con un único corte, sin ser necesario realizar la corrección del corte basal o descolado antes de proseguir con el trozado.

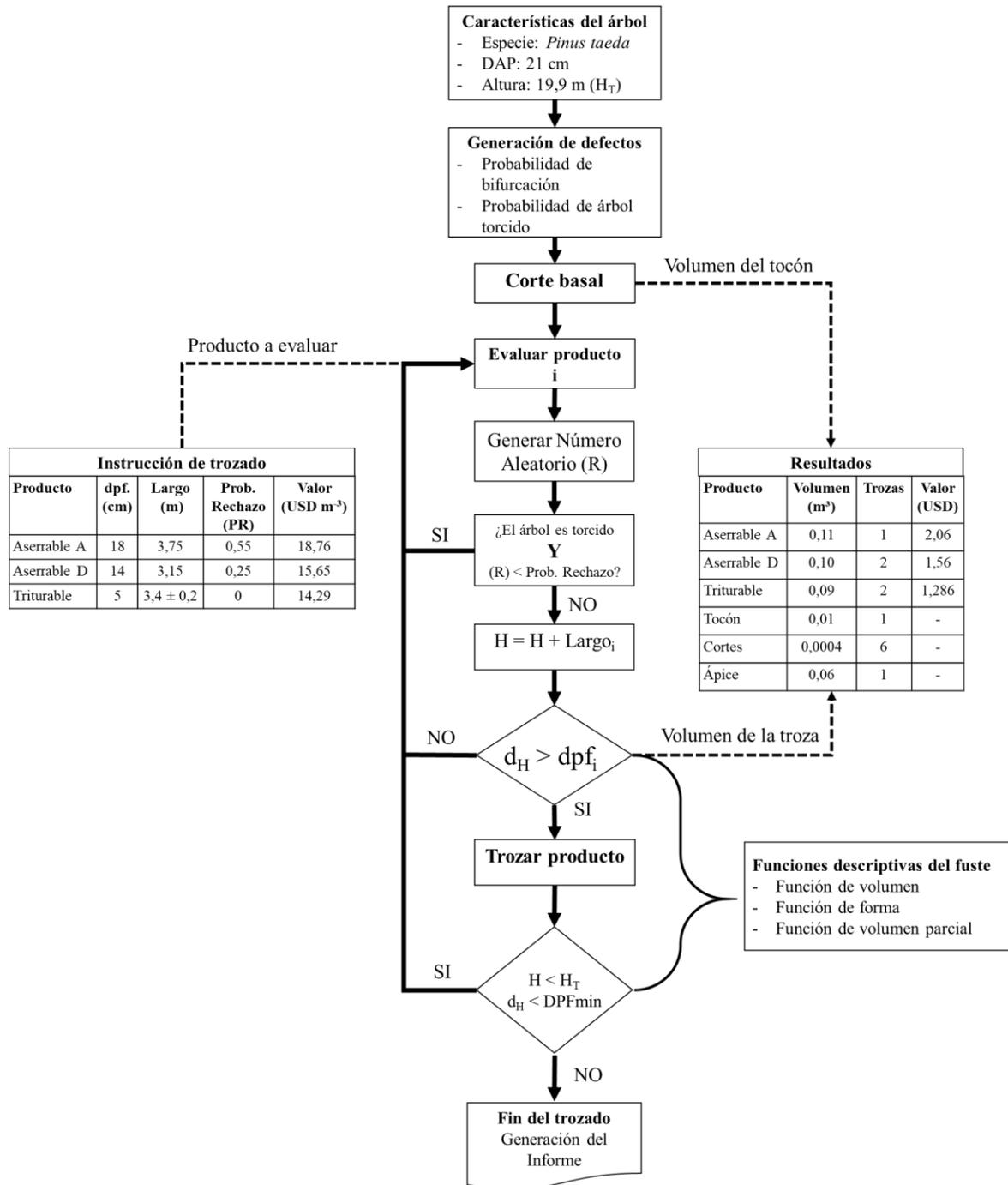


Figura 4.2: Esquema del proceso de simulación del trozado de un árbol.

- 3- Medición y trozado: emulando el proceso de trozado realizado por el *harvester*, el simulador de trozado evalúa si el primer producto indicado en la instrucción de trozado suministrada por el usuario puede ser obtenido del fuste que se está procesando. Esta verificación se realiza comprobando si a una altura igual a la longitud del producto ($H + \text{Largo}_i$), el diámetro del fuste satisface el diámetro mínimo del producto buscado. Si esta verificación es correcta, el simulador realiza el trozado, calculando el volumen de la troza, acumulando el resultado y actualizando la variable que registra la longitud del fuste ya procesada (H). Este proceso se repite de forma recursiva hasta que las dimensiones del fuste ya no satisfacen los requerimientos de diámetro y longitud del producto considerado, momento en el que se comienza a evaluar el siguiente producto de la instrucción de trozado. El volumen de aserrín correspondiente a los 8,9 mm de espesor de cada corte es calculado y acumulado como un residuo. El trozado finaliza cuando la porción de fuste restante no satisface las dimensiones de ningún producto o cuando se alcanza el diámetro límite de utilización en el que se descarta la copa durante la elaboración (DPF_{\min}).
- 4- Procesamiento especial de árboles bifurcados: los árboles bifurcados son trozados de forma normal hasta la altura en que ocurre la bifurcación. Debido a que a partir de ese punto el fuste se divide en dos ejes de menor diámetro, estos son elaborados como material triturable (si la instrucción de trozado contempla este producto) o desechados como residuos. La probabilidad de que las trozas bifurcadas de mayor diámetro (aptas para aserrío) sean elaboradas como material triturable depende de la forma de trabajo del operario y fue establecida en el 58% luego de la observación los raleos evaluados en el Capítulo 2.
- 5- Procesamiento especial de trozas torcidas: la posibilidad de rechazar el trozado de un producto determinado en un árbol torcido depende de la gravedad del defecto, el nivel de calidad exigido por el producto y la decisión tomada por el operario. En el algoritmo de trozado esta decisión fue modelada por medio de un proceso aleatorio, donde cada producto posee una probabilidad de ser rechazado por el operario si la troza evaluada corresponde a un árbol torcido (Cuadro 4.2). En estos casos el algoritmo intenta obtener una troza más corta para mitigar estos defectos siguiendo un proceso denominado *quality bucking* (Labelle, Bergen y Windisch, 2017).

El algoritmo desarrollado fue implementado como un complemento para Microsoft® Excel, programado en Microsoft® VBA (Visual Basic para Aplicaciones). El sistema de simulación cuenta con una interfaz gráfica donde se configura la simulación, se define la instrucción de trozado y se seleccionan los rodales a cosechar (Figura 4.3). El proceso comienza con el ingreso de información proveniente de inventarios forestales, donde se listan árboles individuales (con su DAP y altura), agrupados en parcelas y rodales. Una serie de planillas permite cargar las características de los rodales, las parcelas, el DAP y la altura de todos los árboles inventariados en cada rodal. Los árboles son marcados para ser cosechados según las características de los raleos planificados, pudiendo aplicarse raleos selectivos, sistemáticos o mixtos de distinta intensidad. También se debe suministrar al sistema las características de los productos que conforman las instrucciones de trozado.

Simulador de trozado con harvester ST-19 v.16 - En desarrollo

Parámetros generales del trozado

Altura del tocón (m): Trozar solo árboles marcados.

Prob bif=pulp: Ajustar troza a la bifurcación

Kerf (mm): Respetar DPF y DPG máximos

DPF despunte (μ): Considerar altura de poda

DPF despunte (σ): Simular error de medición

Número corridas:

Generar STM

Instrucciones a evaluar

Evaluación de múltiples instrucciones

Instrucción inicial:

Instrucción final:

Detener al procesar:

Instrucciones totales: 11

Repeticiones:

Procesamiento de las salidas

Mostrar tiempo de cómputo Análisis detallado del rodal Gráficos

Activar depuración Activar refresco Barra de estado

Productos Limitar instrucciones

Producto	DPF [cm]	Largo [m]	Precio [\$/m ³]
<input type="checkbox"/> 4.3 - 25pf	25	4,3	20,53
<input type="checkbox"/> 3.7 - 25pf	25	3,7	20,53
<input type="checkbox"/> 3.1 - 25pf	25	3,1	20,53
<input checked="" type="checkbox"/> 3.7 - 18pf	18	3,7	18,76
<input type="checkbox"/> 3.1 - 18pf	18	3,1	18,76
<input checked="" type="checkbox"/> 3.7 - 14pf	14	3,7	15,65
<input type="checkbox"/> 3.1 - 14pf	14	3,1	15,65
<input checked="" type="checkbox"/> Pulpable	5	3	14,29

Rodales

Rodal	Especie	Superficie [ha]
<input checked="" type="checkbox"/> AGA-03	PT	16,95
<input checked="" type="checkbox"/> AGA-05	PT	16,95
<input checked="" type="checkbox"/> AGA-07	PT	16,95
<input type="checkbox"/> CMA-03	PH	7,44
<input type="checkbox"/> CMA-05	PH	7,44
<input type="checkbox"/> CMA-07	PH	7,44
<input type="checkbox"/> CMB-03	PT	14,62
<input type="checkbox"/> CMB-05	PT	14,62
<input type="checkbox"/> CMB-07	PT	14,62
<input type="checkbox"/> CMC-03	PH	9,49
<input type="checkbox"/> CMC-05	PH	9,49
<input type="checkbox"/> CMC-07	PH	9,49
<input type="checkbox"/> MMA-03	PT	89,35
<input type="checkbox"/> MMA-05	PT	89,35
<input type="checkbox"/> MMA-07	PT	89,35
<input type="checkbox"/> PCA-03	PH	16,78
<input type="checkbox"/> PCA-05	PH	16,78
<input type="checkbox"/> PCA-07	PH	16,78
<input type="checkbox"/> SAA-03	PH	29,5
<input type="checkbox"/> SAA-05	PH	29,5

Figura 4.3: Interfaz del simulador de trozado desarrollado para este estudio.

La ejecución de una simulación permite evaluar el resultado de la aplicación de una instrucción de trozado determinada sobre los árboles cosechados en uno o varios rodales. Por cada instrucción de trozado simulada la herramienta informa el volumen y valor de las trozas obtenidas para cada uno de los productos, así como el volumen de residuos generados por el tocón, los cortes realizados por el *harvester*, el ápice y porciones de fuste que no pudieron ser aprovechadas. Debido a la naturaleza estocástica del proceso de simulación, el trozado de cada árbol es repetido 1.000 veces, reportándose la media de cada resultado. Se presentan los resultados para los árboles individuales, junto con resúmenes al nivel de una hectárea y para la superficie de cada rodal analizado. Los resultados de las distintas instrucciones evaluadas en simulaciones sucesivas pueden compararse para determinar el volumen total aprovechado, la proporción de volumen aserrable obtenida y el valor total de la madera aprovechada.

4.2.6. Estimación de la productividad del *forwarder*

La simulación de la extracción se realizó considerando la utilización de un *forwarder* liviano, con tracción 4×4 y una capacidad de carga de 8 m³. Los tiempos de las distintas actividades realizadas por este *forwarder* fueron estimados con los modelos de tiempos desarrollados en el Capítulo 3 (Cuadro 3.7). De esta forma, el tiempo estimado para cada actividad dependió de las características de los rodales y del resultado de la simulación de trozado. A los fines de hacer comparables las simulaciones se consideró que todos los rodales tuvieron la misma distancia media de extracción (160 m) y la misma distancia hasta la zona de acopio (130 m). En todos los casos se consideró un ancho entre vías de saca de 15 m. El volumen medio de las trozas extraídas y la concentración de trozas sobre la vía de saca para cada producto se obtuvieron como resultado de la simulación de trozado (Figura 4.1).

4.2.7. Análisis económico

El valor bruto de la madera elaborada fue calculado multiplicando el volumen de trozas obtenido para cada producto por los precios indicados en el Cuadro 4.2. En cambio, el valor neto de la madera elaborada fue obtenido luego de deducir los costos generados en la cosecha y el transporte hasta la industria (Hiesl, Benjamin y Roth, 2015).

El costo de aprovechamiento fue estimado en base a la estructura de costos característica de un sistema *harvester-forwarder* especializado en raleos (Hildt et al., 2018). Este estuvo conformado por un *harvester* sobre ruedas liviano Logman 801H y un *forwarder* liviano Bertotto 160TH (8 m³ de capacidad). Se consideró que ambas máquinas se encontraban completamente amortizadas, excediendo su vida útil inicial, con un bajo valor de adquisición. Esta es una característica típica de los frentes de raleo existentes en la región, en muchos casos conformados por equipos adquiridos de segunda mano. El costo de estos equipos fue estimado por medio del *software* SIMNEA (Leszczuk et al., 2017), basado en la estructura de costos desarrollada por FAO (1992). Los principales elementos de la estructura de costos estimada se presentan en el Cuadro 4.4. Para el cálculo de los costos fijos se consideró una tasa de cambio de 43 \$ USD⁻¹ y una tasa de interés al capital propio de 50%, correspondientes a abril de 2019. Para la estimación de los costos variables (costos de operación) se consideró que las máquinas trabajan en un turno de 8 hs, durante 22 días al mes (FAO, 1992; Garbers y Chen, 2013).

Cuadro 4.4. Resumen de la estructura de costos calculada para los equipos utilizados en el estudio.

Componente del costo	Unidad	<i>Harvester</i>	<i>Forwarder</i>
		Logman 801H	Bertotto 160TH
Valor de adquisición (usada)	USD	110.870	90.000
Valor de los neumáticos	USD	12.000	4.651
Vida útil futura	Horas	5.000	5.000
Horas de uso anual	Horas	2.112	2.112
Periodo de amortización	Años	2,5	2,5
Salario neto operario	USD mes ⁻¹	581,4	581,4
Consumo de combustible	L h ⁻¹	12	10
Consumo de aceites y fluidos	L h ⁻¹	1,7	0,5
Elementos de corte	USD h ⁻¹	1,6	0
Costos fijos			
Interés	USD mes ⁻¹	2.771,7	2.250,0
Seguros	USD mes ⁻¹	462,0	375,0
Costos semi fijos			
Depreciación de la máquina	USD h ⁻¹	11,4	10,2
Depreciación del sistema rodante	USD h ⁻¹	2,4	0,9
Reparaciones	USD h ⁻¹	9,6	8,6
Costos variables			
Combustible y aceites	USD h ⁻¹	13,9	10,7
Insumos	USD h ⁻¹	3,2	-
Salario con cargas sociales	USD mes ⁻¹	1.164	1.164
Costo total	USD mes ⁻¹	11.532	9.147
Costo horario total	USD h ⁻¹	66	52

Diferentes estudios realizados en la región reportaron costos de operación de entre 43 y 150 USD h⁻¹ para *harvesters* (Mac Donagh et al., 2013a; Mac Donagh et al., 2013b; Seixas y Batista, 2014; Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019), y de entre 48 y 55 USD h⁻¹ para *forwarders* en Brasil (Lopes et al., 2016; Rodrigues et al., 2018). La gran diferencia existente entre estos antecedentes de debe a la antigüedad de las máquinas utilizadas. El empleo de máquinas nuevas, con altos montos de inversión, conlleva fuertes costos fijos financieros. En cambio, en los equipos de segunda mano los costos fijos se reducen y los costos variables adquieren más importancia.

Se consideró un costo de transporte de 0,127 USD m⁻³ km⁻¹, con una distancia de envío de 50 km, igual para todos los productos. Este costo de transporte es un valor de referencia en la región, resultando un 25% mayor que los valores reportados por Conrad (2018) para el sur de Estados Unidos.

4.2.8. Análisis de los datos

Los resultados del proceso de simulación fueron analizados a escala de rodal (como magnitudes por hectárea) y también como magnitudes relativas a un metro cúbico de madera elaborada (Malinen et al., 2006, Fulvio y Bergström, 2013). Debido a que los datos no satisficieron el supuesto de homogeneidad de la varianza, el análisis del experimento se realizó por medio del ajuste de modelos lineales mixtos. Estos modelos incorporaron el efecto fijo de los bloques (rodal inventariados), la intensidad de raleo, la instrucción de trozado y la interacción entre la intensidad de raleo y la instrucción de trozado. La heterocedasticidad fue contemplada permitiendo que el modelo considere varianzas independientes para cada rodal. Las diferencias entre las medias de cada tratamiento fueron evaluadas por medio de la prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (2012) (DGC), con el objetivo de obtener grupos

homogéneos excluyentes. Los modelos fueron ajustados con el *software* Infostat (Di Rienzo et al., 2018).

4.3. Resultados

Los volúmenes cosechados para cada combinación de intensidad de raleo e instrucción de trozado simuladas son presentados en el Cuadro 4.5. En las operaciones de raleo simuladas, la intensidad de raleo estableció el número de árboles extraídos en cada situación, determinando el volumen de madera cosechada y el valor bruto de la misma. La reducción de la intensidad de raleo, de un 50% a un 30% (con instrucciones de trozado que incluyeron trozas aserrables y triturables), causó una disminución del 47,3% en el volumen total de madera elaborada y del 48,6% en el valor bruto cosechado por hectárea (Cuadro 4.5). Por otra parte, una menor intensidad de raleo provocó una reducción en el tamaño de los árboles cosechados, que tuvieron un volumen 21,3% menor al cosechar el 30% de los árboles, respecto a los raleos realizados al 70% (significativamente diferentes según el Test de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$). En las instrucciones de trozado que incluyeron trozas aserrables, la proporción de madera aserrable obtenida también disminuyó en un 1,8% al reducir la intensidad de raleo del 70% al 50%, y en un 3,8% al pasar del 50% al 30%.

La altura a la que se realizó el corte basal también tuvo efecto sobre el volumen de madera elaborada. En las simulaciones se consideró un tocón de 15 cm, una altura posible para la cosecha de pino con *harvester* en terrenos con poca pendiente. En esta situación, para una intensidad de raleo del 50%, los tocones representaron en promedio $2,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Se realizaron simulaciones de trozado similares, pero con alturas del tocón de 20, 25 y 30 cm. Estas indican que, en cada incremento de 5 cm, el volumen representado por los tocones aumenta en $0,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Esto significa que, al incrementarse la altura del tocón de 15 a 30 cm, ocurre una reducción de $2,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el volumen total de las trozas aprovechadas, concentrada en la parte del fuste que tiene el mayor valor comercial.

Cuadro 4.5: Características del material cosechado para las distintas intensidades de raleo e instrucciones de trozado utilizadas.

		Intensidad de raleo [%]		
		30	50	70
Árboles cosechados (árboles ha⁻¹)		214 ± 15	343 ± 27	477 ± 38
Área basal removida (m² ha⁻¹)		6,92 ± 0,80	12,46 ± 1,42	19,24 ± 2,04
Volumen removido (m³ ha⁻¹)		61,92 ± 9,79	112,60 ± 17,46	175,44 ± 26,50
Diámetro medio (cm)		20,31 ± 1,36 a	21,54 ± 1,47 ab	22,67 ± 1,51 b
Volumen medio (m³ árbol⁻¹)		0,292 ± 0,06 a	0,332 ± 0,07 ab	0,371 ± 0,08 b
Volumen cosechado (m³ ha⁻¹)				
	TR	47,44 ± 9,86	89,85 ± 17,45	142,66 ± 23,94
	AS	31,70 ± 7,68	61,92 ± 13,28	101,56 ± 19,87
	SI	47,62 ± 9,71	90,27 ± 17,46	145,45 ± 26,52
	CO	47,03 ± 9,47	89,29 ± 17,00	143,35 ± 26,08
Valor bruto cosechado [USD ha⁻¹]				
	TR	677,93 ± 140,84	1283,92 ± 249,35	2038,58 ± 342,03
	AS	543,25 ± 148,3	1086,71 ± 258,39	1811,27 ± 382,78
	SI	749,19 ± 178,99	1463,03 ± 322,63	2404,94 ± 483,35
	CO	764,17 ± 174,25	1483,76 ± 312,52	2418,77 ± 472,42
Proporción de trozas aserrables [%]				
TR	IT-1	0	0	0
AS	IT-2, 3, 4, 5	100	100	100
SI	IT-6	29,15	38,39	45,7
SI	IT-7	34,61	47,35	52,33
CO	IT-8	65,95	66,19	67,83
CO	IT-9	69,60	73,47	75,33
CO	IT-10	67,90	71,68	72,87
CO	IT-11	70,86	73,7	74,28

Donde: TR: Sólo trozas trituras; AS: Trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina; SI: Instrucciones simples con trozas aserrables con más de 18 cm en punta fina y trozas trituras; CO: Instrucciones que combinan la elaboración de trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina y trozas trituras.

Los modelos ajustados para las distintas variables estudiadas tuvieron un nivel de explicación superior al 90%. En todos ellos resultaron significativos los términos de la intensidad de raleo y de las instrucciones de trozado. Sin embargo, debido a que el término de la interacción entre intensidad e instrucción también resultó significativo, fue necesario contemplar esto al analizar los resultados (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6: Modelos ajustados, indicadores y significancia de los factores.

Variable respuesta	Unidad	N	AIC	BIC	R ²	Termino	F-valor	p-valor
Volumen aprovechado	m ³ ha ⁻¹	363	2.141,89	2.345,38	0,97	Intercepto	48.936,28	<0,0001
						Rodal	284,66	<0,0001
						Intensidad	29.132,94	<0,0001
						Instrucción	880,14	<0,0001
						Interacción	66,20	<0,0001
Valor bruto	USD ha ⁻¹	363	3.984,72	4.188,21	0,97	Intercepto	42.947,87	<0,0001
						Rodal	247,53	<0,0001
						Intensidad	24.123,79	<0,0001
						Instrucción	474,22	<0,0001
						Interacción	38,29	<0,0001
Margen neto	USD ha ⁻¹	363	3.514,17	3.721,43	0,92	Intercepto	46.992,77	<0,0001
						Rodal	234,73	<0,0001
						Intensidad	752.011,89	<0,0001
						Instrucción	2.290,30	<0,0001
						Interacción	1.412,17	<0,0001
Productividad <i>Harvester</i>	m ³ h ⁻¹	363	844,43	1.047,92	0,98	Intercepto	249.234,26	<0,0001
						Rodal	1.204,15	<0,0001
						Intensidad	6.919,39	<0,0001
						Instrucción	2.934,43	<0,0001
						Interacción	8,22	<0,0001
Productividad <i>Forwarder</i>	m ³ h ⁻¹	363	-78,65	124,84	0,98	Intercepto	2.081.756,32	<0,0001
						Rodal	808,30	<0,0001
						Intensidad	20.505,70	<0,0001
						Instrucción	680,23	<0,0001
						Interacción	33,56	<0,0001
Costo <i>Harvester</i>	USD m ⁻³	363	98,21	305,46	0,92	Intercepto	123.851,24	<0,0001
						Rodal	466,79	<0,0001
						Intensidad	3.248,04	<0,0001
						Instrucción	1.281,09	<0,0001
						Interacción	14,13	<0,0001
Costo <i>Forwarder</i>	USD m ⁻³	363	-742,35	-538,86	0,97	Intercepto	1.208.275,79	<0,0001
						Rodal	716,13	<0,0001
						Intensidad	22.085,49	<0,0001
						Instrucción	906,35	<0,0001
						Interacción	42,21	<0,0001
Costo cosecha	USD m ⁻³	363	205,61	412,87	0,93	Intercepto	320.882,28	<0,0001
						Rodal	495,18	<0,0001
						Intensidad	5.629,55	<0,0001
						Instrucción	1.001,48	<0,0001
						Interacción	18,97	<0,0001

Variable respuesta	Unidad	N	AIC	BIC	R ²	Termino	F-valor	p-valor
Valor neto	USD m ⁻³	363	489,98	697,23	0,91	Intercepto	2.735,96	<0,0001
						Rodal	561,26	<0,0001
						Intensidad	2.165,93	<0,0001
						Instrucción	33,53	<0,0001
						Interacción	27,83	<0,0001

Donde: N: número de casos analizados; AIC: criterio de información de Akaike; BIC: criterio de información bayesiano; R²: coeficiente de determinación. F-valor: estadístico de prueba usado para determinar si el término está asociado con la respuesta; p-valor: probabilidad de validez de la hipótesis nula.

La intensidad de raleo afectó significativamente al tamaño medio de las trozas triturables obtenidas, que tuvieron un volumen 14,5% menor para el 30% ($V_t = 0,06$) respecto al 70% ($V_t = 0,07 \text{ m}^3$). Para el mismo cambio en la intensidad de raleo, también se pudo observar una reducción del 11,3% en el volumen medio de las trozas aserrables obtenidas de la parte baja del fuste (trozas aserrables A y B). En cambio, no se observaron diferencias significativas para las trozas aserrables de menores diámetros (C y D), con un volumen medio de 0,096 y 0,079 $\text{m}^3 \text{ troza}^{-1}$, respectivamente.

La instrucción de trozado utilizada tuvo un efecto significativo sobre el volumen de madera recuperada en el raleo (Figura 4.4). Las instrucciones que aprovecharon el material triturable recuperaron en promedio 27,66 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ más madera que las instrucciones que sólo elaboraron trozas aserrables (p-valor del contraste <0,001). En estas últimas, el aprovechamiento del fuste estuvo limitado por los 14 cm de diámetro en punta fina de los productos aserrables finos (C y D). Esta diferencia también se observó en el valor bruto de la madera cosechada, donde las instrucciones que no aprovecharon el material triturable generaron en promedio un valor 363,9 USD ha^{-1} menor que las demás instrucciones (Figura 4.5).

Para instrucciones de trozado similares, las características de los productos elaborados también afectaron al volumen y valor recuperado. Para las intensidades de raleo 30% y 50%, el resultado de las instrucciones aserrables fue afectado por la combinación del largo de las trozas cosechadas. La IT-2 presentó un volumen total significativamente menor (10% menor que las instrucciones IT-3 e IT-4) debido a que incorporó dos productos aserrables de 375 cm de largo. En cambio, la instrucción IT-5 sólo elaboró trozas de 315 cm de largo, presentando un volumen 6% superior a las instrucciones intermedias IT-3 e IT-4, que laboraron una combinación de trozas largas y cortas (Figura 4.4). Por otra parte, cuando las instrucciones de trozado incorporaron trozas triturables (instrucciones Simples y Combinadas), las diferencias en las características de las trozas aserrables no afectaron de forma significativa al volumen total recuperado y solo modificaron el valor bruto recuperado (Figura 4.5). La IT-9 fue la única instrucción combinada que presentó un volumen total significativamente menor, debido a que la menor longitud del segundo producto aserrable corto (D) provocó el descarte de trozas que superaban el diámetro máximo en punta fina de este producto y también del producto triturable.

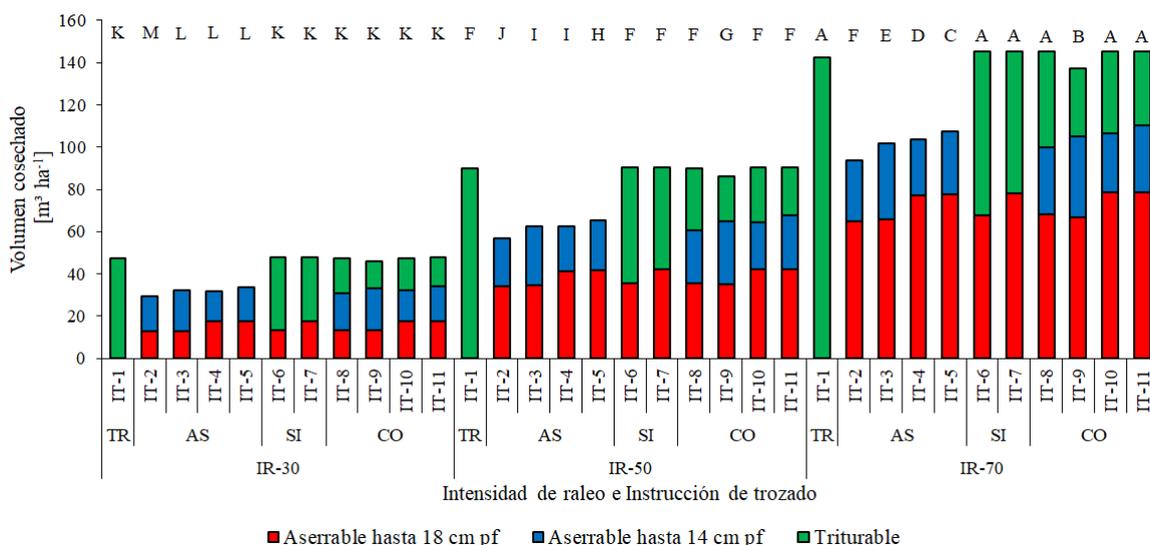


Figura 4.4: Volumen de la madera obtenida para las distintas intensidades de raleo e instrucciones de trozado evaluadas. TR: Sólo trozas triturables; AS: Trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina; SI: Instrucciones simples con trozas aserrables con más de 18 cm en punta fina y trozas triturables; CO: Instrucciones que combinan la elaboración de trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina y trozas triturables; IR: Intensidad de raleo en porcentaje; IT: Instrucción de trozado; Letras diferentes indican diferencias significativas para el volumen total cosechado según la prueba DGC.

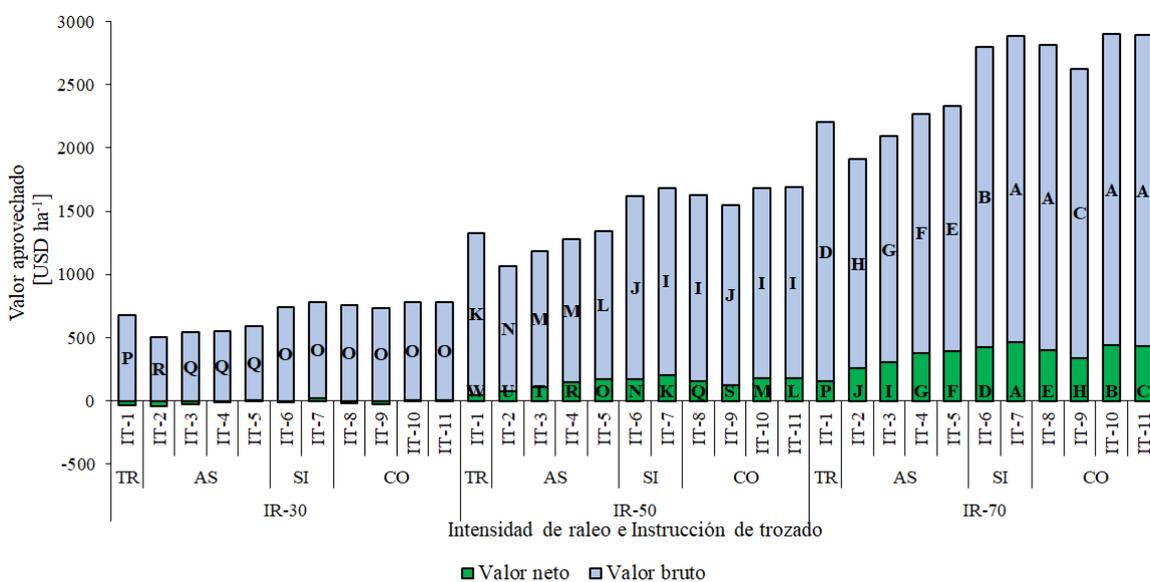


Figura 4.5: Valor bruto y valor neto obtenido por hectárea para las distintas intensidades de raleo e instrucciones de trozado evaluadas. TR: Sólo trozas triturables; AS: Trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina; SI: Instrucciones simples con trozas aserrables con más de 18 cm en punta fina y trozas triturables; CO: Instrucciones que combinan la elaboración de trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina y trozas triturables; IR: Intensidad de raleo en porcentaje; IT: Instrucción de trozado; Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba DGC.

La proporción de material aserrable obtenido en los raleos se incrementó, al pasar de las instrucciones simples (un único producto aserrable con diámetro mayor a 18 cm) a las instrucciones combinadas, mediante el agregado de un producto aserrable fino. Mientras la proporción aserrable para IT-7 fue del 47%, esta se elevó al 73,7% en la IT-11.

El volumen total de madera cosechada por hectárea tuvo una correlación positiva con el área basal de los rodales previa al raleo ($r = 0,68$), y una relación inversa con el número inicial de árboles ($r = - 0,44$) (Figura 4.6 A y B). La productividad alcanzada por el *harvester* presentó una relación similar, con una correlación directa ($r = 0,52$) con el área basal, e inversa ($r = - 0,68$) con el número de árboles existente antes del raleo (Figura 4.7 A y B).

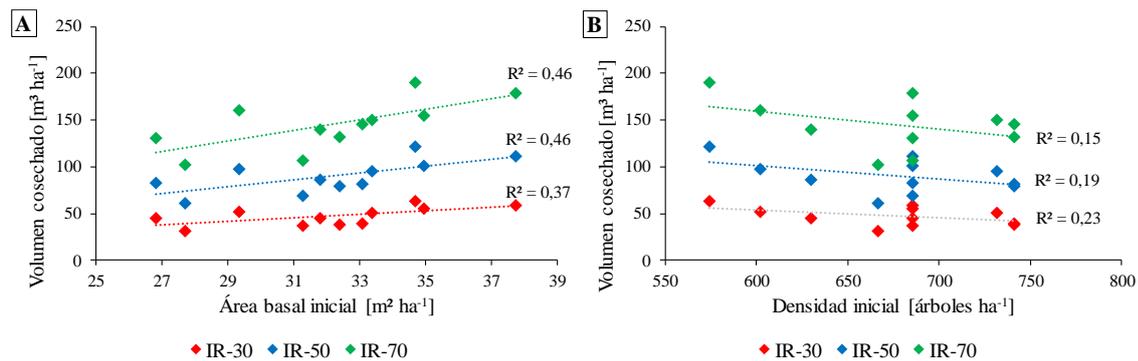


Figura 4.6: Volumen cosechado en los raleos simulados en relación con el área basal (A) y el número de árboles (B) existentes antes de la intervención. Valores correspondientes a la instrucción de trozado combinada IT-8. R^2 : coeficiente de determinación de la tendencia lineal entre ambas variables; IR: intensidad de raleo en porcentaje.

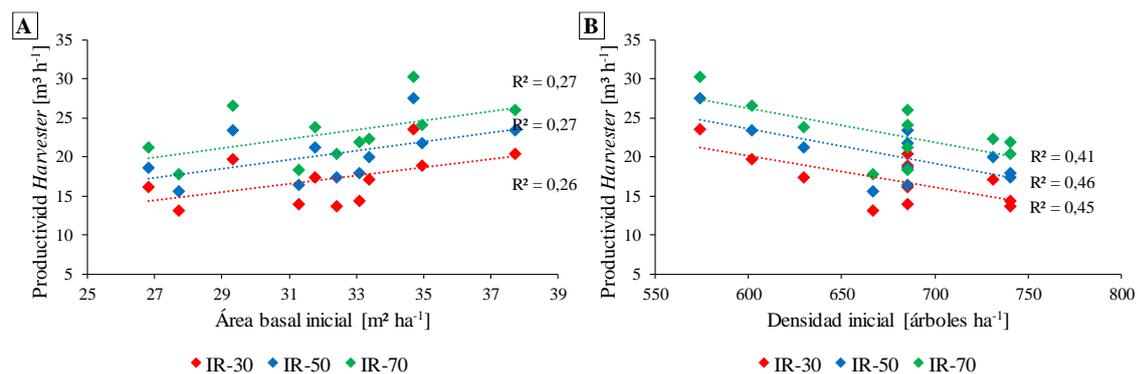


Figura 4.7: Productividad del *harvester* en los raleos simulados en relación con el área basal (A) y el número de árboles (B) existentes antes de la intervención. Valores correspondientes a la instrucción de trozado combinada IT-8. R^2 : coeficiente de determinación de la tendencia lineal entre ambas variables; IR: intensidad de raleo en porcentaje.

4.3.1.1. Productividad del *harvester*

La productividad efectiva alcanzada por el *harvester* tuvo un incremento significativo al aumentar la intensidad de raleo. Para un raleo del 30% el *harvester* alcanzó una productividad media de $16,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. En cambio, el aumento de la intensidad de raleo primero al 50% y luego al 70%, generó productividades de 19,8 y $22,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Esto también afectó al tiempo necesario para la búsqueda de los árboles. Para una intensidad de raleo del 50% el *harvester* necesitó en promedio $8,85 \text{ s árbol}^{-1}$ para ubicar y desplazarse hasta cada árbol. En cambio, cuando la intensidad se incrementó al 70% este tiempo se redujo en un 9%. Por otra parte, la reducción de la intensidad de raleo al 30% requirió un tiempo medio de búsqueda del árbol de 10,7 s, 21% mayor que el necesario para la situación intermedia.

La instrucción de trozado utilizada también afectó de forma significativa a la productividad del *harvester*. Las productividades más bajas correspondieron a las instrucciones que elaboraron únicamente trozas aserrables, alcanzando en promedio los $16,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para una intensidad de raleo del 50%. Esta baja productividad se debió a que estas instrucciones solamente aprovecharon trozas aserrables, recuperando un volumen de madera significativamente menor (Cuadro 4.5). El tiempo insumido en el desrame y trozado ($18,2 \text{ s árbol}^{-1}$) resultó inferior al de las instrucciones que incorporaron material triturable. Sin embargo, esto no alcanzó a compensar a la combinación del tiempo requerido para cortar los árboles y el bajo volumen aprovechado, resultando en una baja productividad final (Figura 4.8). En cambio, las instrucciones que combinaron dos productos aserrables y un producto triturable presentaron una productividad media de $22,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, significativamente superior a la de las instrucciones aserrables (contraste de $3,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ con un p-valor $< 0,0001$). Aunque estas instrucciones presentan el mayor tiempo de desrame y trozado ($25,8 \text{ s árbol}^{-1}$), este fue compensado por el volumen aportado por las trozas triturables. Por otra parte, las instrucciones IT-6 y 7 (simples) que sólo elaboraron un producto aserrable, presentaron una productividad $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ superior a las instrucciones combinadas, debido a que la simplificación del trozado requirió un tiempo $5,3 \text{ s árbol}^{-1}$ menor. Por esta misma razón, para la IT-1 que sólo elaboró material triturable, el *harvester* presentó el menor tiempo de trozado ($15,1 \text{ s árbol}^{-1}$) y la mayor productividad efectiva ($26,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para una intensidad de raleo del 50%).

El costo promedio del corte y la elaboración con *harvester* fue de $4,42 \text{ USD m}^{-3}$. Este fue afectado de forma significativa por los factores estudiados, respondiendo a los cambios en la productividad alcanzada por cada tratamiento (Figura 4.8). El incremento en la intensidad de raleo, del 50% al 70%, redujo el costo de la elaboración de un metro cúbico de madera en un 10% (contraste de $0,43 \text{ USD m}^{-3}$, p-valor $< 0,0001$). En cambio, la reducción de la intensidad de raleo del 50% al 30% implicó un incremento del 17% en el costo de elaboración (diferencia de $0,73 \text{ USD m}^{-3}$). Tomando como referencia una intensidad de raleo del 50%, el menor costo fue observado en la IT-1 ($3,28 \text{ USD m}^{-3}$). En cambio, aquellas instrucciones que sólo elaboraron trozas aserrables presentaron los mayores costos de corte y trozado (en promedio $5,19 \text{ USD m}^{-3}$), $1,21 \text{ USD m}^{-3}$ superiores a las demás instrucciones, (p-valor $< 0,0001$).

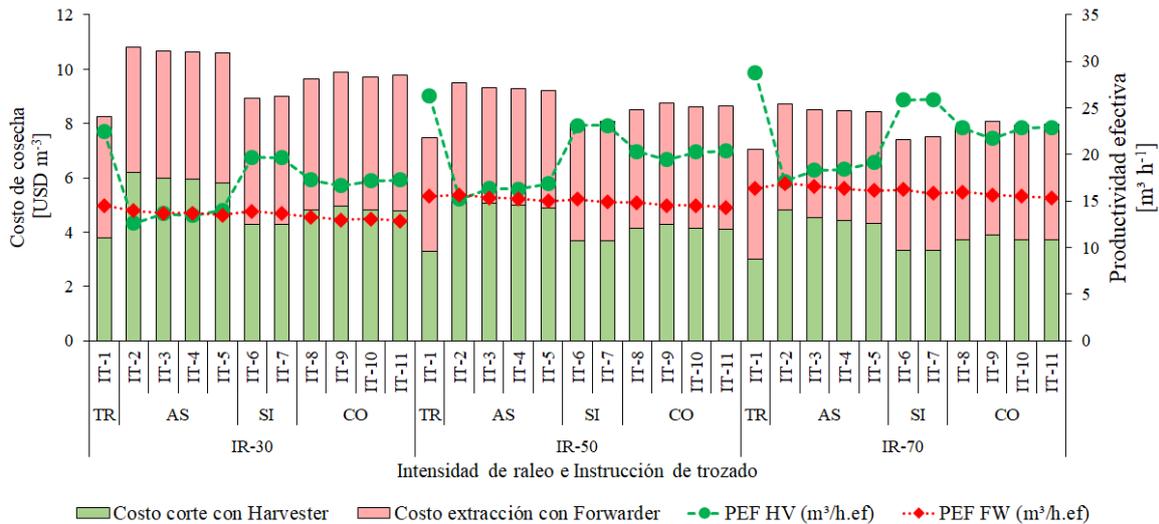


Figura 4.8: Composición del costo de cosecha y su relación con la productividad del *harvester* y el *forwarder* para cada situación evaluada. TR: Sólo trozas triturables; AS: Trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina; SI: Instrucciones simples con trozas aserrables con más de 18 cm en punta fina y trozas triturables; CO: Instrucciones que combinan la elaboración de trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina y trozas triturables; IR: Intensidad de raleo en porcentaje; IT: Instrucción de trozado; PEF HV: Productividad efectiva del *harvester*; PEF FW: Productividad efectiva del *forwarder*.

4.3.1.2. Productividad del *forwarder*

La productividad de la extracción con *forwarder* fue afectada por la intensidad de raleo. Mientras que las situaciones en donde se aplicó una intensidad de raleo del 50% presentaron una productividad media de 15,01 m³ h⁻¹, esta se redujo en un 9,7% cuando la intensidad de raleo bajó al 30%. En cambio, la productividad aumentó en un 7,1% cuando se aplicó una intensidad de raleo del 70%.

Las instrucciones de trozado evaluadas también afectaron significativamente a la productividad de la extracción con *forwarder* (Figura 4.8). Para una intensidad de raleo del 30%, la IT-1 presentó la mayor productividad (14,5 m³ h⁻¹), favorecida por la concentración de todo el volumen cosechado en un único producto triturable. En cambio, para una intensidad de raleo del 50%, la extracción tuvo una mayor productividad en las instrucciones que sólo elaboraron productos aserrables (0,49 m³ h⁻¹ más productivas que las demás, p-valor del contraste < 0,0001). La productividad se redujo al aumentar la complejidad de las instrucciones de trozado, disminuyendo en 0,27 m³ h⁻¹ para las instrucciones simples (IT-6 y 7), y en 0,77 m³ h⁻¹ para las instrucciones combinadas (IT-8, 9, 10 y 11).

El costo medio de la extracción con *forwarder* fue de 4,75 USD m⁻³ para una intensidad de raleo del 30%, 4,34 USD m⁻³ para una intensidad del 50% y 4,10 USD m⁻³ para una intensidad del 70%. Para las diferentes instrucciones de trozado consideradas, el costo de extracción siguió una tendencia inversa respecto a la productividad (Figura 4.8). Aunque el test DGC indicó diferencias significativas entre las distintas instrucciones, el rango de variación de los costos entre instrucciones con una misma intensidad de raleo fue de 0,53 USD m⁻³ para la IR-30% y de 0,38 USD m⁻³ para las IR-50% y 70%.

4.3.2. Costo del raleo y valor neto

El costo de la cosecha en cada tratamiento aplicado dependió del costo alcanzado por el corte con *harvester* y la extracción con *forwarder* (Figura 4.8). Al considerar el costo de cosecha unitario, este mostró un incremento significativo con cada reducción en la intensidad de raleo (7,97 USD m⁻³ para IR-70%, 8,67 USD m⁻³ para IR-50%, y 9,83 USD m⁻³ para IR-30%), en respuesta a la disminución de la productividad del corte y la extracción. En cambio, el costo total de la operación de cosecha se incrementó al aumentar la intensidad de raleo debido al mayor volumen de madera cosechada y extraída de los rodales (405,37 USD ha⁻¹ para IR-30%, 678,32 USD ha⁻¹ para IR-50% y 998,81 USD ha⁻¹ para IR-70%).

Las instrucciones que solo elaboraron productos aserrables presentaron el mayor costo de cosecha (9,51 USD m⁻³, superior a las demás instrucciones con una diferencia media significativa de 1,08 USD m⁻³). En las instrucciones combinadas, el volumen de material triturable aprovechado permitió reducir este costo en 0,73 USD m⁻³, respecto a las instrucciones aserrables (contraste significativo con un valor $p < 0,0001$). Por otra parte, las instrucciones simples en las que se elaboraron dos productos requirieron un costo de cosecha significativamente menor (8,15 USD m⁻³). La instrucción IT-1 fue la situación más favorable, con la operación de trozado y extracción simplificada mediante la cosecha de un único producto triturable (en promedio 7,59 USD m⁻³).

El valor neto de la madera elaborada resultó de la diferencia entre el valor bruto cosechado y el costo de cosecha y transporte. El valor neto aprovechado en una hectárea (Figura 4.5 y Figura 4.9) fue afectado significativamente tanto por la intensidad de raleo como por la instrucción de trozado. Para una intensidad de raleo del 30%, todas las instrucciones de trozado presentaron un margen final neto prácticamente nulo, oscilando entre -39,4 USD ha⁻¹ en la IT-2 y 22 USD ha⁻¹ en la IT-7 (sin diferencias significativas respecto del 0, para pruebas t bilaterales realizadas para cada IT, para una probabilidad $\alpha = 0,05$). En cambio, para una IR-50%, todas las instrucciones de trozado presentaron un el valor neto positivo, variando entre 45,3 USD ha⁻¹ para la IT-1 y 204,8 USD ha⁻¹ para la IT-7. Para una IR-70% el valor neto se incrementa, oscilando entre 154,7 USD ha⁻¹ para la IT-1 y 461,3 USD ha⁻¹ para la IT-7.

El valor neto unitario de la madera elaborada para una IR-30% varió entre -0,68 USD m⁻³ para la IT-1 y 0,51 USD m⁻³ para la IT-7, sin diferencias significativas respecto del 0, para pruebas t bilaterales realizadas para cada IT, para una probabilidad $\alpha = 0,05$. Con esta IR el raleo generó un resultado negativo (con un costo de cosecha en lugar de un margen neto positivo) en el 25% de los rodales. En cambio, al aumentar la intensidad de raleo hasta el 50%, el valor neto unitario osciló entre 0,18 USD m⁻³ para IT-1 y 2,08 USD m⁻³ para IT-4. El valor neto unitario alcanzó sus mayores valores para la IR-70%, variando entre 0,77 USD m⁻³ para IT-1 y 3 USD m⁻³ para IT-5.

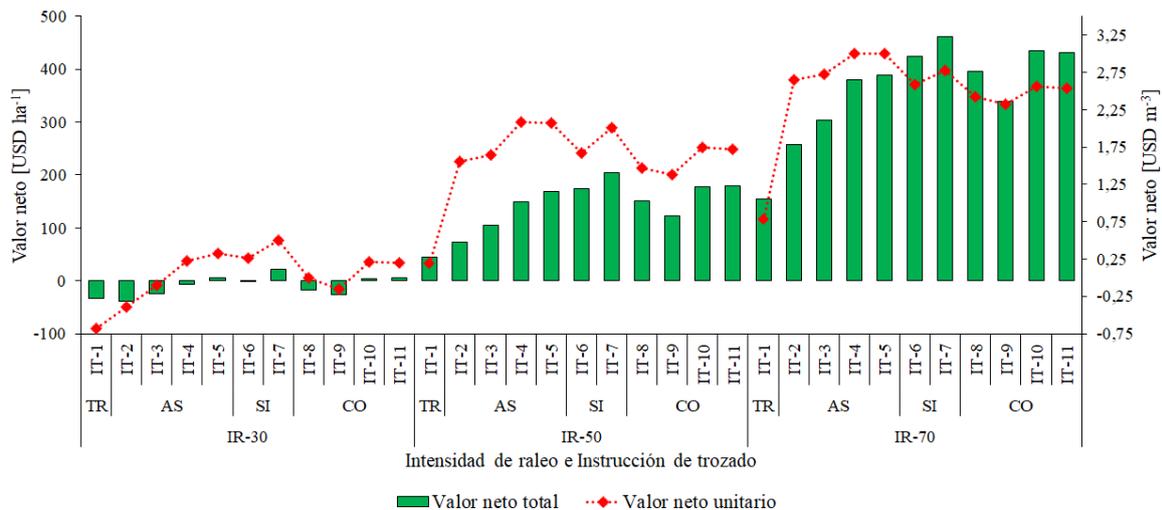


Figura 4.9: Valor neto total y valor neto unitario obtenido en los raleos. TR: Sólo trozas triturables; AS: Trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina; SI: Instrucciones simples con trozas aserrables con más de 18 cm en punta fina y trozas triturables; CO: Instrucciones que combinan la elaboración de trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina y trozas triturables; IR: Intensidad de raleo en porcentaje; IT: Instrucción de trozado.

Al analizar los resultados de las distintas instrucciones de trozado evaluadas bajo una intensidad de raleo del 30%, el mejor resultado lo presentó la instrucción simple IT-7, con un valor neto de 22 USD ha⁻¹, que sin embargo no alcanzó a ser significativamente diferente de 0 (p-valor = 0,26, prueba t bilateral). Para los raleos realizados al 50% los mejores resultados fueron obtenidos aplicando las instrucciones simples (IT-6 y 7) que elaboraron trozas aserrables mayores a 18 cm y trozas triturables, generando un valor neto promedio de 189,13 USD ha⁻¹ (Figura 4.9). Por debajo de estas, hubo diferencias significativas (contrastes con p-valor < 0,0001) para las instrucciones combinadas IT-8 a 11 (con un valor neto promedio de 158,16 USD ha⁻¹), las instrucciones aserrables puras IT-2 a 5 (con un valor neto promedio de 124,07 USD ha⁻¹) y la instrucción triturable IT-1 con un valor neto de 45,34 USD ha⁻¹. La aplicación de estas instrucciones a los raleos realizados con una intensidad del 70% resultó en relaciones similares, aunque con diferencias mayores.

Para las intensidades de raleo del 50% y del 70%, el valor neto recuperado en las instrucciones aserrables se incrementó de forma significativa cuando un producto de 3,75 m de largo (A o C) fue reemplazado por un producto de menor longitud (B o D) y con menor probabilidad de ser rechazado en trozas torcidas. Este incremento del valor se debió a un aumento en el volumen concentrado en los productos aserrables con mayor diámetro. Por esta razón, para una IR-50%, las IT-4 y 5 presentaron un valor neto unitario 0,38 USD m⁻³ mayor que las instrucciones IT-2 y 3. Al mismo tiempo, las IT-10 y 11 presentaron un valor neto 0,19 USD m⁻³ mayor que las IT-8 e IT-9. En ambos casos las diferencias significativas se dieron entre las instrucciones que incluyeron el producto aserrable B (3,15 m de longitud) y A (3,75 m de longitud).

4.4. Discusión

En este estudio se evaluó el resultado de la aplicación de diferentes intensidades de raleo e instrucciones de trozado sobre segundos raleos simulados. El ensayo planteado permitió el análisis de la operación de raleo completa: corte, trozado y extracción. El número y volumen medio de los árboles cosechados al aplicar la intensidad de raleo intermedia (IR-50%), resultó equivalente a otros resultados reportados para la región (con un volumen medio comprendido entre 0,30 y 0,36 m³) (Mac Donagh et al., 2013b; Hildt et al., 2018a; Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019) (Cuadro 4.5). Las intensidades de raleo del 30% y del 70% representaron escenarios extremos, aún no estudiados en la región, que resultaron útiles para explorar la interacción entre los factores estudiados. La disminución del volumen y el valor bruto aprovechado al reducirse la intensidad de raleo se debió tanto a la cosecha de un menor número de árboles, como al menor volumen de estos, como indica Mederski et al. (2016) para raleos realizados en Polonia con una densidad y volumen medio similar. A su vez, esta disminución en el volumen de los árboles y la reducción en la distancia entre los árboles cosechados causó una disminución en la productividad efectiva del corte y desrame con el *harvester* (Eliasson et al., 1999; Suadicaní y Fjeld, 2001; Mederski et al., 2016).

El mayor volumen recuperado en aquellas instrucciones de trozado que incluyeron productos cortos (315 cm de largo) indicó que la reducción en el largo de las trozas aserrables incrementó el aprovechamiento del fuste al maximizar el volumen de madera concentrada en cada producto. Por otra parte, los productos cortos son menos sensibles a los defectos del fuste y permiten recuperar un mayor volumen aserrable de los árboles torcidos y bifurcados. Este principio es la base del trozado manual o *quality bucking*, para el que Labelle, Bergen y Windisch (2017) reportaron una mayor recuperación de valor en cosechas de *Pinus sylvestris* L. con forma deficiente, en comparación con un trozado automatizado que no considera los defectos.

En un escenario donde el diámetro en punta fina determina el valor de los productos, las instrucciones de trozado que incluyeron trozas más cortas destacaron por su mejor resultado (Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019). Por otra parte, el aprovechamiento del material triturable en las instrucciones simples y combinadas permitió la recuperación de las trozas torcidas que no resultaron aceptables para el trozado como productos aserrables A o B. Durante la simulación del trozado, la incorporación de las proporciones en que ocurren los defectos y de las restricciones al aprovechamiento de cada producto, resultaron útiles para analizar la relación entre los diferentes productos de una instrucción de trozado y su efecto en el volumen y valor aprovechado. Según Lyhykäinen et al. (2009), los sistemas de simulación de trozado suelen considerar fustes rectos, desprovistos de segmentos torcidos o bifurcados, tendiendo a provocar una sobreestimación de la calidad del fuste y del volumen y valor recuperado durante el trozado.

La falta de diferencias significativas en el valor bruto aprovechado para las instrucciones simples (IT-6 y 7, conformadas por los productos aserrables A, B y trozas triturables) y las instrucciones combinadas (IT-8 a 11, que incorporaron además un producto aserrable fino C o D), se debió a que el valor de mercado de los productos aserrables finos fue apenas un 9,5% mayor que el de las trozas triturables (Cuadro 4.2). Esta limitación en la matriz de precios redujo la posibilidad de alcanzar ganancias de valor considerables por medio de la mejora en el aprovechamiento del material aserrable o la optimización del proceso de trozado (Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019). En cambio, en otros mercados forestales el precio de los productos aserrables

cortos supera con un mayor margen al valor de las trozas triturables, en un 25% según Malinen et al. (2010) para Finlandia y en un 68% según Hiesl, Benjamin y Roth (2015) para Estados Unidos. Por esta razón esto debe ser tenido en cuenta al considerar los resultados. Por otra parte, el incremento en la proporción de madera aserrable obtenida al incorporar un producto aserrable fino (instrucciones combinadas) resultó similar al predicho por Kohler et al. (2015) para bosques plantados de *Pinus taeda* de 11 años en el sur de Brasil.

El volumen cosechado en los raleos fue mayor en aquellos rodales que presentaron una alta densidad asociada a árboles de gran tamaño. En cambio, en aquellos rodales con altas densidades de árboles finos (gran número de árboles, pero baja área basal) el volumen obtenido fue menor (Figura 4.6 A y B), lo que impactó también en la productividad del *harvester*. Esta gran preponderancia del tamaño de los árboles sobre la densidad también fue mencionada por Mederski et al. (2016) para operaciones de raleos de pinos en Polonia.

La productividad efectiva del *harvester* presentó diferencias significativas para las intensidades de raleo evaluadas. En cambio, Hiesl, Benjamin y Roth (2015) no observaron estas diferencias en un estudio realizado a campo en bosques mixtos, con intensidades de raleo 33%, 50% y 66%. El rango de variación de la productividad efectiva alcanzada por el *harvester* en raleos realizados al 50%, entre 15 y 26 m³ h⁻¹ según la instrucción utilizada, resultó compatible con las productividades reportadas por Nurminen, Korpunen y Uusitalo (2006), por Seixas y Batista (2014), por Mederski et al. (2016) y por Lopes, Roza y Oliveira (2017). En cambio, la productividad media reportada fue un 30% menor que la indicada por Hildt et al. (2018) y Kimmich, Hildt y Mac Donagh (2019) para *harvesters* sobre ruedas y sobre orugas operando en la región. Esta diferencia respecto a situaciones más productivas pudo deberse a que el modelo general de productividad desarrollado en el capítulo 2 representa una situación intermedia entre todas las operaciones y modelos de *harvesters* estudiados.

Por otra parte, la reducción de la productividad del *harvester* observada al incrementarse la complejidad de las instrucciones de trozado estuvo en concordancia con las observaciones de Tolan y Visser (2015) para procesadores forestales elaborando más de cinco productos a borde de camino. Además, Eriksson y Lindroos (2014) indicaron que el incremento en el número de productos trozados reduce la productividad efectiva, aunque su efecto es menor en relación con el efecto del volumen medio de los árboles. En el ensayo se observó una reducción de 5,9 m³ h⁻¹ al pasar de un producto triturable (TR) a la elaboración combinada de dos productos aserrables y trozas triturables (CO) (contraste significativo, $p < 0,0001$). Una diferencia menor, de 3 m³ h⁻¹ al se observó al pasar de la elaboración de dos productos en las instrucciones SI a tres productos en las instrucciones CO. En este sentido, el efecto de la complejidad del trozado resulta comparable al efecto de la intensidad del raleo (contraste significativo de 5,45 m³ h⁻¹ entre IR-30% e IR-70%, $p < 0,0001$). Esto indica que los cambios en las instrucciones de trozado tienen un gran potencial para afectar a la productividad del *harvester* (Figura 4.8). Según la teoría de restricciones, esto podría modificar el equilibrio entre las actividades de corte y extracción (Kelly y Germain, 2020). Por ejemplo, una disminución en la productividad del *harvester* al dejar de elaborar trozas triturables reduciría la productividad y capacidad de abastecimiento de todo el equipo de cosecha, en 693 m³ mes⁻¹.

La productividad media alcanzada por la extracción con *forwarder* para una intensidad de raleo del 50% fue similar a las reportadas para raleos por Nurminen, Korpunen y Uusitalo (2006), Eriksson y Lindroos (2014), y Lopes et al. (2016). La proporción del tiempo total del ciclo requerida por cada actividad siguió la distribución

general indicada por Manner, Nordfjell y Lindroos (2013), con un 11% del tiempo dedicado al tránsito sobre caminos, un 16% al tránsito dentro del rodal, y un 13% al desplazamiento durante la carga, 35% para la carga y 25% para la descarga. Esta distribución de las actividades coincidió también con las proporciones relativas indicadas por Rodrigues et al. (2018) para la extracción en raleos de *Pinus taeda* en Brasil con un *forwarder* con una capacidad de carga de 15 Tn, que por lo tanto requiere una mayor proporción de tiempo para la carga y movimiento entre pilas (53 a 60%). Las actividades que más impactaron en la duración del ciclo fueron la carga (36%) y la descarga de las trozas (26%). El incremento observado en la productividad del *forwarder* al aumentar la intensidad de raleo respondió al efecto combinado del incremento en el volumen individual de las trozas extraídas y su concentración para cada producto, que influenciaron tanto a las actividades más representativas (carga y descarga), como al desplazamiento entre pilas durante la carga (Stankić et al., 2012; Manner, Nordfjell y Lindroos, 2013). En cambio, las diferencias estadísticamente significativas observadas en la productividad efectiva del *forwarder* al aumentar la complejidad de las instrucciones de trozado, no resultaron importantes en la práctica. La productividad del *forwarder* resultó más sensible a los cambios en el volumen total cosechado y en el tamaño de las trozas, que a la distribución de este volumen en los distintos productos a ser extraídos.

El costo medio de cosecha varió entre 7,99 y 9,81 USD m⁻³ para las distintas intensidades de raleo. Estuvo compuesto en promedio, por un 52 - 49% correspondiente al corte y trozado con *harvester* y un 48 - 51% a la extracción de las trozas hasta la playa de carga con el *forwarder*. Este se incrementó en promedio en 1,82 USD m⁻³ al disminuir la intensidad de raleo del 70 al 30%, aumentando la proporción correspondiente al corte. El costo del corte con *harvester* (3,89 - 5,06 USD m⁻³) fue inferior en un 20% a los 5,41 USD m⁻³ estimados por Kimmich, Hildt y Mac Donagh (2019), y similar al costo estimado por Mac Donagh et al. (2013b) para segundos raleos de la región o por Ackerman et al. (2016) para simulaciones de segundos raleos en Sudáfrica. Por otra parte, el costo de la extracción con *forwarder* (4,1 - 4,76 USD m⁻³) resultó similar al obtenido por Rodrigues et al. (2018) en primeros raleos de pino en Brasil y al considerado por Ackerman et al. (2016).

Las distintas instrucciones de trozado evaluadas tuvieron un fuerte efecto en el costo de cosecha, modificándolo en un rango medio de 2 USD m⁻³, superando a las variaciones debidas a la intensidad de raleo. Estas diferencias en el costo se debieron a la capacidad de aprovechamiento del volumen de madera existente en el rodal y a la complejidad de cada instrucción de trozado. La simplificación del proceso de trozado al aprovechar sólo trozas aserrables no alcanzó a compensar el menor volumen obtenido, generando los mayores costos de cosecha y las únicas situaciones donde el costo del corte con *harvester* superó a la extracción.

El valor bruto unitario de la madera cosechada (en promedio 16,57 USD m⁻³) no respondió a la variación de la intensidad de raleo y resultó un 28,2% inferior al observado por Kimmich, Hildt y Mac Donagh (2019) para una operación de raleo realizada en la región en 2016, momento en que el precio de los rollos aserrables era superior. Por otra parte, las grandes diferencias observadas en el valor neto unitario de los distintos tratamientos fueron el resultado del efecto combinado de la intensidad de raleo y la instrucción de trozado sobre el volumen cosechado, el costo de cosecha con el *harvester* y el costo de extracción con el *forwarder* (Figura 4.9). Para todas las intensidades de raleo, el menor valor neto unitario correspondió a la instrucción IT-1, donde la elaboración de trozas triturables degradó el valor comercial de la madera

elaborada. De forma similar, Fulvio y Bergström (2013) obtuvieron un valor neto negativo al realizar el aprovechamiento de material triturable y biomasa en rodales en raleos de Suecia con un equipo combinado *harvester-forwarder* (*harwarder*). Por otra parte, Hiesl, Benjamin y Roth (2015), también observaron un incremento del valor neto unitario al aumentar la intensidad de raleo, que no resulta comparable al observado en este estudio debido a la gran disparidad en el valor de la madera entre ambas regiones.

Considerando una IR-50%, la instrucción de trozado simple IT-7 resulta la mejor opción, consiguiendo aprovechar todo el volumen disponible y logrando alcanzar el mayor valor neto (204,8 USD ha⁻¹). En segundo lugar, se encuentra la instrucción de trozado combinada IT-11 que, pese a incorporar también trozas aserrables finas, alcanza un valor neto de 179,3 USD ha⁻¹, 25,5 USD ha⁻¹ menor que la anterior (contraste significativo, $p < 0,0001$). En este caso, la elaboración de trozas aserrables finas no alcanza a compensar el incremento en el costo del corte y la extracción debido a la mayor complejidad del trozado. Las instrucciones complejas CO podrían comenzar a ser preferibles si el valor de las trozas aserrables con más de 14 cm en punta fina fuera 1 USD m⁻³ mayor al actual, superando en un 16,6% al valor de las trozas triturables.

4.5. Conclusiones

Las simulaciones realizadas en este estudio permitieron comprobar que la intensidad de raleo y el tipo de instrucción de trozado afectan tanto al volumen y valor de la madera elaborada, como también a la productividad y costo del corte con *harvester* y la extracción con *forwarder*. Esto tiene una gran importancia para la comprensión de las causas del elevado costo de cosecha que caracteriza a las operaciones de raleo. Por otra parte, el concepto de simulación planteado permite identificar combinaciones de intensidad de raleo e instrucción de trozado que generen un valor neto positivo para una situación de raleo determinada. La planificación del manejo de los bosques podrá valerse de esta información para generar planes de intervención adaptados a las características de cada rodal.

La disminución de la intensidad de raleo significó una reducción en el volumen y en el valor bruto de la madera cosechada. La cosecha de árboles más pequeños y espaciados motivó una menor productividad del *harvester*. Por otra parte, un menor volumen de madera cosechada y el incremento de la proporción de trozas triturables redujeron la productividad de la extracción con *forwarder*. Estos factores combinados condujeron a que en los raleos realizados con la menor intensidad (30%) no se obtuviera un resultado económico positivo. En el escenario actual que afecta al sector forestal en el NEA, con una marcada depresión en la demanda y los precios de los productos forestales, estos resultados implican la necesidad de planificar con cuidado el momento en que se realiza el segundo raleo. En esta operación es necesario poder aplicar una intensidad de raleo de al menos 50% sin comprometer la viabilidad de la masa forestal remanente.

Las instrucciones de trozado que no elaboraron trozas triturables produjeron un volumen total inferior a las demás. El incremento en la complejidad de las instrucciones de trozado y el desaprovechamiento del material triturable estuvieron asociados a una menor productividad del *harvester*. Por último, las instrucciones simplificadas, que elaboraron un único producto aserrable, destinando el resto del fuste a trozas triturables, generaron el mayor valor neto final. Esto tiene una gran importancia para la comercialización de la madera cosechada en los raleos. En el

escenario actual, con bajos precios para las trozas aserrables de menores diámetros, resulta preferible aplicar instrucciones de trozado simples, comercializando todo el material con menos de 18 cm en punta fina como trozas triturables, un *commodity* menos dependiente de las condiciones locales. Esta tendencia podría revertirse si las trozas aserrables con 14 cm en punta fina tuvieran un valor comercial al menos un 16,6% superior al de las trozas triturables.

Por otra parte, las instrucciones de trozado afectaron al balance entre la productividad del corte con *harvester* y la extracción con *forwarder*. Este hallazgo no fue contemplado en los objetivos del estudio, pero permitió observar una problemática de gran importancia para las operaciones de cosecha reales. Los cambios no planificados, en respuesta a los pedidos de las industrias demandantes, puede modificar el equilibrio interno del sistema de cosecha. Esto provoca que la actividad menos productiva restrinja al sistema, elevando los costos de producción. Los contratistas de cosecha deben poder responder con rapidez, implementando turnos dobles o incorporando máquinas adicionales en aquella actividad que se vio afectada por la nueva instrucción de trozado.

El simulador de trozado desarrollado para este estudio responde a la necesidad de replicar de forma realista el proceso de trozado realizado por el *harvester*, incluyendo la respuesta a los principales defectos que presentan los árboles. Permite procesar información generada en los inventarios forestales, mediante la aplicación de un amplio conjunto de instrucciones de trozado diferentes, reportando los volúmenes y el valor obtenido para cada producto. Este sistema de soporte a las decisiones tiene distintas implicancias para el sector forestal. En primer lugar, permite conocer la producción y valor esperados en una operación de raleo partiendo de un inventario previo a la cosecha. Además, debido a que la secuencia de decisiones que se realizan durante el trozado es similar para distintas operaciones y especies, el simulador de trozado podrá ser validado y empleado en otras operaciones de raleo y en talas rasas, tanto para bosques de *Pinus* spp. como *Eucalyptus* spp. La información generada facilitará una planificación inteligente y detallada de las operaciones de cosecha, aportando a la reducción de los costos y a una mejora de la competitividad.

Capítulo 5

Conclusiones generales

Capítulo 5. Conclusiones generales

Las investigaciones desarrolladas en esta tesis realizan aportes al conocimiento de las operaciones de raleo, abordando sus tres componentes principales: elaboración, trozado y extracción. El estudio de un amplio conjunto de operaciones de raleo permitió obtener resultados generales, abstraídos de las situaciones particulares en las que se originó la información. A continuación, se desarrolla una discusión de los principales aportes realizados, su vinculación con otras investigaciones, aplicaciones prácticas y proyección a futuro.

5.1. Sobre la metodología aplicada

5.1.1. Filmación de las operaciones y seguimiento con GNSS

La filmación de las actividades realizadas por los *harvesters* y *forwarder*, y el seguimiento de sus movimientos mediante receptores GNSS, incrementaron el nivel de detalle de los estudios de tiempos. Además, esto garantizó un registro íntegro de la operación, minimizando la influencia del observador y reduciendo la exposición al riesgo durante el trabajo a campo. Esta técnica, tiene antecedentes de uso en Europa (Niemistö et al., 2012; Erber et al., 2016; Strandgard, Mitchell y Acuna, 2017; Holzfeind, Stampfer y Holzleitner, 2018), y en los últimos años comenzó a ser implementada en la región (Hildt et al., 2018; Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019). Su utilización en este estudio también permitió el análisis de la respuesta del operador del *harvester* durante el trozado, suministrando información necesaria para el desarrollo del algoritmo de trozado empleado en el Capítulo 1. El procesamiento detallado e intensivo en tiempo requerido por esta metodología (Musat et al., 2015), fue justificado por el desarrollo de modelos de tiempos parciales de alta precisión. En cambio, para estudios que sólo buscan estimar la productividad de las operaciones de cosecha, resultan prometedoras otras técnicas más económicas, como el procesamiento de la información generada por los nuevos *harvesters* que cumplen con el estándar StanForD 2010 (Arlinger, Möller y Räsänen, 2013), o el seguimiento con GNSS durante largos períodos de tiempo (Olivera et al., 2015; Spinelli et al., 2015).

5.1.2. Ajuste de modelos mixtos

El estudio de un amplio conjunto de *harvesters* y *forwarders*, de diferentes tamaños, operados por diferentes trabajadores y contratistas, fue posible gracias al ajuste de modelos lineales mixtos. En estos, la variación explicada por la combinación máquina-operador fue representada por el efecto aleatorio del sitio (Cuadro 2.2 y Cuadro 3.7). En el estudio de la cosecha, esta técnica fue utilizada por Niemistö et al. (2012) para analizar los tiempos de un equipo de cosecha (un *harvester* y un *forwarder*) trabajando en diferentes rodales, considerando a estos como un factor aleatorio. También la aplicaron Seixas y Batista (2014) al análisis de talas rasas con diferentes *harvesters* sobre ruedas y orugas. De esta forma los efectos significativos observados para las variables predictoras consideradas en cada modelo correspondieron a tendencias comunes para todas las situaciones evaluadas. Esto permite que los resultados obtenidos sean generalizados para el conjunto de *harvesters* y *forwarders* que realizan raleos en la región, posibilitando su aplicación en sistemas de simulación que mejoran la planificación de las operaciones de cosecha (Leszczuk et al., 2017).

5.1.3. Medición de parcelas pequeñas

Durante el estudio del corte con *harvester*, el establecimiento de parcelas y la medición de sus características dasométricas antes del raleo resultó un complemento adecuado de los estudios de tiempos. De esta forma se logró capturar la variabilidad natural de la densidad y de la intensidad del raleo dentro de cada rodal. El pequeño tamaño de estas parcelas (375 m²) resultó adecuado para reflejar las diferencias existentes entre diferentes zonas de un mismo rodal, respondiendo a la tendencia general que indica un aumento de la variabilidad al reducirse el tamaño de las parcelas (Olivera y Visser, 2016). En cada parcela se midió en promedio 25,7 árboles, de los cuales 12,4 fueron cosechados. La heterogeneidad natural de los rodales aportó un desvío estándar de 4,7 árboles cosechados por parcela. Esta variabilidad fue determinante para el análisis realizado en el capítulo 2. El tamaño de la parcela también garantizó que la cámara montada en la cabina del *harvester* pudiera registrar adecuadamente las marcas de pintura existentes en los árboles y todos los movimientos realizados al elaborar cada árbol cosechado.

La medición de la densidad e intensidad de raleo en cada parcela hizo posible ajustar modelos con un conjunto de variables predictoras mayor que los existentes hasta el momento (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Niemistö et al., 2012; Mederski et al., 2016). Por otra parte, estos modelos fueron ajustados al nivel del rodal, de forma similar a los desarrollados por Niemistö et al. (2012). En cambio, en la mayor parte de los estudios de tiempos tradicionales los modelos generan predicciones para árboles individuales (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2006; Hildt et al., 2018). Los modelos generados, sensibles a un amplio conjunto de características de los rodales, resultan ideales para su aplicación en sistemas de simulación de ayuda a las decisiones durante la planificación de la cosecha.

5.1.4. Simulación del trozado

El algoritmo de simulación de trozado utilizado en el Capítulo 1 resultó adecuado para emular de forma realista el proceso de trozado realizado por los *harvesters* evaluados. Su desarrollo respondió a la necesidad de contar con estimaciones realistas del volumen obtenido para cada producto en un raleo, al aplicar distintas instrucciones de trozado. A diferencia de otros algoritmos que optimizan el resultado del trozado (Kohler et al., 2015), el desarrollo utilizado en este estudio respetó el orden de prioridad que cada producto tiene en la instrucción de trozado. Además, resultados preliminares demostraron que la simulación estocástica de los defectos presentes en los árboles genera resultados más ajustados a la realidad (Hildt et al., 2018b), supliendo una de las principales falencias que tienen los algoritmos de simulación del trozado: considerar fustes rectos libres de defectos (Lyhykäinen et al., 2009).

Pese a que en este estudio la simulación de trozado apenas es utilizada como un insumo en el análisis de una operación de raleo integrada, el algoritmo presentado puede aportar a la planificación de las operaciones de raleo. El procesamiento de inventarios forestales, la estimación de los resultados para distintas instrucciones de trozado o escenarios de precios y la simulación de nuevas modalidades de raleo son algunas de las aplicaciones posibles (Malinen, Kilpeläinen y Ylisirniö, 2014). Nuevos estudios deben desarrollarse para conseguir su validación sobre un conjunto amplio de operaciones y su aplicación a la resolución de estos problemas.

5.2. Jerarquización de resultados

5.2.1. Corte y trozado con *harvester*

El estudio presentado en el Capítulo 1 se destacó por incorporar un amplio conjunto de *harvesters* operando en dos regiones diferentes del NEA. El conjunto de situaciones analizadas incluyó máquinas similares a las abordadas por los antecedentes existentes en la región (Mac Donagh et al., 2013a; Hildt et al., 2018; Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019), junto a cuatro modelos de *harvesters* que fueron estudiados por primera vez. Entre los equipos evaluados existieron *harvesters* de diseño forestal, con un tamaño adecuado para operaciones de raleo, como también *harvesters* forestizados desarrollados en la región instalando cabezales cosechadores sobre excavadoras. Esta resultó una muestra representativa del conjunto de *harvesters* medianos que realizan raleos en el noreste argentino y el sur del Brasil.

La fuerte relación observada entre la productividad efectiva y el volumen medio de los árboles cosechados (Figura 2.10A) confirmó la tendencia conocida según la cual la productividad se incrementa con una tasa decreciente a medida que aumenta el tamaño de los árboles (Visser y Spinelli, 2012). Para el conjunto de *harvesters* y rango de volúmenes estudiados no se alcanzó a observar la disminución en la productividad esperable para árboles con tamaños superiores a la capacidad de estos equipos. Por otra parte, otros aportes de este trabajo surgen al analizar el efecto del tamaño de los árboles sobre la duración de las distintas actividades del *harvester*. En primer lugar, se determinó que el tiempo necesario para la ubicación del cabezal alrededor del árbol a cortar se incrementa al aumentar el tamaño de los árboles (Figura 2.7A), sin que esto afecte a la actividad de búsqueda. Por otra parte, el volumen de los árboles cosechados también determinó el tiempo necesario para el corte basal y el desrame y trozado (Figura 2.8A).

El ajuste del Modelo 1 (Cuadro 2.2) demostró que el volumen de los árboles cosechados se incrementó al aumentar la intensidad de raleo, determinando un incremento equivalente en la productividad efectiva del *harvester*. Estos resultados son respaldados por las observaciones de Laitila y Väätäinen, (2013) y Mederski et al. (2016), quienes además indican que un incremento en la productividad es esperable sólo si el aumento en la intensidad de raleo está asociado a la cosecha de árboles más grandes. En cambio, Hiesl, Benjamin y Roth (2015), aplicaron tres intensidades de raleo distintas a bosques mixtos con densidades superiores a los 1.500 árboles h^{-1} , sin observar efectos significativos sobre la productividad. Sin embargo, estos no profundizaron en el análisis del volumen medio cosechado o de los tiempos parciales de cada actividad.

Estos resultados son fundamentales para la planificación de las operaciones de raleo en bosques plantados. El potencial de incrementar en un 12% la productividad efectiva de la cosecha con *harvester* hace necesario considerar la posibilidad de que un menor número de raleos con una mayor intensidad permita viabilizar situaciones donde normalmente esta operación resulta muy costosa.

Por otra parte, el aumento de la densidad mostró un efecto negativo sobre la productividad efectiva, similar al observado por otros autores (Hiesl, Benjamin y Roth, 2015; Mederski et al., 2016). A diferencia de estos antecedentes, el análisis de las actividades parciales que conforman el ciclo operacional permitió determinar que este efecto se debe a una reducción en el tiempo de búsqueda de los árboles y a un incremento en el tiempo de posicionamiento del cabezal, desrame y trozado. Sin embargo, el rango de densidades analizado no permitió observar un efecto significativo de la densidad sobre el volumen de los árboles cosechados. La ampliación del estudio

de estos factores integrando primeros y terceros raleos permitiría abarcar densidades de entre 1.200 y 400 árboles ha⁻¹, mejorando la robustez y generalidad de los efectos detectados.

5.2.2. Extracción con *forwarder*

El estudio presentado en el Capítulo 3 analizó la operación de extracción con *forwarders* en operaciones de raleos similares a las analizadas en el Capítulo 2. Se alcanzó un conjunto amplio de equipos. Los tres *forwarders* livianos son representativos de las máquinas más utilizadas hasta el momento en los raleos de la región (de origen nacional, con un valor de adquisición menor y con una baja complejidad tecnológica). En cambio, los *forwarders* medianos y pesados representan a los equipos adquiridos por los contratistas de cosecha que incrementan su nivel de mecanización y la productividad de sus equipos de cosecha. Estos además representan la tendencia local actual que lleva al incremento del tamaño de los *forwarders* para conseguir mayores productividades aún con distancias de extracción superiores a 300 m, buscando además que los equipos de cosecha puedan operar en raleos y talas rasas.

El análisis pormenorizado de las distintas actividades desarrolladas por los *forwarders* se basó en la tendencia marcada por Nurminen, Korpunen y Uusitalo (2006), Niemistö et al. (2012), Stankić et al. (2012) y Manner, Nordfjell y Lindroos (2013). De esta forma se consiguió individualizar el efecto de los distintos factores evaluados, alcanzándose una mejor comprensión del mecanismo por el cual se genera la productividad en esta operación. En cambio, los estudios previos que analizaron la productividad efectiva de la extracción, sin desglosar actividades, sólo mencionan como factores determinantes a la distancia de extracción, al volumen transportado en cada ciclo y al volumen cosechado por hectárea. Estos dejan fuera del análisis al tamaño o concentración de los productos transportados (Eriksson y Lindroos, 2014; Proto et al., 2018a; Rodrigues et al., 2018).

Se encontró que la velocidad de tránsito fue el único factor que determinó el tiempo insumido en los desplazamientos realizados por los *forwarders* sobre los caminos o en el rodal. Las velocidades medias observadas para estas actividades estuvieron dentro del rango presentado por estudios realizados en otras regiones (Niemistö et al., 2012; Stankić et al., 2012; Manner et al., 2016). Esto sugiere que las condiciones de transitabilidad existentes en los raleos del NEA no afectan en gran medida a las velocidades desarrolladas por los *forwarders* en comparación con otras situaciones a nivel mundial, donde los equipos deben transitar en terrenos con fuertes pendientes o sobre suelos con baja capacidad de soporte.

El estudio realizado demostró que el volumen medio de las trozas extraídas, determinado por el tipo de producto transportado en cada viaje, es el principal factor determinante del tiempo requerido para la cara y la descarga del *forwarder* (Figura 3.3A). Esta tendencia se corresponde con las observaciones realizadas por Stankić et al. (2012) para la extracción de trozas de especies latifoliadas, con productos de mayores dimensiones. Debido a que la carga y la descarga representaron más del 45% del tiempo requerido por el ciclo de extracción, el efecto del volumen medio de los productos transportados fue muy importante. Este hallazgo tiene especial importancia debido a que el volumen medio de las trozas no era considerado un factor relevante, quedando fuera de las hipótesis planteadas.

Por otra parte, el análisis separado de los movimientos realizados durante la carga permitió identificar que la concentración de trozas de cada producto sobre la vía de saca es el principal factor que determina el tiempo requerido para el desplazamiento del *forwarder* durante la carga. Este resultado sigue la línea de las observaciones

iniciales de Nurminen, Korpunen y Uusitalo (2006) y de lo descrito por Manner, Nordfjell y Lindroos (2013) en un ensayo experimental controlado para un *forwarder* mediano. Su principal implicancia es que, como puede observarse en la Figura 3.4B, el tiempo requerido para el desplazamiento durante la carga puede incrementarse de forma exponencial cuando la concentración de trozas del producto extraído es menor a los $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. Esto resulta de gran utilidad durante la planificación de la cosecha debido a que la concentración de trozas puede ser estimada como el cociente entre el volumen cosechado para un producto determinado y la longitud de las vías de saca existentes en el rodal.

Los modelos de tiempos parciales ajustados mediante el análisis detallado de cada actividad incorporan los efectos de los principales factores que afectan a la extracción con *forwarder*. Estos resultarán de utilidad para la planificación de las operaciones de raleo y como línea de base para la evaluación de situaciones de cosecha puntuales (Nurminen, Korpunen y Uusitalo, 2016). Por su sensibilidad a las distintas características del rodal (distancias, volumen medio y concentración de los productos), estos modelos podrán ser utilizados en el desarrollo de simuladores de cosecha, como el SIMNEA (Leszczuk et al., 2017).

5.2.3. Efecto del trozado en la operación de raleo

El capítulo 4 desarrolló un análisis integral de la operación de raleo aplicando los hallazgos presentados en los capítulos anteriores. El principal objetivo de este análisis fue determinar, considerando todos los aspectos implicados, cómo la variación en la intensidad de raleo o en la instrucción de trozado utilizada puede condicionar el resultado final en las operaciones de raleo. Por una parte, los modelos desarrollados en los capítulos anteriores permitieron predecir con gran exactitud (un nivel de explicación de al menos 70%) la productividad alcanzada por *harvesters* y *forwarders* bajo distintas situaciones de trabajo. Sin embargo, para realizar el análisis integral de la operación fue necesario desarrollar un simulador de trozado que permitiera estimar los volúmenes aprovechados, el volumen individual y la concentración de trozas para cada producto cosechado, de acuerdo a las diferentes instrucciones de trozado utilizadas durante la cosecha.

El sistema de simulación desarrollado y evaluado en este trabajo representa un desarrollo novedoso porque combina un algoritmo de trozado basado en el funcionamiento del *harvester* (Figura 4.2) con un conjunto de variables estocásticas que representan a las decisiones que debe tomar el operario frente a los diferentes defectos existentes en los árboles (Barth et al., 2014; Kärhä et al., 2017; Labelle, Bergen y Windisch, 2017). Este sistema demostró con anterioridad su capacidad para predecir los volúmenes de cada producto obtenidos en raleos y talas rasas (Hildt et al., 2018b). Además, en este estudio permitió simular la aplicación de diferentes instrucciones de trozado, a distintos rodales y con intensidades de raleo comprendidas entre el 30 y el 70%. Sin embargo, su desarrollo como herramienta de soporte a las decisiones aplicable a la planificación de la cosecha aún se encuentra en una fase temprana. Aun requerirá del desarrollo de pruebas extensas, con un conjunto de situaciones amplio, contrastando los resultados de las simulaciones contra los volúmenes obtenidos en las operaciones de cosecha.

La intensidad de raleo fue el principal factor condicionante del valor de la madera cosechada en los raleos, afectando también a la productividad del *harvester* y del *forwarder*. La disminución de la intensidad de raleo hasta el 30% significó la cosecha de un volumen 45% inferior al de las situaciones de raleo más comunes en la región (Figura 4.4). Esto estuvo acompañado por una reducción de la productividad

del *harvester* por debajo de los $17 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y por una reducción de la productividad del *forwarder* por debajo de los $14,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Figura 4.8). En este escenario, el valor de la madera cosechada apenas alcanzó a compensar los altos costos de cosecha. En cambio, al incrementarse la intensidad de raleo el aumento del valor bruto de la madera cosechada y la reducción de los costos de cosecha debido al incremento de la productividad del *harvester* y del *forwarder*, resulta en un valor neto positivo, tornando económicamente factible la realización de los raleos.

En segundo lugar, la instrucción de trozado afectó tanto al valor de la madera recuperada como a la productividad de la cosecha. Por un lado, en las distintas instrucciones evaluadas, la elaboración de trozas triturables permitió incrementar el volumen de madera aprovechada. En cambio, las instrucciones que sólo elaboraron trozas aserrables hasta 14 cm en punta fina (Cuadro 4.5) presentaron el menor volumen y valor bruto recuperado (Figura 4.5). Por otra parte, para el escenario de precios considerado, el incremento del número de productos elaborados en las instrucciones combinadas respecto a las instrucciones simples (Cuadro 4.2) no significó un aumento en el valor bruto de la madera elaborada. En cambio, el aumento de la complejidad de la instrucción de trozado supuso una reducción en la productividad del *harvester* y el *forwarder* (Figura 4.8), con un incremento en el costo de cosecha y una disminución en el valor neto recuperado (Figura 4.9).

Estos resultados finales responden a las hipótesis planteadas, demostrando que el incremento en el número de productos elaborados pudo afectar de forma negativa a la productividad de la elaboración con *harvester* y la extracción con *forwarder*, reduciendo el valor neto de la madera cosechada. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estas conclusiones dependen en parte de la matriz de precios considerada para los productos que integran las instrucciones de trozado. En este estudio se ha utilizado la matriz de precios actual existente en la provincia de Misiones (COIFORM, 2018), que responde a un momento en el que todos los productos poseen valores inferiores a los encontrados en otras regiones (Malinen et al., 2010), con una escala de valores definida por el diámetro en punta fina de las trozas (Kimmich, Hildt y Mac Donagh, 2019). Para escenarios con matrices de precios diferentes, donde las trozas aserrables tuvieran un valor varias veces superior al de las trozas triturables, o donde las trozas de mayor longitud tuvieran un valor adicional, los resultados finales podrían ser diferentes. Serían esperables diferencias más marcadas en el valor neto de los diferentes tipos de instrucciones de trozado. Sin embargo, estos cambios en el escenario de precios no afectarían a la productividad del corte y la extracción, y a los costos observados en este estudio.

El análisis integral de los raleos expuesto en el Capítulo 4 consiguió combinar los modelos de productividad desarrollados para *harvesters* y *forwarders*, junto a un modelo de simulación de la operación de trozado. El resultado final es un modelo integral de simulación de la cosecha donde los distintos componentes interactúan por medio de las propiedades de los productos elaborados: volumen cosechado, volumen medio de las trozas, concentración de trozas (Figura 4.1). Aunque en este estudio este modelo ha sido utilizado para comparar las diferencias existentes entre distintas modalidades de raleo y trozado, además tiene un importante potencial para su utilización como herramienta de ayuda a la toma de decisiones y a la planificación en operaciones de raleo reales. La continuación de su desarrollo y su integración en una herramienta de *software* funcional permitirán mejorar el proceso de decisión en las operaciones de raleo del nordeste argentino.

5.3. Relevancia para futuras investigaciones

Los modelos mixtos desarrollados para *harvesters* y *forwarders* en este estudio han conseguido estimar los efectos de las distintas variables predictoras, generalizándolos para el conjunto de máquinas estudiadas. Para ello fue necesario agrupar a cada máquina, operario y situación de trabajo como un “sitio”, integrado en el modelo como un factor aleatorio. Sin embargo, diferentes estudios han demostrado que la productividad de las máquinas de cosecha forestal depende en gran medida de las habilidades, experiencia y nivel de capacitación de las personas que las operan (Purfürst y Erler, 2011; Alam et al., 2014; Apăfăian, Proto y Borz, 2017). Por esta razón futuros estudios deberían explorar de que forma el nivel de capacitación de los operarios afecta a las actividades realizadas por el *harvester* y el *forwarder* en los raleos.

Por otra parte, en este estudio la concentración de trozas fue determinada de forma indirecta relacionando el volumen total transportado por el *forwarder* y la distancia recorrida durante la carga. Futuros estudios que analicen estas actividades con mayor precisión deberían analizar cuáles son los factores que determinan la distribución espacial de las trozas dentro del rodal. En este sentido, el tamaño de las pilas y la forma en la que se disponen las trozas también tienen el potencial de afectar a la productividad del *forwarder* (Väätäinen et al., 2016).

El concepto de simulación integral de los raleos desarrollado en este estudio podrá ser utilizado en el análisis de otros factores que resultan de interés, como el efecto de diferentes densidades de plantación, la realización de raleos sistemáticos o raleos selectivos ingresando con la maquinaria en los entre líneas, el efecto del momento en que se realizan los raleos sobre el costo de la cosecha y el valor de la madera, y la posibilidad de obtener productos destinados a plantas generadoras de energía a partir de biomasa forestal.

Capítulo 6

Bibliografía

Capítulo 6. Bibliografía

- 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. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37:1-15.
- Akay, A. E., Sessions, J., Serin, H., Pak, M., Yenilmez, N. 2010. Applying Optimum Bucking Method in Producing Taurus Fir (*Abies cilicica*) Logs in Mediterranean Region of Turkey. *Baltic Forestry*, 16:273-279.
- Alam, M., Walsh, D., Strandgard, M., Brown, M. 2014. A log-by-log productivity analysis of two Valmet 475EX harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 25:14-22.
- Apăfăian, A.I., Proto, A.R., Borz, S.A. 2017. Performance of a mid-sized harvester-forwarder system in integrated harvesting of sawmill, pulpwood and firewood. *Annals of Forest Research*, 60:227–241.
- Arce, J., Mac Donagh, P., Friedl, R. 2004. Geração de padrões ótimos de corte a través de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. *Rev. Árvore*, 28:207-217.
- Arlinger, J., Möller, J.J., Räsänen, T. 2013. StanForD 2010 – modern communication with forest machines. *SKOGFORSK*, Uppsala, Sweden, 16p.
- Barth, A., Möller, J.J., Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Hedberg, R., Söderman, U. A. 2014. Swedish case study on the prediction of detailed product recovery from individual stem profiles based on airborne laser scanning. *Annals of Forest Science*, 72:47-56.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67:1-48.
- Bergström, D., Bergsten, U., Nordfjell, T. 2010. Comparison of Boom-Corridor Thinning and Thinning From Below Harvesting Methods in Young Dense Scots Pine Stands. *Silva Fennica*, 44:669-679.
- Bramucci, M., Seixas, F. 2002. Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de “harvesters” na colheita florestal. *Scientia Forestalis*, 30:62–74.
- Carmo, F. C. d. A d, Fiedler, N. C., Lopes, E. d. S., Pereira, D. P., Marin, H. B., Silva, E. N. d. 2013. Analysis of optimum density of forest roads in rural properties. *CERNE*, 19:451-459.
- COIFORM (Colegio de Ingenieros Forestales de Misiones). 2018. Precio de productos forestales mes de noviembre 2018. <http://www.coiform.com.ar/>
- Coneglian, A., Batista, W. R., Hokama, L. F., Santiago, F. L. S., Fenner, P. T. 2010. Avaliação do rendimento e custo operacional do Forwarder na colheita de eucalipto em primeiro e segundo corte. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, 15:13-24.
- Conrad IV, J.L. 2018. Costs and Challenges of Log Truck Transportation in Georgia, USA. *Forest*, 9:650-664.
- Crechi, E. H., Fassola, H. E., Fernandez, R. A., Friedl, R. A. 2005. El Simulador Forestal. *idiaXXI: revista de información sobre investigación y desarrollo agropecuario - INTA.*, 5:46-52.
- Crechi, E. H., Fassola, H. E., Keller, A., Barth, S. 2006. Modelos de estimación del volumen individual de árboles con y sin corteza de *Pinus taeda* L. para la zona norte de Misiones, Argentina. 12as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Eldorado, MN, pp.14, 2006.

- Dems, A., Rousseau, L. M., Frayret, J., M. 2015. Effects of different cut-to-length harvesting structures on the economic value of a wood procurement planning problem. *Annals of Operations Research*, 232:65-86.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. 2018. InfoStat versión 2018. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Di Rienzo, J.A., Guzmán, A.W., Casanoves, F. 2002. A Multiple Comparisons Method based On the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree Obtained by Average Linkage of the Matrix of Euclidean Distances between Treatment Means. *JABES*, 7:129-142.
- Đuka, A., Poršinsky, T., Pentek, T., Šporčić, M. 2014. Influence of Prescribed Method of Roundwood Scaling on Forwarder Efficiency, 5th Forest Engineering Conference together with the 47th International Symposium on Forestry Mechanisation “Forest engineering: propelling the forest value chain”. Gerardmer, Francia, Septiembre 23-26, 2014.
- Eliasson, L. 1999. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *Forest Science*, 45:26-34.
- Eliasson, L., Lageson, H. 1999. Simulation Study of a Single-grip Harvester in Thinning from Below and Thinning from Above. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14:589-595.
- Eliasson L., Bengtsson, J., Cedergren, J., Lageson, H. 1999. Comparison of Single-Grip Harvester Productivity in Clear and Shelterwood Cutting. *Journal of Forest Engineering*. 10:43-48.
- EMBRAPA Florestas. 2014. SOFTWARES SIS: manejo e análise econômica de plantações florestais: SIS. Embrapa Florestas, PR, Brasil.
- Erber, G., Holzleitner, F., Kastner, M., Stampfer, K. 2016. Effect of multi-tree handling and tree-size on harvester performance in small-diameter hardwood thinnings. *Silva Fennica*, 50:1-17.
- Eriksson, M., Lindroos, O. 2014. Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering*, 25:179-200.
- FAO. 1992. Cost control in forest harvesting and road construction. Forestry Paper No. 99. Roma. URL: <http://www.fao.org/3/T0579E/T0579E00.htm>
- Fulvio, D.F., Bergström, D. 2013. Analyses of a single-machine system for harvesting pulpwood and/or energy-wood in early thinnings, *International Journal of Forest Engineering*, 24:2-15.
- Garbers, R.E., Chen, Y.E. 2013. Costos Operativos de Maquinaria Agrícola (Síntesis Básica para su Cálculo). Dirección Nacional de Contratistas Rurales e Insumos Agrícolas. Subsecretaría de Agricultura, Buenos Aires, Argentina. URL: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/contratistas/biblioteca/>
- Ghaffarian, M. R., Stampfer, K., Sessions, J. 2007. Forwarding productivity in Southern Austria. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 28:169–175.
- Harrison, X. A., Donaldson, L., Correa-Cano, M. E., Evans, J., Fisher, D. N., Goodwin, C. E. D., Robinson, B. S., Hodgson, D. J., Inger, R. 2018. A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. *PeerJ*, 6(e4794):2-32.
- Han, H., Lee, H. W., Johnson, L. R. 2004. Economic feasibility of an integrated harvesting system for small-diameter trees in southwest Idaho. *Forest Products Journal*, 54:21-27.

- Hiesl, P., Benjamin, J. G. 2015. Estimating Processing Times of Harvesters in Thinning Operations in Maine. *Forest Products Journal*, 65:180-186.
- Hiesl, P., Benjamin, J. G., Roth, B. E. 2015. Evaluating harvest costs and profit of commercial thinnings in softwood stands in west-central Maine: A case study. *The forestry chronicle*, 91:150-160.
- Hildt, E., Mac Donagh, P.M., Somma, F.F., Alegranza, D., Durán, D. 2018a. Productividad de un *harvester* en raleos de plantaciones de pinos en el noreste Argentino. *Ciência Florestal*, 28:1627-1639.
- Hildt, E., Leszczuk, A., De Lima, D., Cinauski, R., Reis, H., Durán, D., Mac Donagh, P. 2018b. Estimación del volumen obtenido en operaciones de cosecha con *harvester* mediante simulación de trozado. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, ER, pp.5, 2018.
- Holzfeind, T., Stampfer, K., Holzleitner, F. 2018. Productivity, setup time and costs of a winch-assisted forwarder. *Journal of Forest Research*, 23:196–203.
- INTA, 2013. PlaForNEA – Plataforma de gestión forestal. INTA EEA Montecarlo. URL: <http://www.plafornea.com.ar>, consultada el 03/03/2017.
- Kangas, A., Hurtala, H., Mäkinen, H., Lappi, J. 2012. Estimating the value of wood quality information in constrained optimization. *Can. J. For. Res.*, 42:1347–1358.
- Kärhä, K., Rönkkö, E., Gumse, S-I. 2004. Productivity and cutting costs of thinning harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 15:43–56.
- Kärhä, K.; Änäkkälä, J.; Hakonen, O.; Palander, T.; Sorsa, J.A.; Räsänen, T.; Moilanen, T. 2017. Analyzing the Antecedents and Consequences of Manual Log Bucking in Mechanized Wood Harvesting. *Mechanics, Materials Science & Engineering*, 12:1-15.
- Keller, A., Crechi, E. 2015. Ecuaciones de volumen y forma para *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis* cultivado en la zona noroeste de Misiones, Argentina. XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, ER, pp.5, 2015.
- Kelly, M.C., Germain, R.H. 2020. Applying Theory of Constraints to Timber Harvesting: A Case Study from the Northeast USA. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 41:59-69.
- Kimmich, D., Hildt, E., Mac Donagh, P, M. 2019. Recuperación de valor con *harvester* aplicando tecnología de optimización de trozado. *Scientia Forestalis*, 47:216-223.
- Kivinen, V. P. 2004. A genetic algorithm approach to tree bucking optimization. *Forest Science*, 50:696–710.
- Kivinen, V. P. 2006. A forest-level genetic algorithm-based control system for generating stand-specific log demand distributions. *Can. J. For. Res.*, 36:1705–1722.
- Kohler, S. V., Koehler, H.S., Filho, A.F., Arce, J.E., Machado, S.d.A. 2015. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. *Floresta*, 45:545–554.
- Košir, B., Magagnotti, N., Spinelli, R. 2015. The role of work studies in forest engineering: status and perspectives. *International Journal of Forest Engineering*, 26:160-170.
- Kühmaier, M., Stampfer, K. 2012. Development of a multi-criteria decision support tool for energy wood supply management. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 33:181–198.

- Labelle, E. R., Bergen, M., Windisch, J. 2017. The effect of quality bucking and automatic bucking on harvesting productivity and product recovery in a pine-dominated stand. *European Journal of Forest Research*, 136:639-652.
- Laitila, J., Väättäin, K. 2013. The cutting productivity of the excavator-based harvester in integrated harvesting of pulpwood and energy wood. *Baltic Forestry*, 19:289–300.
- Lageson, H. 1997. Effects of Thinning Type on the Harvester Productivity and on the Residual Stand. *Journal of Forest Engineering*, 9:7–14.
- Lazdiņš, A., Prindulis, U., Kalēja, S., Daugaviete, M., Zimelis, A. 2016. Productivity of Vimek 404 T5 harvester and Vimek 610 forwarder in early thinning. *Agronomy Research*, 14:475-484.
- Lefcheck, J.S. 2016. PiecewiseSEM: Piecewise structural equation modeling in R for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, (7):573-579.
- 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 - XLIII CLEI-46 JAIIO, pp.194-204.
- Lindroos, O., Wästerlund, I. 2014. Theoretical Potentials of Forwarder Trailers with and without Axle Load Restrictions, *Croatian Journal of Forest Engineering*, 35:211–219.
- Lopes, E. d. S., Roza, B. L., Oliveira, F. M. 2017. Efeito de variáveis operacionais na produtividade de um harvester de pneus no desbaste de pinus. *Floresta*, 47:417-426.
- Lopes, E. d. S., Cavassin Diniz, C. C., Serpe, E. L., Cabral, O. M. d. J. V. 2016. Efeito do sortimento da madeira na produtividade e custo do forwarder no desbaste comercial de *Pinus taeda*. *Scientia Forestalis*, 44:57–66.
- Lu, K., Bi, H., Watt, D., Strandgard, M., Li, Y. 2018. Reconstructing the size of individual trees using log data from cut-to-length harvesters in *Pinus radiata* plantations: a case study in NSW, Australia. *Journal of Forestry Research*, 29:13-33.
- Lyhykäinen, H.T., Mäkinen, H., Mäkelä, A., Pastila, S., Heikkilä, A., Usenius, A. Predicting lumber grade and by-product yields for Scots pine trees. *Forest Ecology and Management*, 258:146-158.
- McDonald, T.P., Fulton, J.P. 2005. Automated time study of skidders using global positioning system data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48:19–37.
- Mac Donagh, P. M., Mulawka, J. A., Friedl, R. A., Zaderenko, C. 2013a. Productividad y costos de pequeños harvester con oruga operando en plantaciones de *Pinus* spp. en el noreste argentino. *Scientia Forestalis*, 41:425–434.
- Mac Donagh, P. M., Hildt, E., Friedl, R. A., Zaderenko, C., Alegranza, D. A., 2013b. Influencia de la intensidad de raleos en la performance de un harvester de ruedas en el noreste argentino. *Revista Floresta*, 43:653–662.
- Mac Donagh, P. M., Botta, G., Schlichter, T., Cubbage, F. 2017. Harvesting contractor production and costs in forest plantations of Argentina, Brazil, and Uruguay. *International Journal of Forest Engineering*, 28:157-168.
- Malinen, J., Kilpeläinen, H., Wall, T., Verkasalo, E. 2006. A Variation in the value recovery when bucking to alternative timber assortments and log dimensions. *Forestry Studies*, 45:89-100.
- Malinen, J., Kilpeläinen, H., Piira, T., Redsvén, V., Wall, T., Nuutinen, T. 2007. Comparing model-based approaches with bucking simulation-based approach in the prediction of timber assortment recovery. *Forestry*, 80:309-321.

- Malinen, J., Piira, T., Kilpeläinen, J., Wall, T., Verkasalo, E. 2010. Timber Assortment Recovery Models for Southern Finland. *Baltic Forestry*, 16:102-112.
- Malinen, J., Kilpeläinen H., Ylisirniö, k. 2014. Description and evaluation of Prehas software for pre-harvest assessment of timber assortments. *International Journal of Forest Engineering*, 25:66-74.
- Malinovski, R. A., Malinovski, R. A., Malinovski, J. R., Yamaji, F. M. 2006. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. *Floresta*, 36:169-182.
- McNeel, J. F., Rutherford, D. 1994. Modelling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*, 6:7-14.
- Manner, J., Nordfjell, T., Lindroos, O. 2013. Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding. *Silva Fennica*, 47:1-19.
- Manner, J., Palmroth, L., Nordfjell, T., Lindroos, O. 2016. Load level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. *Silva Fennica*, 50:1-19.
- Manner, J., Nordfjell, T., Lindroos, O. 2016. Automatic load level follow-up of forwarders' fuel and time consumption. *International Journal of Forest Engineering*, 27:151-160.
- Martiarena, R. A., Frangi, J. L., Pinazo, M. A., Von Wallis, A., Fernández, R. A. 2011. Effect of Thinning and Harvest Type on Storage and Losses of Phosphorous in *Pinus taeda* L. Plantations in Subtropical Argentina. *International Journal of Forestry Research*, ID 761532:1-10.
- Martins, R. J., Seixas, F., Stape, J. L. 2009. Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 37:253-263.
- Mederski, P. S., Bembenek, M., Karaszewski, Z., Łacka, A., Szczepańska-Álvarez, A., Rosińska, M. 2016. Estimating and Modelling Harvester Productivity in Pine Stands of Different Ages, Densities and Thinning Intensities, *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37:27-36.
- Minette, L., Moreura, F., de Souza, A., Machado, C., Silva, K. 2004. Análise Técnica e Econômica do Forwarder em três subsistemas de Colheita de Floresta de Eucalipto. *R. Árvore*, 28:91-97.
- Murphy, G.E., Acuna, M.A., Dumbrell, I. 2010. Tree value and log product yield determination in radiata pine (*Pinus radiata*) plantations in Australia: comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 40:2223-2233.
- Musat, E.C., Apăfăian, A.I., Ignea, Gh., Ciobanu, V.D., Iordache, E., Derczeni, A.I., Spârchez, Gh., Vasilescu, M.M., Borz, S.A.I. 2015. Time expenditure in computer aided time studies implemented for highly mechanized forest equipment. *Annals of Forest Research*, 59:129-144.
- Nakagawa, M., Hamatsu, J., Saitou, T., Ishida, H. 2007. Effect of Tree Size on Productivity and Time Required for Work Elements in Selective Thinning by a Harvester. *International Journal of Forest Engineering*, 18:24-28.
- Nakahata, C., Aruga, K., Saito, M. 2014. Examining the Optimal Bucking Method to Maximize Profits in Commercial Thinning Operations in Nasunogahara Area, Tochigi Prefecture, Japan. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34:45-61.
- Niemistö, P., Korpunen, H., Laurén, A., Salomäki, M., Uusitalo, J. 2012. Impact and Productivity of Harvesting while Retaining Young Understorey Spruces in Final Cutting of Downy Birch. *Silva Fennica*, 46:81-97.

- Nordfjell, T., Athanassiadis, D., Talbot, B. 2003. Fuel Consumption In Forwarders. *International Journal of Forest Engineering*, 14:11–20.
- Nurminen, T., Korpunen, H., Uusitalo, J. 2006. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-length Harvesting System. *Silva Fennica*, 40:335–363.
- Olivera, A., Visser, R., Acuna, M., Morgenroth, J. 2015. Automatic GNSS enabled harvester data collection as a tool to evaluate factors affecting harvester productivity in an *Eucalyptus* spp. harvesting operation in Uruguay. *International Journal of Forest Engineering*, 27:15-28.
- Olivera, A., Visser, R. 2016. Development of forest-yield maps generated from Global Navigation Satellite System (GNSS) -enabled harvester StanForD files: preliminary concepts. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 46:1-10.
- Ovaskainen, H., Uusitalo, J., Väättäinen, K. 2004. Characteristics and Significance of a Harvester Operators' Working Technique in Thinnings. *International Journal of Forest Engineering*, 15:67-77.
- Ovaskainen, H., Uusitalo, J., Sassi, T. 2006. Effect of edge trees on harvester positioning in thinning. *Forest Science*, 52:659-669.
- Palander, T., Nuutinen, Y., Kariniemi, A., Väättäinen, K. 2013. Automatic time study method for recording work phase times of timber harvesting. *Forest Science*, 59:472–483.
- Peuhkurinen, J., Maltamo, M., Malinen, J. 2008. Estimating Species-Specific Diameter Distributions and Saw Log Recoveries of Boreal Forests from Airborne Laser Scanning Data and Aerial Photographs: a Distribution-Based Approach. *Silva Fennica*, 42:625-641.
- Petty, A., Kärhä, K. 2014. Productivity and cost evaluations of energy-wood and pulpwood harvesting systems in first thinnings, *International Journal of Forest Engineering*, 25:37-50.
- Poršinsky, T., Pentek, T., Bosner, A., Stanki, I. 2012. Ecoefficient Timber Forwarding on Lowland Soft Soils. En Clement A. Okia (eds.) *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*. InTech, Rijeka, Croatia, 300p.
- Proto, A. R., Macrì, G., Visser, R., Harrill, H., Russo, D., Zimbalatti, G. 2018a. Factors affecting forwarder productivity. *European Journal of Forest Research*, 137:143–151.
- Proto, A. R., Macrì, G., Visser, R., Harrill, H., Russo, D., Zimbalatti, G. 2018b. A Case Study on the Productivity of Forwarder Extraction in Small-Scale Southern Italian Forests. *Small-scale Forestry*, 17:71–87.
- Purfürst, F. T., Erler, J. 2011. The human influence on productivity in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering*, 22:15–22.
- Rodrigues, C.K., Lopes, E.d.S., Figueiredo, A.F., Cândido, M.K.d.S. 2018. Modeling of forwarder productivity and costs in thinned pine stands. *Floresta*, 48:285-292.
- Russell, F., Mortimer, D. 2005. A review of small-scale harvesting systems in use worldwide and their potential application in Irish forestry. National Council for Forest Research and Development (COFORD), Dublin, UK, 56p.
- Seixas, F., Batista, J. L. F. 2014. Comparação técnica e econômica entre harvesters de pneus e com máquina base de esteiras. *Ciência Florestal*, 24:185-191.
- Simões, D., Fenner, P. T., Tsutsui, E. M. S. 2010. Avaliação técnica e econômica da colheita de florestas de eucalipto com harvester. *Scientia Forestalis*, 38:611-618.
- Spinelli, R., Owende, P.M.O., Ward, S.M. Tornero, M. 2004. Comparison of short-wood forwarding systems used in Iberia. *Silva Fennica*, 38:85–94.

- Spinelli, R., Magagnotti, N. 2010. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25:69-77.
- Spinelli, R., Lombardini, C., Magagnotti, N. 2014. The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fennica*, 48:1–15.
- Spinelli, R., Magagnotti, N., Pari, L., De Francesco, F. 2015. A comparison of tractor-trailer units and high-speed forwarders used in Alpine forestry. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30:470–477.
- Stankić, I., Poršinsky, T., Tonković, I., Frntić, M. 2011. Development and implementation of productivity norms for forwarders in Croatia. En: FORMEC, Octubre 9-13, 2011, Graz, Austria.
- Stankić, I., Poršinsky, T., Tomašić, Ž., Tonković, I., Frntić, M. 2012. Productivity Models for Operational Planning of Timber Forwarding in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 33:61-78.
- Strandgard, M., Mitchell, R. 2015. Automated Time Study of Forwarders using GPS and a vibration sensor. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 36:175-184.
- Strandgard, M., Walsh, D., Acuna, M. 2013. Estimating harvester productivity in *Pinus radiata* plantations using StanForD stem files. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 28:73-80.
- Strandgard, M., Mitchell, R., Acuna, M. 2017. Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation. *Journal of Forest Science.*, 63:324–330.
- Suadicani, K., Fjeld, D. 2001. Single-tree and Group Selection in Montane Norway Spruce Stands: Factors Influencing Operational Efficiency. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16:79-87.
- Suadicani, K., Nordfjell, T. 2003. Operational aspects of row and selective thinning in the establishing of a shelterwood in a 50-year-old Norway spruce stand. *International Journal of Forest Engineering*, 14:25-37.
- Tiernan, D., Zeleke, G., Owende, P.M.O., Kanali, C.L., Lyons, J., Ward, S.M. 2004. Effect of Working Conditions on Forwarder Productivity in Cut-to-length Timber Harvesting on Sensitive Forest Sites in Ireland. *Biosystems Engineering*, 87:167-177.
- Tolan, A., Visser, R. 2015. The effect of the number of log sorts on mechanized log processing productivity and value recovery. *International Journal of Forest Engineering*, 26:36-47.
- Väätäinen, K., Ala-Fossi, A., Nuutinen, Y., Röser, D. 2006. The effect of the single grip harvester's log bunching on forwarder efficiency. *Baltic Forestry*, 12:64-69.
- Visser, R., Spinelli, R., Saathof, J., Fairbrother, S. 2009. Finding the 'Sweet-Spot' of Mechanised Felling Machines. Kings Beach, CA, USA. 32nd Annual Meeting of the Council on Forest Engineering (COFE 09), pp.10, 2009.
- Visser, R., Spinelli, R. 2012. Determining the shape of the productivity function for mechanized felling and felling-processing. *Journal of Forest Research*, 17:397-402.