



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

**TESIS DOCTORAL
EMPACADO DISCONTINUO A PIE DE
TOCÓN DE RESIDUOS SELVÍCOLAS:
GESTIÓN INTEGRAL DE BIOMASA
FORESTAL**

Autor:

D. Rafael Agudo Romero

Ingeniero de Montes

Directores:

Prof. Dr. D. Rafael López Luque

Prof. Dr. D. José Javier Rubio Ledesma

Dr. Ingeniero Agrónomo

Dr. Ingeniero de Montes

MARZO, 2010

TITULO: *Empacado discontinuo a pie de tocón de residuos selvícolas: gestión integral de biomasa forestal*

AUTOR: *RAFAEL AGUDO ROMERO*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2010
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

ISBN-13: 978-84-693-2988-7



TÍTULO DE LA TESIS: EMPACADO DISCONTINUO A PIE DE TOCÓN DE RESIDUOS SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL DE BIOMASA FORESTAL

DOCTORANDO/A: RAFAEL AGUDO ROMERO

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

La originalidad de esta tesis viene dada por el estudio del trabajo de empacado de residuo selvícola a pie de tocón en claras con las anchuras normales de calle para este tipo de tratamiento en condiciones mediterráneas, del que no existe ningún estudio a nivel mundial. También se estudia el sistema de aprovechamiento del residuo selvícola incluyendo el transporte viario y extraviario de la bala, para conocer todas las fases del proceso que permitan el aprovechamiento del residuo selvícola. Se completa el estudio con la integración del aprovechamiento del residuo en el proceso principal de aprovechamiento de la madera y por lo tanto, su gestión integral con la consiguiente optimización de medios y reducción de costes.

La metodología empleada en el estudio de tiempos, rendimientos y costes ha sido utilizada en diversos estudios de maquinaria forestal, si bien, se confeccionan modelos de productividad paramétricos que puedan predecir costes y rendimientos de las máquinas y el sistema de aprovechamiento.

Este estudio dentro la gestión integral de la biomasa forestal abre varias líneas de investigación para otros sistemas logísticos tal y como se ha mostrado en comunicaciones enviadas a congresos.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 7 de marzo de 2010

Firma del/de los director/es


Fdo.: RAFAEL LÓPEZ LUQUE


Fdo.: JOSÉ RUBIO LEDESMA

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

SUMMARY

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1 | CONCEPTO DE BIOMASA..... | 3 |
| 1.2 | POTENCIAL ECONÓMICO DE LA BIOMASA FORESTAL | 3 |
| 1.3 | ALTA TECNOLOGÍA | 4 |
| 1.4 | SECTOR FORESTAL ANDALUZ | 6 |
| 2 | ANTECEDENTES | 9 |
| 2.1 | ANTECEDENTES DE TECNOLOGÍA DE EMPACADO FORESTAL..... | 14 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 20 |

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS..... | 23 |
| 1.1 | FASE PRELIMINAR..... | 23 |
| 1.1.1 | Localización del área de experimentación | 23 |
| 1.1.2 | Aspectos selvícolas y de ordenación | 23 |
| 1.2 | CARACTERIZACIÓN FISIOGRÁFICA Y DASOMÉTRICA..... | 24 |
| 1.2.1 | Caracterización fisiográfica | 24 |
| 1.2.2 | Caracterización dasométrica | 24 |
| 1.2.2.1 | Volúmenes maderables extraídos..... | 26 |
| 1.3 | CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SELVÍCOLAS | 27 |
| 1.3.1 | Residuo generado..... | 27 |
| 1.3.2 | Residuo empacado | 28 |
| 1.3.2.1 | Análisis granulométrico..... | 29 |
| 1.3.3 | Residuo desprendido y no recogido. Análisis de nutrientes | 31 |
| 1.3.3.1 | Análisis de nutrientes..... | 32 |
| 1.4 | DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS Y RENDIMIENTOS DE LA EMPACADORA | 33 |
| 1.4.1 | Definiciones..... | 34 |
| 1.4.2 | Toma de datos..... | 37 |
| 1.4.2.1 | Partes diarios..... | 37 |
| 1.4.2.2 | Cronometraje continuo..... | 38 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.4.2.3 | Filmación | 39 |
| 1.5 | ESTUDIO DEL TRANSPORTE VIARIO Y EXTRAVIARIO DE LAS BALAS..... | 39 |
| 1.5.1 | Transporte extraviario: saca con autocargador | 40 |
| 1.5.2 | Transporte viario | 41 |
| 2 | CARACTERIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS..... | 42 |
| 2.1 | DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE EXPERIMENTACIÓN | 42 |
| 2.2 | CRITERIOS SELVÍCOLAS..... | 45 |
| 2.2.1 | Plan Técnico de Ordenación del Grupo de Montes de Gérgal | 45 |
| 2.2.1.1 | Plan de cortas..... | 46 |
| 2.2.2 | Estudio de optimización de las claras y clareos efectuados en la Sierra de Los Filabres | 46 |
| 2.2.2.1 | Estimación cuantitativa de los tratamientos de <i>Pinus sylvestris</i> L..... | 47 |
| 2.2.3 | Señalamiento..... | 48 |
| 2.2.3.1 | Señalamiento de pies | 48 |
| 2.2.3.2 | Señalamiento de calles..... | 49 |
| 2.3 | DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE PRODUCTIVIDAD DE LA EMPACADORA | 49 |
| 2.3.1 | Empacado a pie de pista (EPP) | 51 |
| 2.3.2 | Empacado por curvas de nivel (ECN) | 52 |
| 2.3.3 | Empacado por máxima pendiente (EMP) | 52 |
| 3 | METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS | 53 |
| 3.1 | ELABORACIÓN DE DATOS..... | 53 |
| 3.2 | ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA EMPACADORA | 53 |
| 3.2.1 | Amortización e intereses..... | 53 |
| 3.2.2 | Seguro..... | 53 |
| 3.2.3 | Maquinista..... | 53 |
| 3.2.4 | Combustible y lubricantes..... | 54 |
| 3.2.5 | Mantenimiento y reparaciones..... | 54 |
| 3.2.6 | Neumáticos | 54 |
| 3.3 | ANÁLISIS DEL SISTEMA LOGÍSTICO INTEGRADO Y TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL..... | 54 |

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | CARACTERIZACIÓN FISOGRÁFICA Y DASOMÉTRICA..... | 59 |
| 1.1 | CARACTERIZACIÓN FISOGRÁFICA..... | 59 |
| 1.2 | CARACTERIZACIÓN DASOMÉTRICA | 59 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 1.2.1 | Volúmenes maderables extraídos..... | 64 |
| 2 | CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO SELVÍCOLA | 65 |
| 2.1 | RESIDUO GENERADO..... | 65 |
| 2.2 | RESIDUO EMPACADO..... | 68 |
| 2.2.1 | Análisis granulométrico..... | 71 |
| 2.3 | RESIDUO DESPRENDIDO Y NO RECOGIDO. ANÁLISIS DE NUTRIENTES. | 72 |
| 2.3.1 | Análisis de nutrientes..... | 73 |
| 3 | ANÁLISIS DE LA EMPACADORA | 75 |
| 3.1 | DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE TRABAJO | 75 |
| 3.2 | ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE LA EMPACADORA WOODPAC | 77 |
| 3.2.1 | Distribución de tiempos y coeficiente de efectividad..... | 77 |
| 3.2.1.1 | Ensayo a pie de pista (EPP) | 80 |
| 3.2.1.2 | Ensayo por curvas de nivel (ECN)..... | 81 |
| 3.2.1.3 | Ensayo por máxima pendiente (EMP)..... | 83 |
| 3.2.2 | Rendimientos | 84 |
| 3.2.2.1 | Ensayo a pie de pista (EPP) | 85 |
| 3.2.2.2 | Ensayo por curvas de nivel (ECN)..... | 86 |
| 3.2.2.3 | Ensayo por máxima pendiente (EMP)..... | 88 |
| 3.3 | DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE PRODUCTIVIDAD..... | 89 |
| 3.3.1 | Tiempo de desplazamiento | 89 |
| 3.3.2 | Tiempo de alimentación..... | 91 |
| 3.3.3 | Tiempo de atado y descarga | 91 |
| 3.3.4 | Parámetros del modelo de productividad | 92 |
| 3.4 | VALIDACIÓN DEL MODELO DE PRODUCTIVIDAD | 92 |
| 3.5 | ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA EMPACADORA | 93 |
| 4 | ANÁLISIS DEL TRANSPORTE EXTRAVIARIO Y VIARIO..... | 97 |
| 4.1 | ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN Y COSTES..... | 97 |
| 4.1.1 | Transporte extraviario..... | 97 |
| 4.1.2 | Transporte viario | 100 |
| 4.2 | MODELO DE PRODUCTIVIDAD PARA LA SACA DE BALAS..... | 102 |
| 4.2.1 | Tiempos de desplazamiento | 102 |
| 4.2.2 | Tiempos de carga y descarga | 103 |
| 4.2.3 | Parámetros del modelo de productividad del autocargador para la saca de balas | 104 |

| | | |
|---------------------------------------|--|------------|
| 4.2.4 | Validación del modelo de productividad del autocargador para la saca de balas | 104 |
| 5 | ANÁLISIS DEL SISTEMA LOGÍSTICO DE EMPACADO | 106 |
| 6 | ANÁLISIS DEL SISTEMA LOGÍSTICO INTEGRADO Y TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL..... | 109 |
| 6.1 | ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD..... | 109 |
| 6.2 | ANÁLISIS ECONÓMICO | 109 |
| 6.2.1 | Evaluación financiera | 111 |
| CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES..... | | 117 |
| CAPÍTULO V: BIBLIOGRAFÍA | | 123 |

ANEXOS

ANEXO I: DATOS DE ENSAYOS

INVENTARIO INICIAL

INVENTARIO FINAL

RESIDUO GENERADO

CARACTERÍSTICAS DE BALAS Y RESIDUO DESPRENDIDO

ANÁLISIS DE NUTRIENTES Y PODER CALORÍFICO

PARTES DIARIOS EMPACADORA

TOMA DE TIEMPOS EMPACADORA

TRANSPORTE DE BALAS

ANEXO II: MODELOS DE PRODUCTIVIDADY COSTES DE PROCESADORA Y AUTOCARGADOR.

AGRADECIMIENTOS

GRACIAS...

... a Pepe, mi maestro, por su generosidad y sabiduría.

... a Antonio y Rafa por lo mucho que me han ayudado.

... a Berta por su incondicional apoyo.

... a mis compañeros de Egmasa de Sevilla y Almería, José Luis, Marta, Javier, Blas y otros, que colaboraron en la ejecución de los ensayos en Filabres y que solucionaron todos los inconvenientes que surgieron. Especialmente a Ignacio por su entrega y dedicación.

... al personal de Hitraf, César, David y otros, por su intensa colaboración y facilidades en el desarrollo del trabajo.

... a los funcionarios de la Consejería de Medio Ambiente, José María, Juan Carlos y los demás que permitieron y apoyaron este estudio.

... al personal de Sefosa, Jose María, Julio, Maxi y otros, por su participación en los trabajos.

... a Samuel y sus compañeros de Tafisa por prestar sus instalaciones para la realización de pruebas.

... A MI FAMILIA, QUE SIEMPRE ESTÁ AHÍ.

RESUMEN

Las masas repobladas de pináceas en Andalucía Oriental han sufrido una pérdida progresiva de importancia para las economías locales por diversos motivos, entre ellos la falta de cultura industrial en el sector forestal. Estas condiciones de abandono y deterioro no permiten dar valor añadido a los productos que se obtienen y, por lo tanto, no se ejecutan los tratamientos selvícolas necesarios para la conservación de estas masas forestales, que realmente constituyen un recurso renovable de gran potencial económico, dentro de una política de producción-conservación, en un esquema económico de desarrollo sostenible de alto valor añadido.

En esta tesis se analizan los ensayos de empacado de residuos forestales procedentes de claras de *Pinus sylvestris* L. realizados con la empacadora Valmet WoodPac en 17 ha de la Sierra de Los Filabres (Almería). El objeto de este estudio es conocer la productividad y los costes de la empacadora Valmet WoodPac, así como el sistema logístico de aprovechamiento de la biomasa forestal empacada. La empacadora elaboró 463 balas trabajando 19 días entre los meses de mayo y junio de 2005. El estudio del empacado discontinuo con esta máquina se basa en tres premisas o condicionantes:

- El aprovechamiento del residuo forestal ha de estar integrado en el sistema de aprovechamiento de la madera, es decir, ha de utilizar los mismos medios logísticos. Esta premisa viene dada por la experiencia en este tipo de trabajos, tal y como figura en los antecedentes.
- El procesado en monte del residuo forestal se ha de realizar a pie de tocón y la maquinaria tiene que transitar por calles con anchura no superior a 4 metros.
- La maquinaria tiene que trabajar en pendientes superiores al 30%.

Las dos últimas premisas surgen de las características de las claras y los montes repoblados de pináceas en Andalucía. No existe ningún estudio de aprovechamiento del residuo forestal con estos condicionantes.

Los resultados de esta tesis son:

- Cuantificación y caracterización del residuo selvícola.
- Rendimientos y modelos de productividad de la empacadora y el autocargador. Costes del sistema logístico de empacado para el suministro de balas.
- Rendimientos y costes del sistema logístico integrado de biomasa forestal, maderable y no maderable, que permita el suministro a una industria transformadora.
- Rentabilidad de la inversión contemplada en una propuesta de gestión integral de la biomasa forestal.

SUMMARY

The reforested areas of pinaceas in eastern Andalusia have suffered a progressive loss of importance to local economies for various reasons, including lack of industrial culture in forestry. These conditions of neglect and deterioration can not add value to products that are obtained and, therefore, silvicultural treatments necessary for the preservation of these forests are not executed, they actually constitute a renewable resource of great economic potential, within of a production-preserving policy, in a scheme of a sustainable economic development with high added value.

This thesis discusses the trials of forest residues baling from *Pinus sylvestris* L. forest thinning made with the Valmet WoodPac baling machine in 17 ha in Sierra de Los Filabres (Almería). The purpose of this study was to determine productivity and cost of Valmet WoodPac and logistics system for the use of bales. The baling machine produced 463 bales working 19 days between May and June 2005. The study of discontinuous baling with this machine is based on three assumptions or conditions:

- The use of forest residues must be integrated into the system of timber harvesting, ie using the same logistics. This assumption stems from the experience in such work, as shown in the background.
- The processing of forest residues is within walking distance of the stump and machinery has to travel on roads with a width not exceeding 4 meters.
- The machinery has to work on slopes over 30%.

The last two assumptions arise from the characteristics of clear and reforested areas of pináceas in Andalusia. There is no study of utilization of forest residue with these conditionalities.

The results of this thesis are:

- Quantification and characterization of silvicultural residue.
- Yields and productivity models of the baling machine and the forwadder. Logistics system costs for bale suppling.
- Yields and costs of integrated logistics of forest biomass, wood and non-wood, allowing the supply to a processing industry.
- Profitability on investment in a proposal for an integral management of forest biomass.

I. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS



TESIS: EMPACADO DISCONTINUO
A PIE DE TOCÓN DE RESIDUOS
SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL DE
BIOMASA FORESTAL.

1 INTRODUCCIÓN

El objeto de este estudio es conocer la productividad y los costes de la empacadora Valmet WoodPac y el sistema logístico de aprovechamiento del residuo forestal empacado en condiciones mediterráneas. Con este fin, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía financió y actuó de dirección facultativa en el tratamiento selvícola realizado en 17 ha de la Sierra de Los Filabres (Almería) en masas repobladas de pino silvestre. La empacadora elaboró 463 balas trabajando 19 días entre los meses de mayo y junio de 2005.



Foto 1: Sierra de Los Filabres

1.1 CONCEPTO DE BIOMASA

La biomasa es un término genérico y por lo tanto con multitud de definiciones según el objeto de su entendimiento. En esta tesis se considera biomasa forestal la materia orgánica procedente de los tratamientos selvícolas, necesarios para la conservación y mejora de las masas forestales, y de los productos y subproductos de su transformación industrial. La biomasa forestal procedente de los tratamientos selvícolas se clasifica en dos términos:

- Biomasa maderable o madera en rollo.
- Biomasa no maderable o residuo selvícola.

1.2 POTENCIAL ECONÓMICO DE LA BIOMASA FORESTAL

Los productos procedentes de los tratamientos selvícolas, necesarios para la conservación y mejora de las masas arboladas, son un recurso renovable de gran importancia económica si se utilizan como materia prima para la industria transformadora de la madera y como biocombustible sólido para la producción de energía.

La utilización del potencial económico de la biomasa forestal depende básicamente de dos condiciones relacionadas entre sí: la ordenación racional de los montes y la demanda de los productos que se obtienen.

La ordenación de montes arbolados, como actividad de planificación, gestión y control de los recursos forestales, debe considerar la interrelación existente entre la silvicultura, los aprovechamientos y la industria transformadora. Entre los objetivos de la ordenación debe figurar el de conseguir que dichos recursos obtengan el máximo valor añadido posible. Sólo así puede el potencial económico del sector forestal dar al concepto desarrollo la verdadera dimensión de sostenible y no de mera supervivencia más o menos subvencionada. La ordenación define la producción del monte, es decir, la cantidad y tipo de recursos que para la industria supone la materia prima. En función de esta disponibilidad, la industria debe diseñarse, dimensionarse y ubicarse de forma adecuada.

Una industria transformadora correctamente diseñada, dimensionada y ubicada establece la demanda y el valor comercial de los recursos. La ordenación debe considerar estos parámetros en sus objetivos de alcanzar un máximo de utilidades para el monte.

La actuación selvícola debe hacerse sobre una superficie mínima anual que tratar capaz de generar materia prima suficiente para garantizar el suministro continuo y constante a la industria.

La silvicultura, al decidir el tipo de tratamiento, define el marco de actuación de los aprovechamientos. Éstos, por su parte, tienen un marcado carácter selvícola: en primer lugar, son la ejecución de la silvicultura decidida, y, por otra parte, suponen la preparación de la silvicultura futura, en el sentido de mantener el potencial del suelo y evitar daños a la masa residual, tanto en el vuelo como en el sistema radical. Además de este carácter selvícola, los aprovechamientos tienen un carácter económico basado en la optimización de los costes de producción y en la calidad del producto obtenido.

1.3 ALTA TECNOLOGÍA

El doble carácter selvícola y económico de los aprovechamientos ha condicionado la evolución tecnológica de la maquinaria forestal. La utilización cada vez más generalizada de procesadoras ha hecho aparecer dos conceptos en la terminología de los aprovechamientos forestales: los sistemas 1+1 y la alta tecnología.

Los sistemas 1+1 se refieren a una mecanización integral de todo el proceso mediante la utilización de dos máquinas –una procesadora para la fase de corta y un autocargador para el transporte extraviario– cuyas productividades potenciales deben estar equilibradas. En el caso del aprovechamiento de los residuos forestales, si la fase de corta se realiza con procesadora, el residuo queda apilado y permite su aprovechamiento posterior. Esta disposición ha permitido el desarrollo de métodos mecanizados de recogida y transporte del residuo como el empacado, con lo que el sistema podría denominarse 1+1+1.

El concepto de alta tecnología aplicado a los aprovechamientos forestales presupone unas determinadas características de los medios de producción que se utilizan:

- Supone el mantenimiento de unos niveles previsibles de productividad, con independencia de las condiciones meteorológicas, en función de las condiciones de trabajo. Esto no sólo permite establecer predicciones fiables de costes y producción en los aprovechamientos, sino que, con una hipotética integración de éstos en el proceso de producción industrial, permitiría un abastecimiento de materia prima continuo, previsible y cuantificado, la consiguiente reducción de los stocks de seguridad en el parque de materia prima y, por lo tanto, la disminución de capital inmovilizado y el correspondiente aumento de la liquidez de la empresa.
- Permite realizar el trabajo en óptimas condiciones ergonómicas y de seguridad, lo que elimina la peligrosidad «tradicional» de los trabajos forestales.
- Los sistemas de cubicación permiten almacenar una información rigurosa de la cantidad y la calidad de la materia prima procesada y utilizar esta información para establecer un control riguroso de la producción. Los automatismos utilizan la información para enviar instrucciones a los distintos sistemas, en lo que se ha definido como interrelación máquina/madera. Esto permite programar operaciones en la procesadora para que la longitud de tronzado se optimice en función del diámetro y el tamaño de las trozas sea el más adecuado según su utilización posterior para conseguir el máximo valor añadido.

La alta tecnología puede considerarse como «blanda», en el sentido de que las alteraciones del suelo y los daños a los sistemas radicales y a la masa residual se han reducido al mínimo, debido fundamentalmente a las bajas presiones sobre el suelo y a la alta maniobrabilidad. Otra característica que contribuye a minimizar las posibles alteraciones es que la circulación de maquinaria afecta, como máximo, a un 15 o 20% de la superficie total del suelo (Rubio *et ál.*, 2000).

La productividad de estos sistemas varía según parámetros predecibles que dependen de las características de las máquinas (velocidades de desplazamiento, capacidades de carga, etc.) y de las condiciones del aprovechamiento (número de pies que extraer, número total de pies, volumen medio por pie, pendientes, etc.).

1.4 SECTOR FORESTAL ANDALUZ

De los 8,7 millones de hectáreas que constituyen el territorio de la Comunidad Autónoma andaluza, alrededor del 50%, es decir, unos 4,7 millones de hectáreas, corresponden a terrenos forestales, siendo la superficie forestal arbolada de 2,4 millones de hectáreas aproximadamente, con predominio del encinar y el pinar como formaciones vegetales más extendidas. Aproximadamente, unas 600.000 ha son pinares de repoblación y se encuentran en su mayor parte en Andalucía Oriental (Junta de Andalucía, 2007). Esta masa forestal constituye un recurso renovable de gran potencial económico, dentro de una política de producción/conservación, en un esquema económico de desarrollo sostenible de alto valor añadido.

La realidad es que una parte considerable de estas masas forestales, al estar formadas por árboles de pequeño diámetro, han sufrido una pérdida progresiva de importancia para las economías locales, con el consiguiente abandono y deterioro, sin que haya disminuido un ápice la necesidad de tratamientos selvícolas para reducir la competencia entre pies y la probabilidad de incidencias de desastres naturales, como son incendios o riesgos fitosanitarios.

Actualmente, los tratamientos selvícolas en masas repobladas de pináceas en Andalucía generan productos de escaso o nulo valor. Esta situación no se debe al valor de los productos en sí, sino a una serie de problemas estructurales que afectan a todo el sector:

- La madera en rollo procedente de estos tratamientos selvícolas se astilla o tritura in situ o bien se envía a la única fábrica de tablero aglomerado existente en Andalucía. Aparte de la mencionada industria, ubicada en Linares, no existe prácticamente ninguna industria de primera transformación capaz de absorber la madera y, sin embargo, sí existe una fuerte industria de segunda transformación que importa la materia prima que consume.
- Los residuos selvícolas producidos en los tratamientos selvícolas no sólo carecen de valor, sino que la necesaria eliminación, por razones fitosanitarias y de prevención de incendios, supone un grave problema económico para la Administración Forestal andaluza.

El Plan Forestal Andaluz de 1989, elaborado por la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía y en la actualidad dentro de las competencias de la Consejería de Medio Ambiente, contempla una serie de objetivos entre los que destacan:

- «La contribución a la mejora y desarrollo de la industrialización y comercialización de los productos forestales».
- «Los productos forestales que se extraen del monte son la materia prima de diversas industrias transformadoras que aumentan considerablemente su valor, generan gran cantidad de empleo y elaboran productos que pueden ser utilizados por consumidores o por otras industrias».
- «La industria forestal andaluza no está suficientemente incentivada ni organizada, ni en el caso de la madera, ni el corcho o el piñón y, por esta causa, el circuito de los productos forestales no se cierra en Andalucía, dándose frecuentemente el caso de que la mayor parte de las industrias que absorben estos productos no se encuentran en la Comunidad, por lo que se pierde gran parte del valor añadido que los productos podrían proporcionar».

La realización de tratamientos selvícolas es necesaria para mantener la masa forestal y demás beneficios del monte, por lo que al propietario del monte, como a la Administración, se le plantean varias opciones:

- No actuación: el elevado coste del tratamiento selvícola condiciona su ejecución, por lo que no se realiza o se realiza en menos superficie de la necesaria en función de la disponibilidad económica. Actualmente, esto está ocurriendo en la Sierra de Los Filabres, y lo demuestra la pérdida de vigor por excesiva densidad de pies del *Pinus sylvestris* en rodales cada vez más extensos.
- Subvención para el aprovechamiento de la materia prima: consiste en pagar la diferencia entre el precio de ejecución del aprovechamiento y el precio de la materia prima, de tal forma que el productor de materia prima pueda realizar su trabajo de forma rentable.
- Fomentar la transformación de la materia prima: consiste en favorecer la implantación de industrias de transformación de la madera que den un alto valor añadido a la materia prima. Para ello, una de las medidas fundamentales es poner a disposición de los actores competentes la superficie forestal necesaria para hacer rentable la producción de los procesos industriales.

De estas opciones, sólo se garantiza la sostenibilidad económica y ambiental si el valor añadido de la materia prima redonda en la zona. La subvención a la materia prima permite su aprovechamiento, pero también deja paso a la especulación en su precio, de tal forma que su valor puede no reflejar su coste real más su beneficio e incluso puede disminuir la productividad de los medios. Por supuesto, la sostenibilidad de este sistema es impensable y prueba de ello son las numerosas «reconversiones» en el sector primario. Por otro lado, dada la gran sensibilidad de los parámetros económicos, como el precio de la materia prima, para la rentabilidad de estos procesos, la condición de superioridad de algunos de los actores intervinientes, como el productor de materia prima y el propietario industrial, también impediría la sostenibilidad económica de todo el proceso. Estos riesgos sólo se pueden evitar haciendo partícipes a los actores en todas las fases del proceso, lo cual incluso podría beneficiar su rentabilidad. Por ejemplo, la garantía de suministro de materia prima permitiría a la industria reducir el stock de almacenamiento, disminuir sus costes de transformación y asegurar un buen precio de la materia prima, un precio acorde con el valor añadido logrado con su transformación; todo ello permitiría, por lo tanto, la ejecución de los tratamientos selvícolas.

2 ANTECEDENTES

Los antecedentes que justifican el objetivo principal de esta tesis se basan en la línea de investigación de valorización de los recursos forestales del Grupo de Investigación de Energía y Recursos Renovables (GIERR). Estos antecedentes se basan en el desarrollo de tres líneas de trabajo complementarias:

- Mecanización de los aprovechamientos forestales.
- Optimización de los sistemas logísticos integrales de abastecimiento de materia prima.
- Transformación industrial de la materia prima con el máximo valor añadido.

Estas líneas de trabajo persiguen como objetivo estudiar la problemática de la autofinanciación del sector forestal andaluz y analizar la gran cantidad de madera no aprovechada en el monte, fundamentalmente en Andalucía Oriental.

Desde el primer momento se acude a la tecnología forestal escandinava, concretamente a la finlandesa, por ser la más desarrollada en Europa. Se establecen contactos permanentes con expertos forestales en Finlandia que dan como fruto varias iniciativas para la problemática planteada:

- Proyecto europeo BIOSTR (JOU3-CT95-0039). Se estudia la disponibilidad de biomasa forestal, como complemento de materia prima a las plantaciones de cardo (*Cynara cardunculus*), en superficies subvencionables por la Política Agraria Comunitaria (PAC) para la conversión de la Planta Nuclear de Valdecaballeros en una planta térmica de 1 GW.
- Ensayos de máquina BalaPress en Extremadura en 1997. Se incluye en el proyecto fin de carrera titulado *Aprovechamiento integral de biomasa con apoyo de tecnología SIG en un grupo de montes repoblados* (López, 1998). Se desarrolla una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica como herramienta para el análisis de la biomasa forestal. También se recogen datos de producción de la empacadora BalaPress.
- Elaboración de un proyecto para la transformación industrial de la materia prima: aserradero de madera de pequeñas dimensiones con tecnología *chip-canter*. Se incluye en el proyecto fin de carrera titulado *Estudio de viabilidad, mercado y producción para la implantación de una industria de aserrío en Andalucía Oriental* (Cobo, 1998). Los

resultados más importantes de este proyecto son los datos de rendimiento de aserrado obtenidos de muestras enviadas a Finlandia a un aserradero HewSaw.

En la bibliografía se recogen más estudios que se realizaron en este periodo donde se comienza a trabajar con modelos de productividad de maquinaria forestal, la mecanización integral y la industrialización de madera de pequeñas dimensiones. Estos estudios se desarrollaron en los siguientes proyectos de fin de carrera:

- *Abastecimiento de materia prima a una industria transformadora de productos procedentes de tratamientos selvícolas* (Agudo, 1999). Mediante tecnología de Sistemas de Información Geográfica se analizó la cantidad de biomasa forestal disponible en Andalucía Oriental y se dimensionó el sistema logístico de aprovechamiento integral.
- *Aprovechamiento integral de biomasa en tres montes del sur de Suecia* (Jiménez, 2000). Este proyecto elaborado con la S.L.U. de Suecia recoge datos de producción del primer modelo de la empacadora WoodPac y la metodología para el estudio del residuo desprendido.

De todos estos trabajos se extraen las principales conclusiones:

- Con la tecnología de empacado se puede solucionar la problemática de almacenaje de los residuos forestales.
- Es fundamental el dimensionamiento de la industria y éste viene dado por la disponibilidad de la materia prima.
- Para garantizar una rentabilidad económica en el aprovechamiento de los residuos forestales, la planta de generación de energía ha de estar unida a una industria de primera transformación de la materia prima, como un aserradero. De esta forma se permitiría la cogeneración y se producirían cuatro productos: energía, madera aserrada seca, astilla industrial y calor residual.
- El sistema logístico de abastecimiento de la materia prima ha de estar integrado y optimizado para la puesta en planta de biomasa maderable y no maderable.
- El mercado de la madera en Andalucía es inexistente en primera transformación frente al de segunda transformación. Por lo que existe una gran demanda de madera aserrada que es importada.

Los resultados y conclusiones de estos proyectos se utilizan como base para redactar el documento que cumplimenta el Acuerdo Específico entre la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y la Universidad de Córdoba para la realización, en el año 2000, de un *Estudio sobre viabilidad técnica y económica para la creación de un centro de desarrollo tecnológico y de una planta industrial piloto para la transformación de la biomasa procedente de los tratamientos selvícolas de montes arbolados en productos industriales de alto valor añadido y en energía eléctrica* (Rubio *et ál*, 2000). En este documento se desarrollan tres apartados básicos y se presentan los principales resultados que se utilizan para analizar la gestión integral de productos procedentes de tratamientos selvícolas:

1. Disponibilidad y cuantificación de la materia prima

Mediante el empleo de los sistemas de información geográfica (SIG) se realizó un análisis de existencias y disponibilidad de materia prima en Andalucía Oriental y se determinó la cantidad y localización de materia prima a escala estratégica. Se definió una superficie de 3.079 hectáreas para tratar anualmente que recogía las condiciones medias de las 143.142 hectáreas seleccionadas dentro de un esquema de producción-conservación.

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|------------------------------------|---------|---------------------|
| Superficie por clases de pendiente | 0-15 % | 573 (18,6%) |
| | 15-30 % | 1.244 (40,4%) |
| | 30-50% | 1.262 (41,0%) |
| Densidad a extraer | 314 | pies/ha |
| Volumen medio por pie | 0,10 | m ³ /pie |
| Residuo generado por pie | 0,0158 | t verde/pie |
| Distancia de saca | 423 | m |
| Volumen de corteza | 28 | % |
| Espaciamiento entre calles | 20 | m |
| Coefficiente de apilado | 0,68 | m ³ /est |
| Longitud de troza | 2,2 | m |

Tabla 1. Valores medios de parámetros del aprovechamiento

Las cantidades de materia prima anuales que se generan en los tratamientos selvícolas son:

- Madera en rollo: 96.003 m³
- Residuo selvícola: 15.275 t verde

2. Sistema logístico integrado de abastecimiento de materia prima

Se estudian las producciones y costes, a partir de modelos de productividad de procesadora y autocargador, que se adjuntan en el anexo.

| RENDIMIENTO EFECTIVO POR PENDIENTE DE APROVECHAMIENTO DE MADERA EN ROLLO | | |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|
| CLASES DE PENDIENTE | PROCESADORA (m ³ /hte) | AUTOCARGADOR (m ³ /hte) |
| 0-15 % | 6,98 | 13,04 |
| 15-30% | 5,98 | 10,43 |
| 30-50% | 3,49 | 5,87 |

Tabla 2. Rendimiento efectivo por pendiente de los medios de producción

3. Propuesta tecnológica de transformación

La base de la planta industrial es una línea de aserrado para madera en rollo de pequeñas dimensiones complementada con una serie de instalaciones que permitan la transformación de toda la materia prima bien en productos asumibles por la industria de segunda transformación (madera aserrada y astilla industrial) bien en energía eléctrica. El conjunto de instalaciones necesario para este propósito consiste en:

- Parque de apilado de madera en rollo y residuos selvícolas: se considera un stock de 45 días para la materia prima, por lo que las dimensiones del parque son de 18.500 m². Este stock de almacenamiento supone que hay una garantía de suministro que permite reducir las cantidades almacenadas en fábrica. De esta forma, las necesidades de superficie y los riesgos del almacenamiento son menores.
- Instalación de astillado: dos astilladoras fijas convencionales, de cilindro o de disco, de 30 m³/h de capacidad de producción cada una, para el astillado de la madera en rollo no asumible por la línea de aserrado y para el astillado de los residuos selvícolas. Para la separación de la astilla industrial del resto de los residuos selvícolas se propone un sistema de cribado posterior al astillado.
- Instalación de descortezado: descortezadora de tambor con producción de 50 m³/h. Conlleva las instalaciones auxiliares de alimentación y evacuación de los productos.
- Sistema de clasificación de la madera en rollo: consiste en un clasificador de trozas controlado automáticamente por un operador y que desecha las trozas que no son aptas para el aserrado. Dado que el sistema de aserrado ha de optimizar los rendimientos de materia prima empleando el tipo de despiece más adecuado a cada diámetro y considerando el tipo de producto que demanda el mercado, la madera en rollo debe clasificarse previamente al aserrado.

- Línea de aserrado: aserradero HewSaw R200. Los rendimientos de esta línea de aserrado para madera de *Pinus pinaster* de la vertiente norte de Sierra Nevada son (Cobo, 1998):
 - Rendimiento madera en rollo/madera aserrada: 3,2 m³ MR/m³ MA
 - Rendimiento astilla/madera aserrada: 1,2 m³ A/m³ MA
 - El 70% de la madera en rollo es aserrable.
- Sistema de clasificación de la madera aserrada: es un sistema de clasificación manual que incluye sistemas de transporte de madera aserrada, astilla y serrín.
- Estanque de impregnación: para tratamiento de azulado por inmersión.
- Secadero: se considera la instalación de un sistema de secado tradicional a temperatura media (≤ 80 °C). El secado se realiza en el interior de cámaras de secado mediante aire convenientemente climatizado y a presión atmosférica. Las cámaras van provistas de sistema de calefacción, sistema de humectación y sistema de ventilación, totalmente automatizados y controlados por ordenador. Se contemplan 5 cámaras de secado con una capacidad media de 60 m³ cada una.
- Planta de cogeneración: comprende la generación de energía térmica y eléctrica y la utilización del calor residual. La planta considerada tiene un rendimiento térmico del 90% y un rendimiento eléctrico del 30%.

La inversión es de 10.507.179 €. El capital circulante el primer año es de 486.969 €, por lo que la financiación total requerida es de **10.994.148 €**. El supuesto que se utilizó para la financiación de la inversión presume un capital propio del 0% de la inversión total y un préstamo de la totalidad de la inversión a un tipo de interés fijo del 5,5% y un periodo de amortización de 10 años. Mediante el uso del software Microsoft Excel, se calcula la tasa interna de rendimiento (TIR) a partir del pago de la inversión, la vida del proyecto y los flujos de caja.

Los productos que se obtienen para su venta son:

- Madera aserrada seca: 21.000 m³
- Astilla Industrial: 38.238 m³
- Serrín: 9.884 m³
- Energía térmica residual: 48.240 MWh_t
- Energía eléctrica: 14.970 MWh_e

2.1 ANTECEDENTES DE TECNOLOGÍA DE EMPACADO FORESTAL

El empacado forestal es un proceso de aprovechamiento de la biomasa forestal generada en los tratamientos selvícolas, donde queda comprimida y atada formando balas de dimensiones establecidas. La operación se realiza con empacadoras, máquinas especialmente diseñadas para este fin, instaladas en una máquina base, normalmente un autocargador forestal convencional.

El empacado es una respuesta a los problemas logísticos que el aprovechamiento de la biomasa forestal plantea, debido a la baja densidad de transporte y a la dificultad de manipulación y almacenamiento. Las ventajas que presenta el empacado son:

- Transporte de las balas con características similares al de la madera en rollo.
- Manipulación y desembosque de las balas con medios convencionales (autocargadores) utilizados para la saca de madera.
- Posibilidad de almacenamiento por tiempo prolongado, tanto a pie de tocón como en cargadero o parque de fábrica, sin que se produzcan pérdidas cualitativas en las balas.

El principal inconveniente del empacado es que se trata de una operación adicional, con el consiguiente aumento del coste total del proceso.

La biomasa se ha utilizado desde el comienzo de la humanidad para producir energía, pero desde 1982, cuando los precios del petróleo empezaron a subir, la biomasa forestal cobró un especial interés en países industrializados como complemento para la obtención de energía. El principal problema que presentan los residuos selvícolas desde un punto de vista económico es su baja densidad aparente. Por ello se recurrió al astillado como paso previo al transporte extraviario, que era la tecnología dominante en el momento. Pero también el volumen que ocupan las astillas es elevado, lo que originaba un alto coste en la fase de transporte. Por ello comenzaron a buscarse nuevos sistemas que permitieran reducir este coste (Jiménez, 2000).

El sistema elegido fue la compresión de los residuos en balas. El concepto de bala como método de almacenaje y transporte de paja y heno ha estado asociado a la agricultura desde hace 100 años (Kepner, 1978). Las embaladoras fueron sólo operativas en un principio como máquinas estacionarias pero, con la implementación de mecanismos de recogida y unidades de atado automático, estas máquinas llegaron a ser convencionales en las labores agrícolas a partir de la década de los 70 (Jiménez, 2000).

En el año 1982 se comenzaron a hacer intentos de embalado de residuos forestales adaptando una estas embaladoras (Fridley, 1982). Durante los años posteriores, diversos autores siguieron experimentando con esta nueva técnica de aprovechamientos, pero no fue hasta el año 1995 cuando pasó de ser experimental a comercial (Jiménez, 2000).

En el otoño de 1994, las empresas suecas Tradenergi Vast AB y Bala Press AB emprendieron el desarrollo de un método para la compresión de residuos forestales. Construyeron un equipamiento que fabricaba balas cilíndricas de 1,2 * 1,2 m. En septiembre de 1995, la unidad de embalado se probó en Nossebro (Suecia) montada en un autocargador mediano. La producción de la máquina fue de 15 balas/h₁₅ (horas de trabajo con interrupciones de hasta 15 minutos) y las balas pesaron 620 kg con una humedad del 45% (Jiménez, 2000).

Posteriormente a la máquina BalaPress, en el año 1998, dos nuevas empresas empezaron a desarrollar máquinas con el mismo objetivo: Fiberpac y WoodPac.

La empresa Fiberpac AB comercializaba el modelo Fiberpac 370 montado en autocargadores Timberjack. En 2002, la compañía Timberjack adquirió la patente y empezó a comercializar la nueva empacadora Timberjack 1490D montada en un autocargador Timberjack 1410D (actualmente se denomina 1490D Energy Wood Harvester y Timberjack fue adquirida por John Deere).



Foto 2: Modelo inicial Fiberpac

En fechas similares, la empresa Wood Pac AB desarrolló la empacadora WoodPac. Partek Forest OY AB compró la patente y lanzó la Valmet WoodPac; más tarde, en 2004, Komatsu Forest OY desarrolló la nueva Valmet WoodPac, montada en un autocargador Valmet 860.1, que producía una bala de menor longitud que el antiguo modelo.



Foto 3: Modelo inicial WoodPac

En 2003, S. Pinomäki Ky (Pinox OY) desarrolló la empacadora Pika RS 2000 montada en la Pika 828 Combi (procesador – autocargador) (Kärhä y Vartiamäki, 2006).

La tecnología de empacado tiene dos líneas de desarrollo: empacado continuo y discontinuo.

El empacado continuo no tiene limitada la longitud de la bala. La formación de la bala se realiza mediante un sistema de compresión y aplastamiento del residuo selvícola al forzarlo a pasar por un cilindro continuo, donde se comprime y ata. La longitud de la bala se determina mediante un corte transversal realizado con una espada de motosierra convencional. Los modelos de maquinaria que realizan un empacado continuo son los modelos 1490D EWH y Pika RS 2000.



Foto 4: Empacadora Timberjack 1490D

El sistema de empacado más utilizado es el empacado continuo con la máquina Fiberpac 370 o 1490D EWH, que posee mayor número de unidades en funcionamiento que las otras empacadoras. Probablemente por ello también es la empacadora sobre la que se han realizado más ensayos, de los cuales los más completos están realizados en Finlandia y Suecia. La gran parte de estos estudios en los países nórdicos surgieron dentro del Wood Energy Technology Program 1999-2003 de TEKES con el objetivo de aprovechar los residuos selvícolas para uso energético. En una parte de este programa, más de 11 empresas finlandesas realizaron proyectos de demostración con diversos montajes de empacadoras. Estos estudios se recogen en el informe final del programa (Hakkila, 2004).

Existen otros estudios sobre esta máquina, aunque con menor tiempo de trabajo y superficie, en Noruega, Irlanda, Francia y Estados Unidos (Kärhä y Vartiamäki, 2006). También hay otros ensayos en Reino unido (FCA, 2000) y España (Sanz y Piñeiro, 2003). No se han analizado estos estudios sobre la empacadora Fiberpac puesto que el empacado y el sistema de aprovechamiento son distintos al funcionamiento de WoodPac, objeto de la tesis. Incluso en la

mayoría de estos estudios se analiza solamente la producción y costes de la empacadora y no se considera el sistema completo. De hecho, esto ocurre en los trabajos realizados con esta máquina en el monte Navahondona en Cazorla (Jaén) por la empresa EGMASA.

La máquina Pika RS 2000 se recoge en el estudio de Kärhä y Vartiamäki (2006), en el que se producen 352 balas.

El proyecto europeo Biosouth finalizado en enero del 2007 comprendía un grupo de trabajo, WP2, dedicado al estudio de los sistemas de aprovechamiento del residuo forestal. Dentro de este grupo se realizaron ensayos en España con una empacadora diseñada por la empresa TRABISA. Esta empacadora es de sistema continuo, produce pacas prismáticas y atadas con flejes metálicos. Tampoco se analiza este sistema por ser distinto al sistema de empacado objeto de la tesis. Por otro lado, los resultados detallados de estos ensayos no han sido incluidos en los informes finales del proyecto europeo. De hecho, el informe final de este grupo de trabajo, elaborado por la VTT, en su apartado de los sistemas de aprovechamiento de residuo forestal recoge los datos que aparecen en el informe final del programa de TEKES.

En el empacado discontinuo la bala esta acotada dimensionalmente por la estructura o capacidad de la cámara de empacado. Los modelos de maquinaria que realizan un empacado discontinuo son:

- BalaPress. Esta máquina dejó de fabricarse para el mercado forestal y se utiliza en plantas industriales de tratamiento de residuos sólidos urbanos.
- Fixteri, en fase de desarrollo por la empresa Biotukki OY y no disponible comercialmente. La empacadora se instala en una máquina base combi compuesta de cabezal procesador o talador y plataforma. Está diseñada para el empacado de árboles de pequeñas dimensiones extraídos en clareos.
- WoodPac, de la empresa Valmet (actualmente Komatsu Forest). En el 2008 la empacadora WoodPac dejó de producir para Komatsu Forest.

Los primeros estudios realizados sobre el empacado discontinuo fueron sobre la máquina BalaPress de mano del SkogForsk (Instituto Sueco de Investigación Forestal) y la Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas (SLU). Hay estudios posteriores efectuados en España con esta máquina, concretamente en el año 1998 en Extremadura realizados por el GIERR, la empresa GUIFOR y Colectivo Maderero SL. También se ha utilizado en los ensayos llevados a cabo en Galicia por Sanz y Piñeiro y publicados en 2003.



Foto 5: Empacadora Balapress montada en autocargador Kockum

Se conocen pocos estudios de la máquina WoodPac, probablemente debido al escaso número de unidades comercializadas. Los estudios conocidos están realizados por el SkogForsk y la SLU, recogidos en su propia revista y en el proyecto fin de carrera de P. Jiménez (2000), en el cual las máquinas BalaPress y WoodPac trabajaron en 14 ha y produjeron 896 balas. La WoodPac también se utilizó en el estudio realizado por Kärhä y Vartiamäki en los años 2003 y 2004, en el que se elaboraron un total de 209 balas. En todos estos estudios, el trabajo de las empacadoras se realizaba en cortas a hecho o a pie de pista, pero no se ha encontrado ninguno donde el empacado se realizase a pie de tocón en un tratamiento selvícola intermedio con las anchuras de calle habituales para este tipo de tratamiento, que oscilan entre 3,5 y 4 m.

Se han encontrado diversos datos de producción de empacadoras en presentaciones de seminarios y congresos, pero no se recogen ni los tiempos de trabajo ni las producciones estudiadas. En la mayoría de los casos estos datos provienen de demostraciones de la maquinaria que no suelen superar más de un día de trabajo, por lo que no se utilizan como referencia en esta tesis.

De los modelos de empacadora forestal, en el año 2007 solamente trabajaban en España tres unidades de la empacadora Fiberpac o 1490D EWH. En Finlandia había treinta unidades en funcionamiento en el 2005 (Kärhä & Vartiamäki, 2006) y en el 2007 sólo quedaban doce unidades operativas (Kärhä, 2007). Esta progresiva disminución de empacadoras forestales en el norte de Europa se constata al no haber ninguna unidad de empacado en la feria internacional de maquinaria forestal ELMIA WOOD 2009. En cambio, en España, el número de unidades va en

aumento, en el 2009 existen 10 unidades de la empacadora de John Deere y además se fabrican dos modelos de empacadora forestal:

- Monra Enfo 200: con 5 unidades en producción en España. El sistema de empacado es continuo y similar al de FiberPac pero con la unidad de corte por cizalla. También presenta la mejora de ser desmontable con sistema de acoplamiento rápido.
- Empacadora en desarrollo por Dingoma SA. En la feria forestal Asturforesta 2009 se presenta su primer prototipo.



Foto 6: Empacadora MONRA ENFO 2000 montada en autocargador Valmet

Estos dos modelos mejoran el sistema de corte de la empacadora de John Deere, ya que el sistema de corte con cadena tenía muchas averías. Actualmente, John Deere fabrica su empacadora con sistema de corte con cizalla y se plantea sustituir los sistemas de corte con cadena en las unidades vendidas. Puesto que estas empacadoras de sistema continuo trabajan en muchos casos en lugares accesibles a camión también se plantea el montaje sobre camiones de tres ejes, en vez de autocargadores, con el objeto de reducir costes.

3 OBJETIVOS

El objeto principal de esta tesis es analizar la producción, costes y funcionamiento del empacado discontinuo a pie de tocón de residuos selvícolas en claras de masas repobladas de pináceas de Andalucía Oriental. Para ello, en esta tesis se describen los ensayos de empacado con la máquina Valmet WoodPac realizados en la Sierra de Los Filabres, financiados por la Consejería de Medio Ambiente y ejecutados por la Empresa de Gestión Medioambiental (EGMASA).

Otros objetivos concretos que se persiguen en la presente tesis son:

- Condicionantes de los criterios selvícolas que afectan al rendimiento del empacado.
- Cuantificación del residuo selvícola generado y caracterización de las balas.
- Cuantificación de nutrientes extraídos del monte.
- Identificar los parámetros que afectan al rendimiento de la empacadora.
- Establecer un modelo de productividad de la empacadora.
- Conocer la viabilidad del empacado en pendientes superiores al 30%.
- Estudiar los costes y rendimientos de la saca y transporte viario de balas en medios de producción utilizados para el aprovechamiento de la madera.
- Estudio de la rentabilidad del suministro de balas. Costes del sistema logístico de empacado.
- Integrar el sistema logístico de empacado en un aprovechamiento de madera e identificar los valores de los productos que harían rentable la transformación integral de la biomasa forestal.

II. METODOLOGÍA



TESIS: EMPACADO DISCONTINUO
A PIE DE TOCÓN DE RESIDUOS
SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL DE
BIOMASA FORESTAL.

1 METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS

1.1 Fase preliminar

1.1.1 Localización del área de experimentación

La zona elegida para la realización de los ensayos fue seleccionada atendiendo a los siguientes criterios:

- Ámbito de Sierra de Los Filabres.
- Terrenos de titularidad pública de la Junta de Andalucía.
- Diversidad en características fisiográficas y dasométricas en la misma área.
- Zona representativa de masas repobladas de pináceas con necesidad de realización de tratamiento selvícola.



Foto 7: Área de experimentación en la Sierra de Los Filabres

Se realizaron varias visitas de campo a zonas predeterminadas. Finalmente, se seleccionó la zona de mejor accesibilidad conforme con los criterios anteriores.

Dentro del área de experimentación, se seleccionaron distintas parcelas de ensayos en función de la pendiente y la densidad de pies, siendo determinante para el tamaño de las parcelas el tiempo de disponibilidad de la empacadora.

1.1.2 Aspectos selvícolas y de ordenación

Una vez elegida la zona para realizar los ensayos de experimentación, se recopiló la siguiente información básica sobre la zona:

- *Plan técnico de ordenación del grupo de montes de Gérgal* (Tragsatec, 2003), en adelante *PTO Gérgal*.
- *Estudio de optimización de las claras y clareos efectuados en la Sierra de Los Filabres* (Abellanas, 2003).

Estos documentos recogen datos para definir los criterios selvícolas y caracterizar previamente el área de experimentación.

1.2 Caracterización fisiográfica y dasométrica

1.2.1 Caracterización fisiográfica

Además de la información fisiográfica recogida en el *PTO Gérgal* (Tragsatec, 2003), se utilizó la siguiente cartografía digital:

- Modelo digital del terreno de Andalucía generado a partir de fotografías aéreas a escala 1:20.000 (Junta de Andalucía, 2005).
- Ortofotografía digital de Andalucía de resolución 1 m (Junta de Andalucía, 2003).

Con el Visor del Modelo Digital del Terreno se calcularon las pendientes medias de las superficies de los ensayos. Este visor también tiene un *software* para medir pendientes de trayectos, por lo que se empleó para conocer las pendientes medias en las terrazas-calles de trabajo de la empacadora.

1.2.2 Caracterización dasométrica

Las características dasométricas del área de experimentación están descritas en los inventarios del *PTO Gérgal* y el *Estudio de optimización de las claras y clareos efectuados en la Sierra de Los Filabres*, aunque ninguna de las parcelas de estos inventarios está dentro de la zona donde se realizaron los ensayos de empacado.

Se realizaron tres inventarios de campo con distinta metodología.

a) Inventario inicial

El objeto del inventario era caracterizar previamente el área de experimentación para fijar los criterios selvícolas y determinar con exactitud las parcelas de los ensayos.

Se realizó un muestreo sistemático. Mediante el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) se superpuso una malla de 200 metros de lado para la densidad de parcelación. Quedaron 15 parcelas dentro del área previa. Sobre plano se señalaron las 15 parcelas y se localizaron en el terreno con apoyo de la fotografía aérea. La forma elegida de las parcelas fue circular, pues facilitaba mucho el apeo y la localización en el terreno y, al tener menor perímetro, daba un menor número de árboles dudosos que otras formas. El radio sumaba 12,6 m, de tal manera que el área de la parcela era de 498,5 m².

Con el objeto de realizar de forma rápida y concisa el inventario, la información recogida en las parcelas se registró en un impreso o estadillo que constaba de la siguiente información básica:

- Número de pie.
- Diámetro normal.
- Especie.
- Porte: clasificando el estado del pie en bueno o malo.

El equipo lo constituían un capataz y dos peones forestales. El material que llevaban consistía en un receptor de sistema de posicionamiento global (Leica GPS GS50), cartografía digital impresa (Ortofotografía y topografía E 1:10.000), una forcípula, una cinta métrica y estadillos.



Foto 8: Equipo de señalamiento

Una vez que se delimitó el perímetro de las parcelas de los ensayos, solamente cinco parcelas de las 15 iniciales del inventario estaban dentro.

b) Señalamiento

El equipo de inventario, un capataz y dos peones, fueron instruidos para seleccionar y señalar los pies que había que eliminar de acuerdo a los criterios selvícolas. Los medios materiales que portaban eran una forcípula y botes

pulverizadores de pintura roja. El procedimiento consistía en que el capataz seleccionaba un pie, el peón que portaba la forcípula medía el diámetro normal de ese pie y el otro peón dibujaba un círculo alrededor del fuste. El capataz anotaba el diámetro normal medido y así sucesivamente.

En este inventario también se contaban los pies que debían eliminarse de las calles, puesto que el equipo de inventario los iba delimitando y marcando.

c) Inventario final

Después de ejecutar el tratamiento selvícola, se volvió a realizar un inventario con el fin de conocer de forma rápida las densidades finales. El muestreo y el diseño de parcela se hizo igual que el inventario inicial. La densidad de muestreo fue de siete parcelas.

En las parcelas se midieron el número de pies y los diámetros normales.



Foto 9: Medición con GPS

1.2.2.1 Volúmenes maderables extraídos

La madera extraída se contabilizó en estéreos midiendo la longitud y altura de las pilas. La anchura se contabilizó como la longitud de la troza, 2,40 m.



Foto 10: Medición coeficiente de apilado

Se calculó el coeficiente de apilado en cada pila. Aleatoriamente se seleccionó un cuadrado de 1 m de lado en la pila y se midieron todos los diámetros con corteza de las trozas dentro del cuadrado. Posteriormente, se calcularon las áreas de las secciones transversales de las trozas seleccionadas y se determinó la cantidad de superficie ocupada por madera en 1 m². Esta relación de superficies se extendió a la relación volumétrica de m³ de madera apilada por estéreo.

1.3 Caracterización de los residuos selvícolas

La biomasa forestal no maderable se distingue con la siguiente terminología:

- Residuo generado (Rg): es el originado por el desrame y descope en el procesado del pie y que se deposita en el suelo.
- Residuo empacado (B): corresponde al residuo selvícola que forma la bala.
- Residuo desprendido (Rd): es la parte del residuo selvícola que se desprende en el proceso de empacado, que no forma parte de la bala y que se queda desmenuzado en el monte.
- Residuo recogido (Rr): es el residuo selvícola agarrado por la grapa de la grúa con el que se alimenta la empacadora. Corresponde por lo tanto a la suma del residuo empacado y desprendido.
- Residuo no recogido (Rnr): es el residuo selvícola suelto que se queda en el monte al no ser recogido por la grapa de la grúa.

$$[1] \quad Rg = Rnr + Rr = Rnr + B + Rd$$

1.3.1 Residuo generado

El objeto del estudio era conocer la cantidad de residuo selvícola suelto generado en función de parámetros dimensionales del pie, como son el diámetro normal, el volumen maderable y el peso del fuste.



Foto 1: Derribo y desramado con motoserrista

Se seleccionaron 26 pies. Se siguieron dos recorridos marcados en cartografía por dos líneas de máxima pendiente, en las zonas de los ensayos. Los pies elegidos eran uno de cada dos, de los que se encontraban en la trayectoria, hasta un máximo de 13 pies por recorrido. El equipo estaba constituido por un motoserrista, un capataz y dos peones forestales. El material empleado fue una motosierra, una romana con pesos para pesar hasta 100 kg, una

forcípula, un metro, cuerdas y estadillos.

El procedimiento seguido fue la selección y medición del diámetro normal del pie que después el motoserrista derribaba, desramaba y tronzaba. Los peones ataban los residuos y las trozas del fuste para pesarlos en la romana. El capataz equilibraba los pesos en la romana y los iba anotando. De las trozas del fuste también se midieron la longitud y los diámetros en las secciones cortadas.

Con estos datos se ajustaron regresiones, mediante la herramienta de líneas de tendencia de Microsoft Office Excel 2007, y se eligió aquella ecuación que presentaba mayor valor de R^2 . También se calculó el coeficiente de generación de residuos selvícolas, que se define como la relación entre la cantidad de residuo selvícola y el volumen maderable que lo genera.

1.3.2 Residuo empacado

El residuo empacado forma las balas y el objeto de su estudio es conocer sus parámetros dimensionales y otros que determinen su uso como materia prima.

La longitud, diámetro y peso de las balas se midieron en campo. Para ello se usaron cintas métricas y un dinamómetro enganchado en la grapa de la grúa del autocargador. De las 430 balas producidas se pesaron en verde 26 balas. El pesado de estas balas se hizo el mismo día en que se produjeron. Con las longitudes y los diámetros se determinó el volumen del cilindro formado por la bala y obtener así las densidades aparentes de las balas en verde.



Foto 12: Pesado de bala con dinamómetro

La humedad de la bala se midió con el higrómetro Protimeter Timbermaster P20 5601. Las medidas de humedad se tomaron en ramas exteriores de la bala con una sección cortada superior a 1,5 cm, que es la distancia entre las agujas de penetración del higrómetro. El peso de la bala seca al aire se calculó como el cociente de las pesadas de los camiones medidas en fábrica y el número de balas que transportan. El transporte tuvo lugar entre septiembre y octubre de 2005; por lo que las balas permanecieron durante el verano en el monte y su humedad disminuyó por debajo del 18% (seca al aire).

La densidad específica de las balas se midió en fábrica. El método empleado consistió en medir el volumen de agua desalojado al sumergir suficiente tiempo una bala seca al aire de peso conocido. Este proceso se realizó con 6 balas.

$$\text{Densidad específica} = \text{Peso seco al aire de la bala} / \text{Volumen desalojado}$$

El contenido energético de la bala se calculó en laboratorio determinando su poder calorífico. La toma de muestras del residuo empacado se describe en el apartado de análisis de nutrientes. La norma de referencia seguida en el laboratorio es:

| | |
|--|--------------------------|
| Poder calorífico superior en base húmeda | LEA ITPP-M-006 DIN 51900 |
|--|--------------------------|

Tabla 3: Norma de referencia del poder calorífico superior

1.3.2.1 *Análisis granulométrico*

Para conocer las características que poseen las balas como materia prima se hicieron ensayos en fábrica dos días distintos. Los ensayos consistían en astillar las balas y pesar las fracciones de astillas producidas. Uno de los ensayos se realizó con 48 balas y la otra con 9. El procedimiento seguido en ambos ensayos incluía:

- 1) Pesado de balas. En el ensayo con 48 balas, el peso se midió en el camión que las transportaba. En el ensayo de 9 balas se pesaron una a una con el apoyo de un tractor.
- 2) Colocación de balas en la bandeja de alimentación de la astilladora fija de la planta para ser astilladas.



Foto 13: Transporte para pesado de bala en báscula de fábrica

3) Separación de las astillas en dos tamaños en una cribadora enlazada con la astilladora por cintas transportadoras. El tamaño de cribado permite separar la astilla en dos fracciones: fina y gruesa.



Foto 14: Cribadora

4) Traslado de las dos fracciones astilladas al exterior de la nave con cintas transportadoras. La fracción fina se recoge en un contenedor pesado previamente. Una vez astilladas todas las balas, se limpia y revisa la línea de flujo para comprobar que no hay pérdidas de astilla.

5) Pesado del contenedor con la fracción fina tras subirlo a un camión pesado previamente. Al determinar el peso de la fracción fina, se calcula por diferencia el peso de la fracción gruesa.

5) Pesado del contenedor con la fracción fina tras subirlo a un camión pesado previamente. Al determinar el peso de la fracción fina, se calcula por diferencia el peso de la fracción gruesa.

Con el objeto de identificar la materia prima que serviría para la fabricación de tablero y la que no, se tomaron aleatoriamente 4 muestras de un kg para cada una de las fracciones gruesa y fina. De las muestras de la fracción gruesa se analizó la granulometría y se midieron las dimensiones y pesos de sus distintos componentes. La separación de componentes (acícula, corteza, rama fina, rama gruesa y astilla) se realizó manualmente.



Foto 2: Fracción gruesa de bala astillada



Foto 1: Fracción fina de bala astillada

1.3.3 Residuo desprendido y no recogido. Análisis de nutrientes

No todo el residuo generado se empaca y, por lo tanto, no todo se extrae del monte. Por un lado, este residuo no extraído supone una disminución de la cantidad de producto obtenido, pero, por otro lado, supone un aporte de nutrientes al suelo. Este residuo se puede diferenciar en dos tipos: no recogido y desprendido en el proceso de empacado.

El residuo no recogido (R_{nr}) está constituido por las ramas y ramillas que no atrapa la grapa de la grúa. Para calcular las cantidades de residuo no recogido se aplica la siguiente fórmula:

$$[2] \quad R_{nr} = R_g - R_r = R_g - B - R_d$$

La cantidad de residuo recogido respecto al generado determina la eficiencia en la recogida de residuos selvícolas (E_r). Esta eficiencia determina el grado de efectividad en la operación de recogida de los residuos, y tiene valor 1 cuando todos los residuos generados son recogidos.

$$[3] \quad E_r = R_r / R_g$$

El residuo soltado en el proceso de empacado (R_d) se desprende a través de los espacios abiertos en la cámara de empacado y es generado por el accionamiento de los rodillos de la empacadora. La metodología seguida para determinar la cantidad de residuos selvícolas desprendidos y empacados consiste en un ensayo de campo ejecutado en los siguientes pasos (Jiménez, 2000):



Foto 17: Preparación para ensayo de cálculo de residuo desprendido

1) Colocación a pie de pista y pesado de residuo generado en el tratamiento selvícola.

2) Extensión del plástico, de peso conocido, robusto y extenso junto al residuo suelto.

3) Colocación de empacadora encima del plástico para proceder al

empacado, tras comprobar que la superficie de plástico es suficientemente extensa para recoger todo el residuo que se pueda desprender.

- 4) Una vez que se forma y suelta una bala, limpieza del residuo desprendido que se queda en la máquina sin caer al suelo. La empacadora se retira de encima del plástico, éste se ata y se pesa con todo el residuo desprendido en su interior.
- 5) Pesado de la bala y repetición del proceso desde el punto 2 habiendo vaciado el residuo del plástico.



Foto 18: Pesado de residuo desprendido

Este ensayo generó 10 balas. Las pesadas se realizaron con un dinamómetro digital sostenido en la grúa de la grúa de la empacadora.

Se determinó el coeficiente de pérdida de residuos en el empaqueo (Pe) como el porcentaje de la cantidad de residuo desprendido respecto al empaqueo.

$$[4] \quad Pe = Rd / B$$

1.3.3.1 *Análisis de nutrientes*

El residuo no recogido (Rnr) y el residuo desprendido (Rd) en el empaqueo a pie de tocón implican un aporte de nutrientes al suelo al quedarse en el monte. La metodología para estimar esta cantidad de nutrientes que se queda en monte consta de dos fases:

1. Toma de muestras

En el ensayo antes descrito se tomaron aleatoriamente muestras del Rg , Rd y B . El número de muestras tomadas fueron cuatro, seis y tres, respectivamente. Cada muestra pesaba aproximadamente 1 kg. Se etiquetaron y mandaron a analizar a laboratorio.



Foto 19: Toma de muestras de residuo generado

2. Análisis de nutrientes

Las muestras enviadas al laboratorio se homogeneizaron con el fin de extraer las cantidades requeridas para cada análisis de acuerdo a la metodología interna de control analítico. De cada muestra se obtuvieron tres alícuotas (los valores se refieren a base seca). Los parámetros medidos fueron:

| PARÁMETRO | NORMA DE REFERENCIA |
|------------------|--|
| Digestión ácida | LEA ITG-M-005. Ataque ácidos-microondas |
| Lixiviación | LEA ITR-M-010. Extracción agua (100 g seco/1 l) |
| Humedad | LEA ITG-M-003. Gravimetría |
| Materia orgánica | LEA ITG-M-013. Gravimetría |
| Nitrógeno total | LEA ITG-M-017. Digestión y volumetría |
| Fósforo total | LEA ITG-M-010. EUV/V, basado en SM/APHA 4500 C |
| Magnesio | LEA ITG-M-004. Espectrofotometría de absorción atómica. Llama. |
| Calcio | LEA ITG-M-004. Espectrofotometría de absorción atómica. Llama. |
| Potasio | LEA ITG-M-004. Espectrofotometría de absorción atómica. Llama. |
| Sulfatos | LEA ITA-M-042. Cromatografía iónica |

Tabla 4: Normas de referencia de parámetros medidos en laboratorio

Conocidas las concentraciones de los nutrientes ([N]) de las muestras y las cantidades de residuo generado (Rg), empackado (B) y desprendido (Rd), expresadas en kg, con las siguientes fórmulas se puede determinar el aporte de nutrientes del residuo desprendido y el total que permanece en el monte respecto al residuo generado:

$$[5] \quad \%_{[N]m} = \%_{[N]Rd} + (100 - \text{Eficiencia en la recogida})$$

$\%_{[N]m}$: porcentaje de cantidad de nutriente en el residuo que permanece en monte respecto del generado.

$$[6] \quad \%_{[N]Rd} = 100 * [N]_{Rd} * Rd / [N]_{Rg} * Rg$$

$\%_{[N]Rd}$: porcentaje de cantidad de nutriente en el residuo desprendido respecto del generado.

$[N]_{Rd}$: concentración de nutriente en el residuo desprendido. Expresado en % y mg/kg.

$[N]_{Rg}$: concentración de nutriente en el residuo generado. Expresado en % y mg/kg.

1.4 Distribución de tiempos y rendimientos de la empacadora

El estudio de tiempos tiene como objetivo el diseño de un modelo de productividad para la empacadora de empackado discontinuo ensayada: la Valmet WoodPac. Este modelo se quiere

adaptar a los movimientos específicos de la empacadora, para lo cual se describe un ciclo de trabajo en el que se diferencian distintas fases consecutivas. A continuación, se establecen los parámetros que determinan la producción de la empacadora obtenidos en los ensayos y, mediante el análisis de la relación entre ellos, se formula el modelo de productividad. Finalmente, con los datos de producción de la empacadora se valida el modelo de productividad.

El estudio de tiempos en el ámbito forestal está ampliamente descrito en la tesis *El aprovechamiento forestal mecanizado en las cortas de mejora de Pinus sylvestris L. Modelos de tiempos, rendimientos y costes y estudio de sus efectos ambientales*, de Eduardo Tolosana (1999). El método más desarrollado es la terminología propuesta por el grupo de trabajo WP 3.04.02 de IUFRO (Bjöherden et ál., 1988;1990;1995).

La clasificación de tiempos también fue recogida por el antiguo Comité Internacional de Organismos del Trabajo Agrícola (CIOSTA), que distinguía cinco subdivisiones: tiempo efectivo, tiempos accesorios, tiempos de preparación, tiempos de desplazamiento y tiempos muertos.

Utilizando como base las definiciones y modelos de tiempos conocidos, se especificó la descomposición de los tiempos y se eligieron los métodos de toma de datos. La unidad que se suele adoptar para los estudios de tiempos es el centiminuto (cmin); en nuestro caso las unidades adoptadas para expresar los tiempos son la hora (h), el minuto (min) y el segundo (s). La hora se emplea en las expresiones de producción (bala/h), los minutos se usan en los modelos de tiempos y los segundos se utilizan en los parámetros temporales del modelo de productividad. Se han adoptado estas unidades para facilitar la comprensión e intuición de la magnitud de los valores.

1.4.1 Definiciones

Las definiciones de los tiempos adoptados son:

Tiempo de control o de presencia (TC): es el tiempo total de control sobre la empacadora, por lo que corresponde a la suma del tiempo operativo y no operativo. **TC = TT + TNO**

Tiempo de trabajo u operativo (TT): es la parte del TC en la que se trabaja directa o indirectamente en el funcionamiento diario de la empacadora. **TT = TTP + TTI**

Tiempo de trabajo productivo o directo (TTP): parte del TT empleado en las tareas del ciclo de trabajo de la empacadora. **TTP = TTPrinc + TTComp + TTSupl**

Tiempo de trabajo principal (TTPrinc) o Tiempo efectivo de empaçado (TEe): parte del TTP dedicado a las operaciones básicas del ciclo de empaçado. Estas operaciones se distinguen por que los rodillos de empaçado están en funcionamiento y comprenden el desplazamiento, la alimentación, el atado y la descarga de la bala.

Tiempo de trabajo complementario (TTComp): parte del TTP dedicado a operaciones del ciclo de trabajo de la empaçadora que complementan el ciclo de empaçado, como calentamiento y posicionamiento diario de la empaçadora, desplazamientos sin empaçar y colocación de balas.

Tiempo de trabajo suplementario (TTSupl): parte del TTP referido a operaciones del ciclo de trabajo que se han de repetir por una ejecución defectuosa, como rehacer una bala mal conformada o disponer correctamente el residuo selvícola suelto.

Tiempo de trabajo indirecto (TTI): parte del TT empleado en tareas necesarias de apoyo al ciclo de trabajo de la empaçadora. $TTI = TPrep + TTA$

Tiempo de preparación (TPrep): parte del TTI empleado en la preparación de la empaçadora y las condiciones de la zona de trabajo. $TPrep = TCP + TServ$

Tiempo de cambio de posición (TCP): parte del TPrep dedicado al cambio de posición y ajuste de la empaçadora de una zona de ensayo a otra.

Tiempo de servicio (TServ): parte del TPrep empleado en mantener la capacidad de trabajo de la empaçadora.

$$TServ = TRepar + TMant + TRepost$$

Tiempo de reparación (TRepar): parte del TServ empleado en la reparación de daños o el mal funcionamiento de la empaçadora.

Tiempo de mantenimiento (TMant): parte del TServ empleado en las necesarias operaciones cíclicas para el buen funcionamiento de la empaçadora.

Tiempo de repostado (TRepost): parte del TServ dedicado al repostado de la empaçadora y los desplazamientos necesarios hasta el depósito.

Tiempo de trabajo auxiliar (TTA): parte del TTI empleado en realizar tareas auxiliares no habituales que permiten el funcionamiento del sistema productivo.

$$\text{TTA} = \text{TForm} + \text{TApoyo}$$

Tiempo de formación (TForm): parte del TTA empleado en instruir al maquinista de la empacadora.

Tiempo de apoyo (TApoyo): parte del TTA dedicado a trabajo de apoyo al sistema productivo pero que no corresponde a los ensayos de productividad, como la caracterización de los residuos selvícolas o la saca de madera.

Tiempo no operativo (TNO): es la parte del tiempo de presencia que no se emplea en el ciclo de trabajo de la empacadora ni en actividades de apoyo. $\text{TNO} = \text{TInterrup} + \text{TDT}$

Tiempo de interrupción (TInterrup): parte del TNO considerado como interrupción del trabajo por visitas.

Tiempo de demora relacionado con el trabajo (TDT): parte del TNO relacionado con las necesidades de restablecimiento o interrelación del empacado en el sistema productivo.

$$\text{TDT} = \text{TDNP} + \text{TInterf} + \text{TDespl} + \text{TCfult}$$

Tiempo de descanso y necesidades personales (TDNP): parte del TDT dedicado al descanso y necesidades personales del maquinista durante el periodo de trabajo operativo.

Tiempo de interferencia (TInterf): parte del TDT que corresponde a tiempo sin actividad por interferencia entre elementos del sistema productivo.

Tiempo de desplazamiento al lugar de trabajo (TDespl): parte del TDT correspondiente a las idas y venidas al tajo del maquinista desde su residencia.

Tiempo de comida fuera del lugar de trabajo (TCfult): parte del TDT invertido en los desplazamientos y comida fuera del lugar del trabajo.

Se denomina **tiempo de actividad (TA)** al tiempo de trabajo (TT) más los tiempos de interferencia (TInterf) y de descanso y necesidades personales (TDNP): $\text{TA} = \text{TT} + \text{TDNP} + \text{TInterf}$

| TC | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|--------|-----|--------|-------|---------|-----------|-------|--------|------|---------|--------|--------|
| TT | | | | | | | TNO | | | | | | |
| TTP | | | TTI | | | | TInterrup | TDT | | | | | |
| TTPrinc TEe | TTComp | TTSupl | TCP | TPrep | | | | TTA | | TDNP | TInterf | TDespl | TCfult |
| | | | | TRepar | TMant | TRepost | | TForm | TApoyo | | | | |
| X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X | | |
| TA | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 5: Terminología de distribución de tiempos

El estudio de los rendimientos persigue dos objetivos: por un lado conocer la producción temporal de los ensayos y por otro representar la proyección y variabilidad de dicha producción en función de la variación de los tiempos de trabajo. Los rendimientos utilizados son:

Rendimiento efectivo de empackado (Ree) = número de balas / tiempo efectivo de empackado

El rendimiento efectivo corresponde a la producción efectiva de los ensayos y se expresa en balas por hora de trabajo efectivo (balas/hte).

Rendimiento de empackado (Remp) = número de balas / tiempo de actividad (TA)

El rendimiento de empackado corresponde a la producción total de los ensayos realizados y se expresa en balas/h.

De esta forma, podemos definir el siguiente coeficiente de efectividad:

- **Coeficiente de efectividad de empackado (Cee) = TEe / TA**

1.4.2 Toma de datos

La toma de datos en campo del ciclo de trabajo de la empackadora se efectuó con tres procedimientos:

- 1) Partes diarios de trabajo de la empackadora.
- 2) Cronometraje continuo.
- 3) Filmación continua.

1.4.2.1 Partes diarios

En los partes diarios se recogió información del ciclo de trabajo de la empackadora durante los 19 días de duración de los ensayos de producción:

- Zona de trabajo, fecha y jornada.
- Hora de inicio y fin de la jornada.
- Duración y motivo de las interrupciones del ciclo de empackado.
- Nº de balas producidas en la jornada.

- Otras observaciones de interés.

Con este método se obtuvieron los valores para construir el modelo de tiempos de trabajo de la empacadora. El tiempo efectivo de empacado (TEe) se calculó como la diferencia entre la duración de la jornada y los tiempos no pertenecientes al ciclo de empacado.

Los valores de producción de la empacadora obtenidos con este procedimiento se utilizaron para validar el modelo de productividad.

1.4.2.2 Cronometraje continuo

Durante el trabajo de la empacadora, un operario con cronómetro anotaba los siguientes datos mientras andaba detrás de la máquina:



Foto 3: Toma de datos cronometraje continuo

- N° de movimientos de grúa: número de tongadas que efectúa la grúa en la formación de una bala.

- Distancia y tiempo de desplazamiento de la empacadora entre paradas durante el ciclo de empacado. La distancia se midió en pasos habiendo calculado y entrenado previamente la longitud de los pasos.

- Tiempo total del ciclo de empacado: tiempo total de formación de una bala.

- Otros tiempos ocurridos durante la observación: tiempos de interrupciones del ciclo de empacado, como instrucciones al maquinista, averías, etc.

La toma de datos con este método dependió de la disponibilidad de una persona para hacer el seguimiento a pie. Se anotaron un total de 139 ciclos de empacado.

Este método permitió estimar los valores de los siguientes parámetros del modelo de productividad:

Velocidad media de desplazamiento

Número de movimientos de grúa para formar una bala

Tabla 6: Parámetros del modelo de productividad con cronometraje continuo

1.4.2.3 Filmación

Esta metodología consiste en la grabación con una cámara de vídeo. Los vídeos se procesan en gabinete, donde se contabilizan todos los tiempos de cada una de las fases del ciclo de empacado. El objetivo de este método es identificar, clasificar y obtener valores de los parámetros del modelo de productividad.

Los datos recogidos son:

- Nº de movimientos de grúa: número de tongadas que efectúa la grúa en cada parada de alimentación.
- Tiempos de alimentación.
- Tiempos de desplazamiento.
- Tiempos de atado y descarga de la bala.



Foto 21: Filmación

Este método permitió estimar los valores de los siguientes parámetros del modelo de productividad:

Número de movimientos de grúa para formar una bala

Duración media de un ciclo de grúa en la recogida de los residuos selvícolas

Tiempo de atado y descarga

Tabla 7: Parámetros del modelo de productividad con filmación

1.5 Estudio del transporte viario y extraviario de las balas

El estudio del transporte de las balas recoge información desde que la empacadora descarga las balas hasta que llegan a fábrica. Esto comprende dos tipos de transporte: desembosque realizado con autocargador y transporte en camión.

Este estudio tiene como objetivo conocer los valores medios de producción en los ensayos y obtener un modelo de productividad para la saca de balas. No contiene un análisis de costes, aunque sí refleja un coste de producción basado en el precio horario de subcontratación de los trabajos.

1.5.1 Transporte extraviario: saca con autocargador



Foto 22: Saca de residuo suelto con autocargador

Se realizaron dos tipos de desembosque del residuo selvícola con el autocargador: saca de residuo suelto en ensayo a pie de pista (EPP) y saca de balas en ensayo por curvas de nivel (ECN). En el ensayo de máxima pendiente (EMP) las balas no se sacaron con autocargador.

El modelo de productividad elaborado para la saca de balas se simplificó a partir del modelo para la saca de madera creado por Rubio *et ál.* (2000). Las fórmulas utilizadas permanecieron igual que en el original puesto que el ciclo de trabajo del autocargador era el mismo.

Las metodologías para la toma de datos fueron dos: partes diarios de trabajo y seguimiento de viajes.

Los partes diarios de trabajo recogían el número de horas trabajadas diarias, la zona de trabajo, el gasoil repostado, la carga transportada (rama suelta, balas, madera) y observaciones. Con este método se obtuvo la producción en balas/h, y se consideró que el número de horas trabajadas era el tiempo de actividad.

El seguimiento de viajes se realizó en el desembosque de balas en el ECN, y en él se anotaban distancias, tiempos y número de balas cargadas. Este método se realizó en 11 viajes en los que se sacó un total de 83 balas.

Las distancias se midieron con el cuentakilómetros del autocargador y los desplazamientos medidos fueron:

- En vacío, desde cargadero hasta primera parada junto a una bala.

- Cargando, distancia desde la primera bala recogida hasta completar la carga.
- Cargado, desde última bala recogida hasta cargadero.

Los tiempos se midieron con cronómetro y fueron:

- Tiempo de desplazamiento en vacío.
- Tiempos de desplazamientos cargando en monte.
- Tiempos de paradas para recogida de balas.
- Tiempo de desplazamiento cargado a cargadero.
- Tiempo de descarga de las balas en cargadero.

Con este método se determinaron los valores de los parámetros del modelo de productividad del autocargador para la saca de las balas, así como el valor del tiempo total del ciclo de trabajo (Tcab) y el rendimiento efectivo para la validación del modelo.

1.5.2 Transporte viario

Los datos del transporte de las balas en camión se recogieron en los partes de los portes realizados, donde figuraban los siguientes parámetros:

- Capacidad de carga de plataforma.
- Nº balas.
- Peso de carga, medido en báscula de entrada a fábrica.
- Destino.
- Fecha.
- Matrículas de plataforma y camión.



Foto 23: Transporte de balas

2 CARACTERIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

2.1 Descripción del área de experimentación

La Sierra de Los Filabres constituye el principal macizo montañoso de Almería, ocupa su zona central y se extiende de Este a Oeste. Tiene una longitud de 50 km y una anchura de 25 km, con una superficie total aproximada de 150.000 ha. Desde el punto de vista geológico puede encuadrarse dentro de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas. La altitud media del complejo es considerable (1.500 m) y destacan algunas cotas superiores a los 2.000 m, como Calar Alto (2.168 m), Calar del Gallinero (2.049 m), Las Hoyas (2.011 m) y Tetica de Bacares (2.080 m). Su núcleo cristalino de edad paleozoica está rodeado por dos mantos geológicos, que sufrieron grandes plegamientos durante la orogenia alpina. El más extenso es el Complejo Nevado-Filábride, compuesto principalmente por cuarcitas, micaesquistos y pizarras silíceas. En la zona norte se encuentran materiales correspondientes al Complejo Alpujárride, que aparecen como islotes formados por calizas y dolomías y donde surgen los principales yacimientos metalíferos de plomo, cinc, cobre, cinabrio y hierro, como los de Serón y Bacares, y marmóreos, que adquieren gran espesor en algunas áreas de Macael, Cóbdar y Chercos. Por último, destaca la presencia de materiales sedimentarios más recientes (neógenos y cuaternarios) como margas, limos y arenas, que se sitúan en las bases del macizo montañoso.

La Sierra de Los Filabres actúa como la principal barrera divisoria que separa las dos grandes cuencas hidrográficas de la provincia: la del Andarax y la del Almanzora. Sobre esta última vierten sus aguas los ríos Saúco, Bacares, Sierro y Laroya. Sin embargo, sus características climáticas la encuadran dentro del mediterráneo árido, donde las precipitaciones se concentran en el otoño y el invierno y oscilan entre los 360 l/m² de las zonas basales y los menos de 500 l/m²



Foto 24: Repoblaciones en la Sierra de Los Filabres

de las cumbres. En la recarga de las cuencas influye directamente el temprano deshielo de las nieves invernales que suelen coronar sus cumbres y que da paso a un prolongado y seco estiaje (www.almediam.org).

La Sierra de Los Filabres ha estado marcada por la intensa labor repobladora llevada a cabo entre 1940 y 1971, cuando se repoblaron 3.095.444 ha en España (Gómez y Mata, 2002). El primer paso de esta fase repobladora fue la compra y consorcios de terrenos, mostrando la crisis rural de la montaña bética donde se pasó de un modelo histórico de monte intensamente humanizado y llanos litorales estériles y apenas aprovechados, a la situación justamente contraria (Gómez y Mata, 2002). En la Sierra de Los Filabres existen aproximadamente unas 60.000 ha de superficie reforestada en monte público (Carreras y Valero, 1999). Debido a las características intrínsecas del terreno que desencadenan fuertes procesos erosivos se implantaron especies frugales en densidades elevadas, entre 1.600 a 3.000 pies/ha, capaces de sobrevivir en condiciones de escasa disponibilidad de nutrientes y fuerte insolación, por eso se eligieron especies del género *Pinus*, de clara vocación colonizadora y restauradora de suelos, así como la elección del método de preparación del terreno por terrazas acaballadas.

Actualmente, estas masas se encuentran en estado de monte bravo o latizal y presentan una espesura excesiva que dificulta tanto su desarrollo y regeneración como el establecimiento de otras especies propias del cortejo natural que contribuyan al incremento de la biodiversidad y a la evolución hacia etapas más maduras de la sucesión vegetal. Sin la aplicación de los tratamientos selvícolas, la masa evoluciona a situaciones críticas, por lo que es propensa a plagas e incendios forestales que, de hecho, ya ha sufrido.

El área de experimentación está en la zona denominada Cerro Joraique, que se encuentra en los montes públicos «Arroyo Berruga y Orapla» (AL-10030-JA) y «Parcelas del Luco, Río de Los Santos y Río del Sauco» (AL-10046-JA). Según la denominación actual se encuentran dentro del Grupo de Montes de Gérgal.

El área de experimentación recoge las características generales de las masas de repoblación en la Sierra de Los Filabres. Está poblada por un pinar monoespecífico de *Pinus sylvestris* conformado como latizal. La edad media de la masa es de 35 años.

La superficie de ensayos de producción se divide en tres parcelas agrupadas en dos zonas, diferenciadas por su pendiente y densidad de pies.

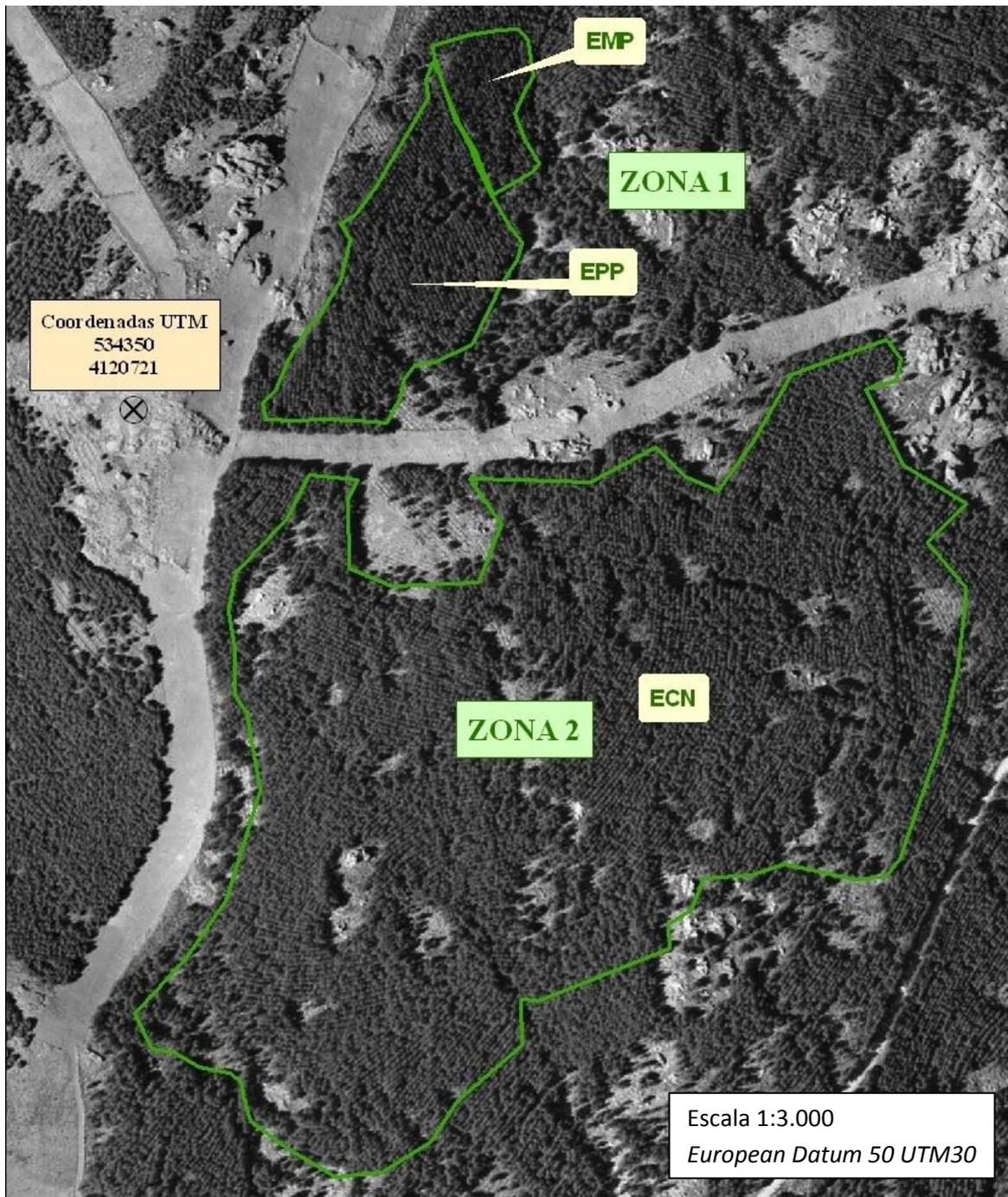


Ilustración 1: Distribución parcelas de ensayo de empacado

| | SUPERFICIE (ha) | TRATAMIENTOS SELVÍCOLAS ANTERIORES |
|---|----------------------------|---|
| ZONA 1 PARCELA EPP (EMPACADO A PIE DE PISTA) | 1,79 | NO |
| ZONA 1 PARCELA EMP (EMPACADO MÁXIMA PENDIENTE) | 0,42 | NO |
| ZONA 2 PARCELA ECN (EMPACADO CURVAS DE NIVEL) | 14,82 | SI |

Tabla 8: Parcelas de ensayos de empacado

La masa se distribuye homogéneamente y deja rasos en zonas de afloramientos rocosos. El terreno es poco pedregoso. Los tratamientos selvícolas realizados son la eliminación de pies dobles entre 1977 y 1985 y la clara y poda entre 1991 y 1994. Pese a los tratamientos realizados, la densidad del pinar es todavía elevada; las podas consistieron en la eliminación de los dos primeros pisos de ramas, por lo cual todavía quedan numerosas ramas bajas.



Foto 25: Densidad inicial en zona 1

La principal limitación para el aprovechamiento es el riesgo de derribo por viento y nevadas. Son las masas de mejor aptitud productora en la Sierra de Los Filabres, debido al gradiente de precipitación por la cota.

2.2 Criterios selvícolas

2.2.1 Plan Técnico de Ordenación del Grupo de Montes de Gérgal

Según el *PTO Gérgal*, el método de beneficio establece que el grupo de montes está formado por pinares, su regeneración no es vegetativa en ningún caso y su aprovechamiento es maderero; la forma fundamental de la masa para estas especies es el monte alto. Con ello se conseguirá la máxima renta compatible con los intereses de la propiedad, asegurando debidamente la persistencia del monte (art. 73.2 de las Instrucciones de Ordenación de 1970). No se indican tratamientos de regeneración, puesto que la masa de pinar en este grupo de montes es joven y no requiere aún este tipo de tratamientos, únicamente tratamientos de mejora que contribuyan a la persistencia y estabilidad de la masa.

2.2.1.1 Plan de cortas

Sólo se considerará aprovechamiento de madera aquella procedente de las claras, aunque se obtendrán ingresos en ambos tratamientos si los pies cortados tienen un diámetro normal superior a 17,4 cm.

Los tratamientos se llevarán a cabo, en primer lugar, abriendo una serie de filas o terrazas de árboles a modo de calles de desembosque, con el fin de apilar y sacar la madera y facilitar la eliminación de residuos mediante su quema o astillado. Posteriormente se realizará la corta.

ZONA 1 (dentro del Cantón 6 del PTO Gérgal)

La densidad media inicial de este cantón es de 1.417 pies/ha. Se propone una clara selectiva por lo bajo. En esta actuación se pretende dejar una densidad media final de 920 pies/ha, tendiendo a eliminar los pies dobles, enfermos y de escaso porvenir y, en el caso de existir, los pies dominantes y codominantes mal conformados o dañados que compitan con árboles de porvenir. En consecuencia, se extraerá como media un tercio de los pies de la masa. El área basimétrica pasará de 16,95 a 13,38 m²/ha.

ZONA 2 (dentro del Cantón 16 del PTO Gérgal)

La densidad media inicial de este cantón es de 1.666 pies/ha. Se propone para este cantón una clara selectiva por lo bajo del pinar, dejando una densidad media final de 1.062 pies/ha y cortando los pies menores, enfermos, bifurcados y pies mayores mal conformados. La intensidad de la clara propuesta supone eliminar entre un tercio y dos quintos de la masa. El área basimétrica pasará de 23,73 a 18,37 m²/ha.

2.2.2 Estudio de optimización de las claras y clareos efectuados en la Sierra de Los Filabres

Este estudio, encargado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a la Universidad de Córdoba, recoge criterios selvícolas para la realización de tratamientos en la Sierra de Los Filabres. El tratamiento que se propone son claras selectivas consistentes en la elección de un cierto número de árboles de porvenir cuyo crecimiento se favorecerá mediante la realización de claras consistentes, exclusivamente, en la eliminación de los árboles que ejerzan mayor competencia con ellos.

Los árboles de porvenir se seleccionarán de entre los de mayor diámetro y atendiendo a los siguientes criterios en orden jerárquico:

1. Vitalidad: podrá estimarse a través del tamaño relativo de la copa y de los crecimientos primarios de la guía, entre otros caracteres.
2. Calidad del fuste: aquí se tendrán en cuenta todos los aspectos relevantes para la calidad maderable del fuste: verticalidad, rectitud, ramosidad, ángulo de inserción de las ramas, coeficiente mórfico, etc.
3. Distribución espacial: se intentará conseguir una distribución lo más uniforme posible de los árboles de porvenir, para lo que se tendrá en cuenta la distancia media que deberá existir entre ellos, calculada de acuerdo al número de árboles seleccionados.

Por supuesto, la existencia de defectos graves de forma, daños importantes o mal estado sanitario invalidará la selección de cualquier árbol como árbol de porvenir, sea cual sea su tamaño.

Los árboles que se eliminarán serán los principales competidores de los árboles de porvenir seleccionados. Para su elección se tendrá en cuenta el tamaño de los árboles y su distancia al árbol de porvenir. En ningún caso se considerarán competidores los árboles claramente dominados, al margen de su distancia al árbol de porvenir.

2.2.2.1 Estimación cuantitativa de los tratamientos de *Pinus sylvestris*

El área basimétrica mínima para esta especie es de 20 m²/ha. Las características dasométricas medias de las masas se presentan en la siguiente tabla:

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Densidad media | 1.401,4 pies/ha |
| Área basimétrica media | 24,4 m ² /ha |
| Volumen con corteza medio | 76,4 m ³ /ha |
| Diámetro normal medio | 15,3 cm |

Tabla 9: Características dasométricas medias de *Pinus sylvestris* en Filabres

Para la especie *Pinus sylvestris* se propone seleccionar 150 árboles de porvenir por hectárea. El número de pies a extraer oscilará entonces entre 225 pies/ha (extracción media de 1,5 pies por árbol de porvenir) y 300 pies/ha (extracción de 2 pies por árbol de porvenir). A esto hay que añadir la corta de un 15% de los pies existentes debido a las extracciones forzosas por la apertura de calles. Si se aplica este porcentaje a la densidad media de las zonas que van a tratarse (1.401,4 pies/ha), resulta un número adicional de extracciones de 210 pies/ha en la clara sistemática. El peso total de la clara oscilará, pues, entre 435 y 510 pies/ha. La densidad media final estará entre 890 y 965 pies/ha.

Asumiendo que el diámetro medio de ambas fracciones de la clara (selectiva y sistemática) puede aproximarse por el diámetro medio de la masa antes de la clara, es decir 15,3 cm, se

obtiene un rango para el peso total de la clara ,con respecto al área basimétrica extraída, de entre 8,0 m²/ha y 9,4 m²/ha. Esto supone un peso medio de la clara de entre el 32,8% y el 38,5% del área basimétrica inicial. En volumen, la clara supondrá una extracción media de entre 25 y 29,4 m³/ha.

2.2.3 Señalamiento

2.2.3.1 Señalamiento de pies

El primer criterio para el señalamiento de pies es la selección para su corta de los pies secos, los enfermos o en los que se aprecien síntomas de ataques de perforadores o chupadores, los pies comprimidos o hundidos, y los tumbados, torcidos y descopados, es decir, los mal conformados.

El segundo criterio es el señalamiento de los pies con un diámetro normal igual o inferior a 12 cm.

El tercer criterio de señalamiento es el de reducir la competencia sobre los pies de futuro, lo que implica eliminar pies de diámetros superiores a los indicados en el segundo criterio. Este criterio se establece debido a la propia distribución de la masa, donde por características de idoneidad de sitio suelen aparecer bosquetes de 2 a 4 pies de diámetro y porte considerable respecto a la masa existente. Las normas para la aplicación de este criterio son:



Foto 26: Pies señalados en zona 2

- Diferencias apreciables en cuanto al diámetro normal. En principio, se señalarán siempre los de menor diámetro, a no ser que el pie de mayor diámetro presente una copa verde inferior al tercio de la altura total.
- Altura de la copa verde en relación con la altura total del árbol. Se señalarán los pies que presenten la menor relación de copa verde con respecto a la altura total y en cualquier caso aquellos cuya relación sea inferior a un tercio.

- Densidad y coloración de acículas. Se señalará para la corta el pie que presente una menor densidad de acículas en su copa verde y cuyo color tienda a tonos verde amarillentos o verde marrón, en beneficio del que presente colores verdes intensos.

A igualdad de los anteriores casos, se señalarán para la corta los pies cuyo último crecimiento anual sea menor.

La intensidad del señalamiento se reducirá en los bordes de la masa, vaguadas y barrancos en una franja de 10 metros, y en el borde de vientos predominantes en una franja de 20 metros. En estas franjas el señalamiento se hará exclusivamente de acuerdo al primer criterio, pero sin eliminar los mal conformados en el mismo borde de la masa.

2.2.3.2 Señalamiento de calles

Una vez señalados los pies se procederá al señalamiento de las calles. Este señalamiento no se realizará de forma sistemática a distancias de 20 metros y siguiendo curvas de nivel, sino teniendo en cuenta los dos criterios siguientes:

- Reducción del sacrificio de corta. La calle se diseñará siguiendo los pies señalados anteriormente.
- Mantenimiento de una distancia entre calles no superior a 20 metros.

Los pies que se señalarán como sacrificio de corta serán aquellos que impidan el paso de la maquinaria, siendo el ancho de la calle de 3,5 metros, ampliables a 5 metros cuando exista un cambio de dirección sin sobreaño suficiente en la calle para facilitar el giro de la maquinaria.

2.3 Descripción de los ensayos de productividad de la empacadora

Los sistemas de aprovechamientos empleados en los ensayos de productividad eran mecanizados y se realizaron con tres máquinas forestales:

- Procesadora de orugas Neusson (en la actualidad MHT) 11002 HVT.
- Autocargador Dingo 8x8.
- Empacadora Valmet WoodPac montada en autocargador Valmet 860.1 8x8 con grúa Cranab Combi 720.



Foto 27: Procesadora Neusson 11002 HVT

El periodo de ejecución y la superficie de los ensayos vinieron determinados por la disponibilidad en tiempo y coste de la máquina WoodPac, cuyas funciones eran:



Foto 28: Recogida de residuo por empacadora

- Recogida del residuo selvícola y alimentación de la tolva por su parte superior.
- Compresión por enrollamiento.
- Atado del residuo selvícola.
- Descarga directa de la bala por la parte lateral.

Se diseñaron tres parcelas de ensayo donde se analizaron tres procedimientos distintos de trabajo. Por un lado, se diferenció entre el empacado a pie de pista y el empacado a pie de tocón, éste último ejecutado por máxima pendiente y por curvas de nivel. El desplazamiento por curvas de nivel de la maquinaria se realizó por las terrazas del terreno, si bien, en algunas calles y debido a los criterios de señalamiento, se produjeron algunos cambios de terraza, o de curva de nivel, en una misma calle.

Los sistemas de aprovechamientos realizados constan de cuatro fases:

- Fase de corta: se realiza siempre a pie de tocón y el desplazamiento es por máxima pendiente y por curvas de nivel.
- Fase de empacado: se realiza a pie de pista, a pie de tocón y el desplazamiento es por máxima pendiente y por curvas de nivel.
- Fase de saca de madera: se realiza por curvas de nivel y por máxima pendiente.
- Fase de saca de residuo selvícola: el residuo suelto se saca por curvas de nivel y el residuo empacado (bala) se saca por curvas de nivel y por máxima pendiente.

Las fases de corta y saca de madera son los procedimientos clásicos de trabajo en los aprovechamientos con sistemas de madera corta.

2.3.1 Empacado a pie de pista (EPP)

Es el primer ensayo realizado y su objetivo era conocer el funcionamiento de la empacadora en las condiciones más favorables. También se utilizó como periodo de adaptación de la máquina y el maquinista a las condiciones propias del residuo selvícola y del terreno.

- *Fase de corta:* la procesadora iba abriendo la calle y procesando los pies señalados de las entrecalles. El desplazamiento era por curvas de nivel y se podía cambiar de curva en una misma calle. El diseño de la calle no seguía una única curva de nivel, sino que había desplazamientos entre terrazas en una misma calle. Teniendo en cuenta que el residuo selvícola iba a recogerse con maquinaria, los árboles se procesaban de forma que las pilas de residuos quedasen situadas a borde de calle junto con los paquetes de madera.
- *Fase de saca:* el autocargador se desplazaba por las calles sacando la madera y el residuo suelto y dejándolos apilados a pie de pista (punto accesible a camión).
- *Fase de empacado:* el empacado se realizaba junto a las pilas de residuo selvícola y las balas se dejaban apiladas en el mismo lugar.



Foto 29: Empacado a pie de pista

2.3.2 Empacado por curvas de nivel (ECN)

Este ensayo era el de mayor superficie de trabajo y el de mayor duración.



Foto 30: Disposición de madera y residuos en ECN

- *Fase de corta:* se realizó igual que en el EPP.

- *Fase I de saca:* el autocargador sacaba la madera a pie de pista.

- *Fase de empacado:* la empacadora se desplazaba por curvas de nivel a lo largo de las calles abiertas por la procesadora empacando el residuo selvícola y situando las balas a borde de

calle. Dentro de una misma calle había cambios de curva de nivel.

- *Fase II de saca:* el autocargador sacaba las balas a pie de pista.

2.3.3 Empacado por máxima pendiente (EMP)

Este ensayo se ejecutó de igual forma que el ECN, pero el desplazamiento de la maquinaria era por máxima pendiente, es decir, por calles perpendiculares a las curvas de nivel.

La saca de las balas y la madera corrió a cargo de la empacadora en diversos tramos porque el autocargador utilizado para la saca no pudo realizar el trabajo.



Foto 31: Disposición de madera y residuos en EMP

3 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS

3.1 Elaboración de datos

Todos los datos están informatizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel 2007. Las gráficas, tablas, operaciones y descripción estadística de los datos están realizadas con las herramientas propias de este *software*.

3.2 Análisis económico de la empacadora

El análisis económico se centró en el estudio de costes fijos y variables de la empacadora y determinó su valor medio dentro del periodo de amortización. Esta metodología se basa en modelos clásicos de costes horarios de funcionamiento aplicados a las condiciones particulares de los trabajos (Baumgras y Jeff, 1978). Los datos fueron facilitados por el distribuidor de la empacadora y por las mediciones en los ensayos.

Se consideraron costes fijos la amortización e intereses del precio de compra del equipo de empacado (autocargador y empacadora), el seguro anual y el coste del maquinista.

Se consideraron costes variables el consumo de combustible y lubricantes, el coste de mantenimiento y reparaciones, y el gasto en neumáticos.

3.2.1 Amortización e intereses

La fórmula empleada para el valor medio de la amortización anual fue:

$$[7] \quad \text{Anual} = \text{Depreciación efectiva (€)} / \text{Periodo de amortización (años)}$$

siendo la depreciación efectiva (De) la diferencia entre el precio de compra (Pc) de la máquina y su valor residual (Vr) a la finalización del periodo de amortización (n).

El valor medio anual de los intereses del capital necesario para la compra de la máquina se calculó como la media del producto del capital pendiente de amortizar cada año por la tasa de interés (i) expresada en tanto por uno, durante el periodo de amortización.

3.2.2 Seguro

El coste del seguro se calculó para el primer año como el porcentaje respecto del precio de compra de la máquina. Se consideró un incremento de un 1% anual del valor del seguro. El valor medio del seguro corresponde a la media del coste del seguro anual durante el periodo de amortización.

3.2.3 Maquinista

El coste del maquinista incluía los conceptos de salario, dietas y vehículo. Los datos se calcularon a partir de información de empresas del sector.

3.2.4 Combustible y lubricantes

Se contabilizaron los litros consumidos durante los ensayos y anotados en los partes diarios, y se calculó el consumo horario respecto al tiempo de actividad.

El consumo de lubricante anual se calculó a partir de información de empresas del sector como un porcentaje respecto al consumo de combustible.

3.2.5 Mantenimiento y reparaciones

El coste de mantenimiento incluía los gastos de dos revisiones ordinarias y una principal que se habían de realizar anualmente. Además, también debía incluir los gastos derivados de las operaciones de mantenimiento diarias, pero no se consideró en este apartado porque el principal coste era la mano de obra y ya estaba incluida en el salario del maquinista.

Tanto los gastos de mantenimiento como de reparación fueron facilitados por el distribuidor de la empacadora. Se consideró un incremento anual del 10%.

3.2.6 Neumáticos

A partir de datos de empresas del sector se determinó un precio y un periodo medio de duración de los neumáticos.

3.3 Análisis del sistema logístico integrado y transformación industrial

A partir de los datos que figuran en antecedentes de parámetros del aprovechamiento y con los modelos de productividad de la empacadora y el autocargador para la saca de balas se determinó la productividad efectiva del sistema logístico de empacado. Se consideró la misma reducción de productividad por clase de pendiente que el utilizado por el autocargador en la saca de madera.

Según estos rendimientos efectivos, la superficie que tratar y las cantidades de madera y residuo selvícola que extraer anualmente, se determina el número de unidades de medios de producción necesarias para ejecutar los tratamientos selvícolas de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$[8] \quad MP = UMq * Re * Ce * TA$$

MP: materia prima (m³ y balas).

UMq: unidades de máquinas (procesadora, autocargador y empacadora).

Re: rendimiento efectivo (m³/hte, balas/hte).

Ce: coeficiente de efectividad.

TA: tiempo de actividad anual.

El número total de balas se calculó a partir de la cantidad de residuo generado por pie y la densidad a extraer que figura en antecedentes y aplicando los coeficientes de efectividad en la recogida del residuo y de pérdidas en el empaçado, calculados en la tesis. La cantidad de residuo selvícola anual en m³, puesto en planta, se calculó a partir del contenido de residuo sólido de cada bala.

Las unidades de máquinas necesarias para ejecutar el aprovechamiento anual una vez fijado su rendimiento efectivo, la superficie y sistema de trabajo sólo dependen del coeficiente de efectividad. Para ello, se plantean tres hipótesis de trabajo:

TA₁: trabajo a un turno, 1.800 horas/año. Ce < 0,78.

TA₂: trabajo a dos turnos, 3.600 horas/año. Ce < 0,78.

TA₃: trabajo a dos turnos, 3.600 horas/año. 0,78 < Ce < 0,85.

En base a este planteamiento se determinó el valor exacto de los coeficientes de efectividad y el número de unidades necesarias en cada una de las hipótesis de acuerdo a la fórmula anterior.

El análisis económico del sistema logístico integrado parte de los costes horarios de los medios de producción, que se calcularon con los costes que aparecen en el anexo para la procesadora y el autocargador y con el calculado en la tesis para la empaçadora. Estos costes se reflejan para las tres hipótesis planteadas en base al coeficiente de efectividad. En base a los costes horarios de los medios de producción y sus rendimientos se determinó el coste de suministro de la madera y las balas.

Se estudia la evaluación financiera para las tres hipótesis planteadas del sistema logístico integrado haciendo variar el precio de venta de la madera aserrada seca y fijando unos precios de venta por los productos obtenidos. Se determinan dos umbrales como parámetros del análisis financiero:

- Umbral de rentabilidad: valor mínimo de la TIR a partir del cual el proyecto es rentable. Su valor es el interés del préstamo de la inversión, 5,5%.
- Umbral de viabilidad: valor mínimo de la TIR a partir del cual el proyecto es viable. Este umbral indica que no hay ningún flujo de caja negativo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



TESIS: EMPACADO DISCONTINUO
A PIE DE TOCÓN DE RESIDUOS
SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL DE
BIOMASA FORESTAL.

1 CARACTERIZACIÓN FISIAGRÁFICA Y DASOMÉTRICA

1.1 Caracterización fisiográfica

Las características fisiográficas de las parcelas de ensayos de empacado no presentaron limitaciones para la ejecución de los trabajos de la empacadora. Los valores de la pendiente media del terreno en las parcelas EPP y ECN son indicativos, puesto que la empacadora trabajaba a pie de pista y por curvas de nivel, respectivamente. El trabajo por curvas de nivel se realizó en terrazas, motivo por el cual la pendiente transversal no alcanza valores más altos.

| | PENDIENTE MEDIA TERRENO (%) | INTERVALO VALORES PENDIENTES DE TRABAJO (%) | PENDIENTE MEDIA DE TRABAJO (%) | VALORACIÓN PENDIENTE |
|---|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------|
| ZONA 1 PARCELA EPP (EMPACADO A PIE DE PISTA) | 17 | 0 | 0 | BAJA |
| ZONA 1 PARCELA EMP (EMPACADO MÁXIMA PENDIENTE) | 35 | 27-40 | 35 | ALTA |
| ZONA 2 PARCELA ECN (EMPACADO CURVAS DE NIVEL) | 13 | Longitudinal: 0-25 Transversal: 0-15 | Longitudinal: 18 Transversal: 7 | MEDIA |

Tabla 9: Pendiente en parcelas de ensayo

1.2 Caracterización dasométrica

La realización de tres inventarios sobre la masa inicial, la masa que extraer y la final permitió su comparación, puesto que para las variables medidas (densidad y área basimétrica) se ha de cumplir el siguiente criterio:

$$[9] \quad \text{Inicial} = \text{Final} + \text{Extraído} \pm \text{error}$$

| | DENSIDAD (pies/ha) | | | ÁREA BASIMÉTRICA (m ² /ha) | | |
|---------------|-----------------------|------------------|-------|--|------------------|-------|
| | Inicial | Final + Extraído | ERROR | Inicial | Final + Extraído | ERROR |
| Zona 1 | 1.683 | 1.575 | 6% | 25,01 | 24,41 | 2% |
| Zona 2 | 1.077 | 1.122 | 4% | 19,37 | 20,82 | 7% |

Tabla 10: Errores de inventarios

El señalamiento o inventario de la masa que extraer se realizó por conteo pie a pie, por lo que no presenta error muestral. En cambio, los errores relativos de la muestra respecto a las densidades del inventario inicial y final son, con un nivel de confianza del 95%, del 20,47% y del 14,38%, respectivamente. El error más alto corresponde al inventario inicial por haber menor densidad de muestreo en la superficie de ensayos.

Los resultados generales de la densidad (D) en pies/ha, el área basimétrica (AB) en m²/ha y el diámetro medio cuadrático (dm) en cm de los tres inventarios –inicial (i), señalamiento (ext) y final (f)– se recogen en la siguiente tabla:

| | INVENTARIO INICIAL | | | SEÑALAMIENTO | | | INVENTARIO FINAL | | |
|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | D _i | AB _i | dm _i | D _{ext} | AB _{ext} | dm _{ext} | D _f | AB _f | dm _f |
| ZONA 1 | 1.683 | 25,01 | 13,75 | 1.045 | 12,97 | 12,57 | 530 | 11,44 | 16,58 |
| ZONA 2 | 1.077 | 19,37 | 15,13 | 622 | 8,75 | 13,38 | 500 | 12,07 | 17,53 |

Tabla 11: Resultados de inventarios

Las distribuciones diamétricas de las dos zonas muestran la representatividad y homogeneidad de estas masas de pino silvestre.

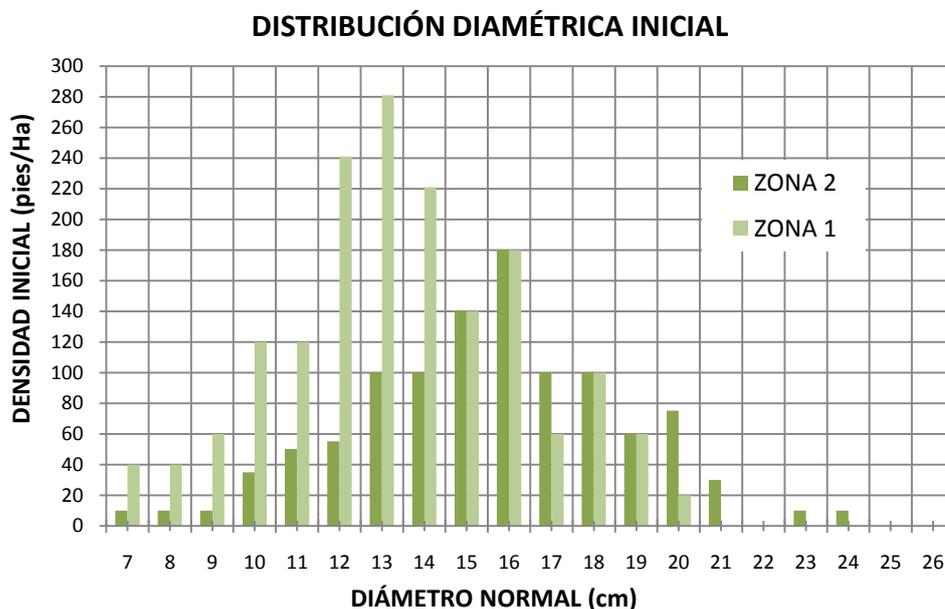


Gráfico 1: Distribución diamétrica inicial

En la zona 1 predominan los pies de diámetro normal 12, 13 y 14, mientras que en la zona 2 están los pies de 15 y 16, con menor densidad y menor diferencia entre densidades respecto a pies con diámetros normales próximos. Las diferencias entre las dos zonas están motivadas por la realización de claras en la zona 2, por lo que ésta presenta menor densidad y un diámetro medio cuadrático mayor.

DISTRIBUCIÓN DE PIES SEÑALADOS POR DIÁMETRO NORMAL

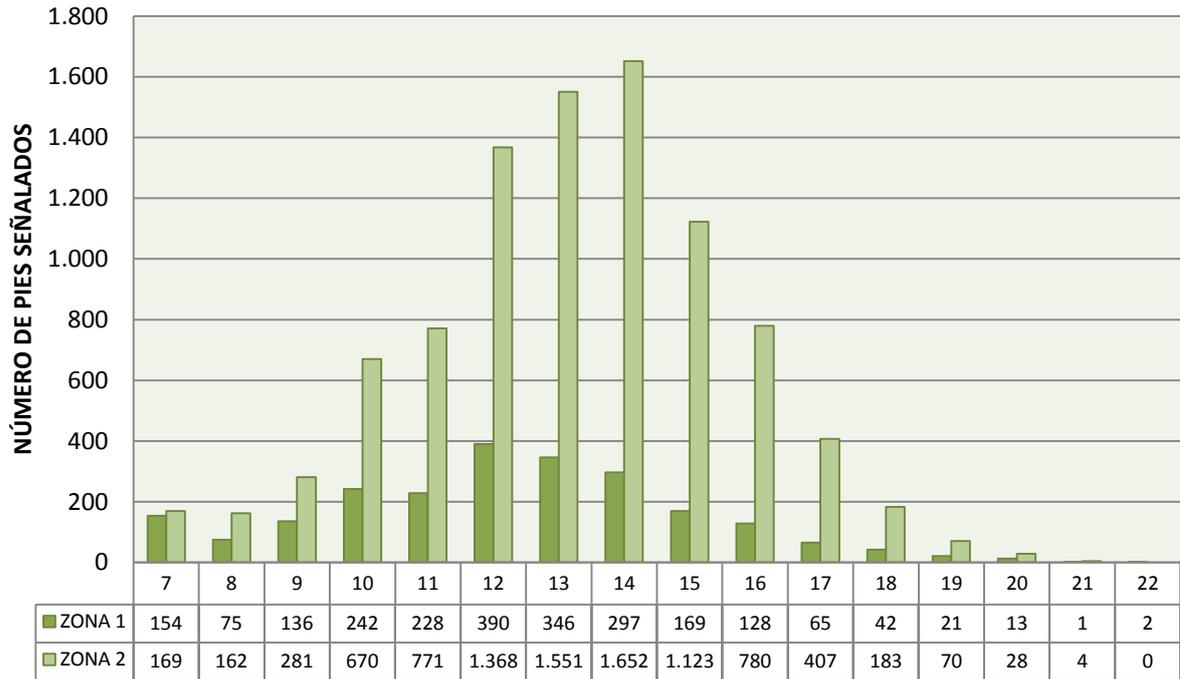


Gráfico 2: Distribución de pies señalados por diámetro normal

La representación de los datos del inventario de los pies señalados nos indica que el mayor número de pies eliminados corresponde a los diámetros 12, 13 y 14 de la zona 1 y a los pies de 12, 13, 14 y 15 en la zona 2.

DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA FINAL

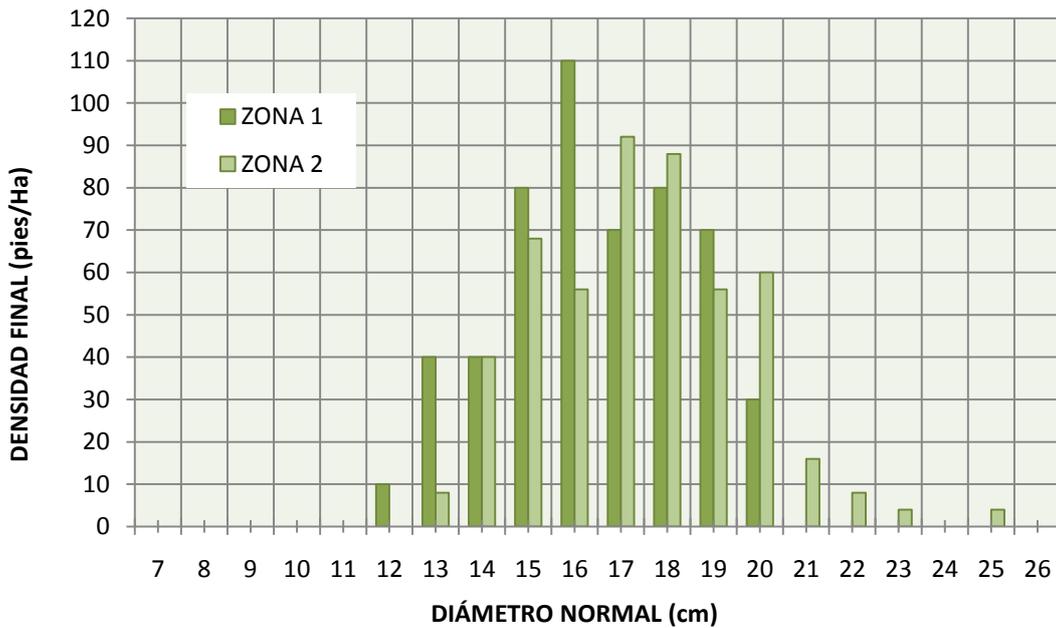


Gráfico 3: Distribución diamétrica final

La gráfica de distribución diamétrica final muestra cómo se mantienen los pies de mayores dimensiones y se eliminan los de menores dimensiones. Además se consigue ampliar el rango de diámetro de los pies predominantes, siendo para la zona 1 y la zona 2 los pies de 15 a 19 cm. Esto permite que disminuyan las diferencias dasométricas entre las dos zonas, tanto en distribución diamétrica como en densidad final.

Al agrupar las densidades (pies/ha) por clases diamétricas se puede representar de forma más gráfica la diferencia entre la masa inicial y la final.

Gráfico 4: Distribución de densidades por clases diamétricas en zona 1

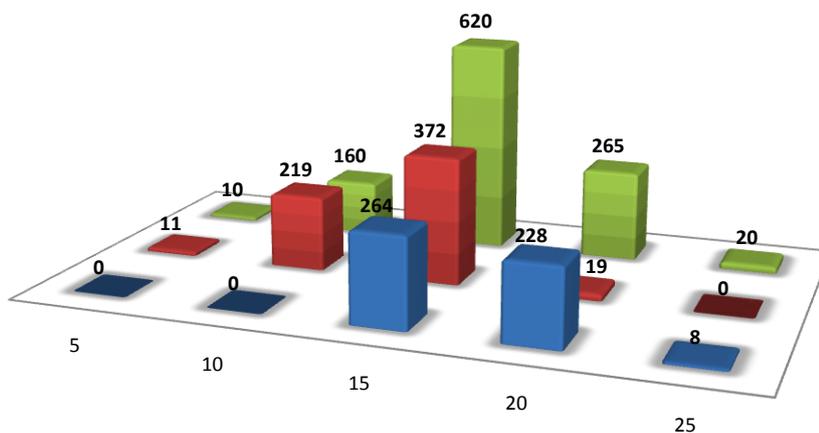
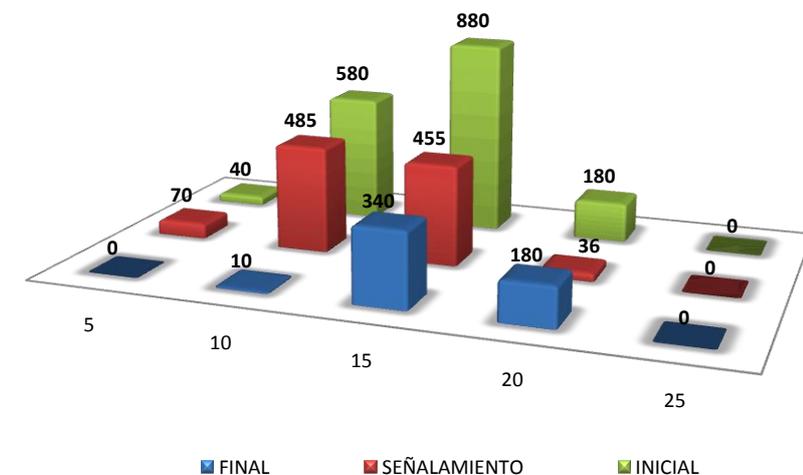


Gráfico 5: Distribución de densidades por clases diamétricas en zona 2

El peso de la clara realizado en los ensayos es más fuerte que el recomendado en el *Plan Técnico de Ordenación* y el *Estudio de optimización en La Sierra de Los Filabres*. La densidad final recomendada está entre 890 y 1.062 pies/ha, mientras que la efectuada es de 500 y 530 pies/ha.

La densidad final para el pinar maduro debería estar entre 150 - 400 pies/ha, llegando a ella con un clareo y tres claras cortando como máximo en cada intervención 1/3 del área basimétrica. (Carrera y Valero, 1999). En el ensayo se ha extraído prácticamente la mitad del área basimétrica.



Foto 32: Estado final de la masa en la parcela de ECN

Según Mesón y Montoya (1993), cuando una masa se ha mantenido demasiado tiempo con un alto grado de competencia entre individuos y que son incapaces de recuperarse tras una clara, lo más sensato es cortarla a hecho y recomenzar, porque tanto el aclarar como el no hacerlo, es muy peligroso para la masa.

Los criterios de señalamiento de pies seguidos en los ensayos de empacado han dejado la masa forestal con una densidad final de entre 500 y 530 pies/ha, mientras que el *Plan Técnico de Ordenación* y el *Estudio de optimización en la Sierra de Los Filabres* recomienda una densidad final de entre 890 y 1.062 pies/ha. El área basimétrica que se extrajo estaba entre 8,75 y 12,97 m²/ha y la recomendada por el PTO estaba entre 3,5 y 5,5 m²/ha. Por lo tanto, el peso de la clara efectuado es superior al recomendado según los documentos de planificación. Este aumento en la cantidad de biomasa que extraer y, por lo tanto, la disposición de más materia prima en un mismo lugar, permiten aumentar los rendimientos de la maquinaria y reducir sus costes.

Se han agrupado varias intervenciones en una sólo, lo que reduce los costes generales del tratamiento selvícola pero aumenta los riesgos de daños. Los posibles daños por vientos se han minimizado al considerar unas fajas de protección con mayor densidad en los bordes del área tratada. La urgencia de realización de estos tratamientos, incluso su agrupación, viene dada por el peligro de que ocurra el caso descrito por Mesón y Montoya. Actualmente, existen zonas en la Sierra de Los Filabres, donde ya ocurre este caso, encontrándose superficies con pies debilitados e incluso secos, muy vulnerables a posibles daños.



Foto 1: Masa de *Pinus sylvestris* con pies secos

La integración de los aprovechamientos forestales en los planes de actuación selvícola y en los proyectos de ordenación permite salvar la distancia entre las herramientas de planificación y su ejecución en el monte. Los proyectos de ejecución de tratamientos selvícolas han de estar supeditados a los criterios marcados en las herramientas de planificación y gestión. Los proyectos de ejecución tienen que marcar las condiciones del aprovechamiento de tal forma que no existan incoherencias entre ordenación-selvicultura-aprovechamiento-industria.

1.2.1 Volúmenes maderables extraídos

Debido al mayor peso de la clara, el volumen maderable extraído también es mayor que el recomendado, 25-30 m³/ha, para el EPP y EMP.

| | VOLUMEN MADERABLE EXTRAIDO | | | | COEFICIENTE DE APILADO |
|-----|----------------------------|----------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| | estéreos | m ³ | m ³ /ha | m ³ /pie | |
| EPP | 140 | 77 | 43,02 | 0,0423 | 0,55 |
| EMP | 37,79 | 20,78 | 49,49 | | 0,55 |
| ECN | 773,5 | 417,69 | 27,74 | 0,0446 | 0,54 |

Tabla 12: Volúmenes maderables extraídos y coeficiente de apilado

2 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO SELVÍCOLA

2.1 Residuo generado

Los resultados de los 26 árboles medidos se correlacionan para encontrar el mejor parámetro que exprese la generación de biomasa, tanto de madera como de residuo selvícola.

La mejor relación con el volumen maderable viene dada por el diámetro normal a través de una ecuación de segundo grado, donde el coeficiente de correlación, R^2 , tiene un valor de 0,82. El fuste se determinó según las instrucciones de tronzado de la procesadora, que fueron cortar una primera troza de 2,4 m de longitud y las siguientes con igual longitud hasta que el diámetro en punta delgada no fuera inferior a 6 cm.

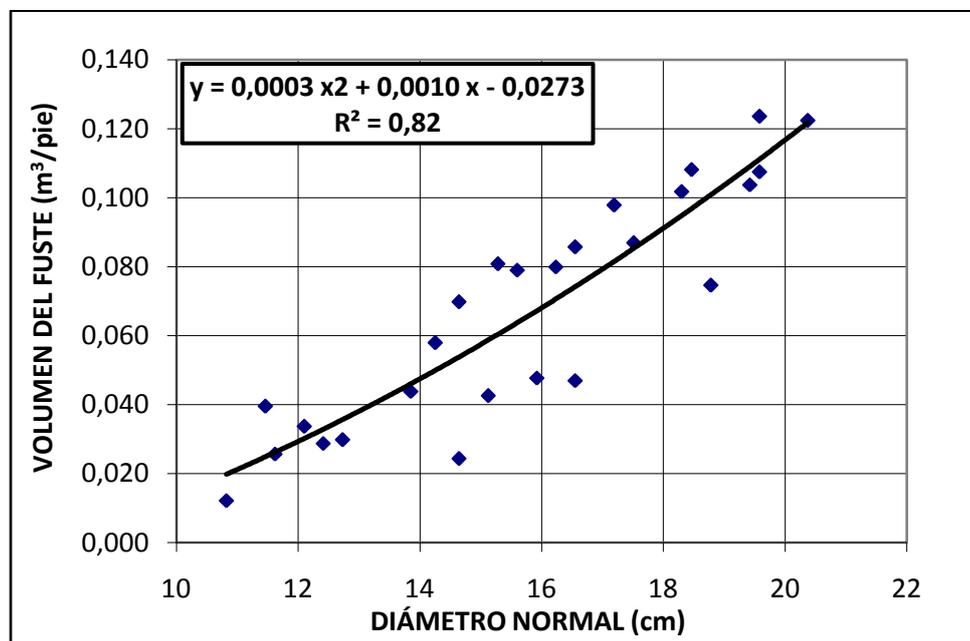


Gráfico 6: Regresión volumen del fuste - diámetro normal

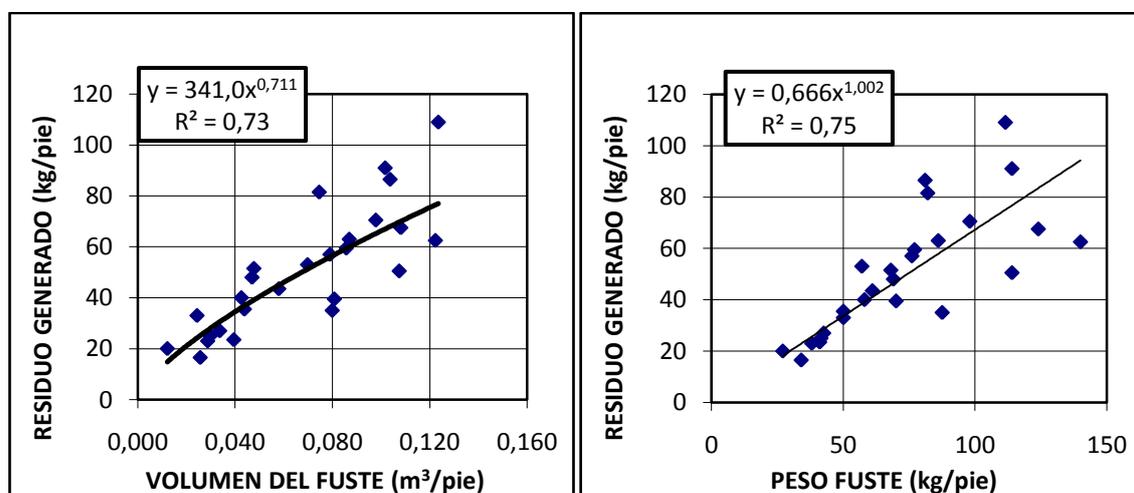


Gráfico 7: Reg. residuo generado - volumen del fuste

Gráfico 8: Reg. residuo generado - peso del fuste

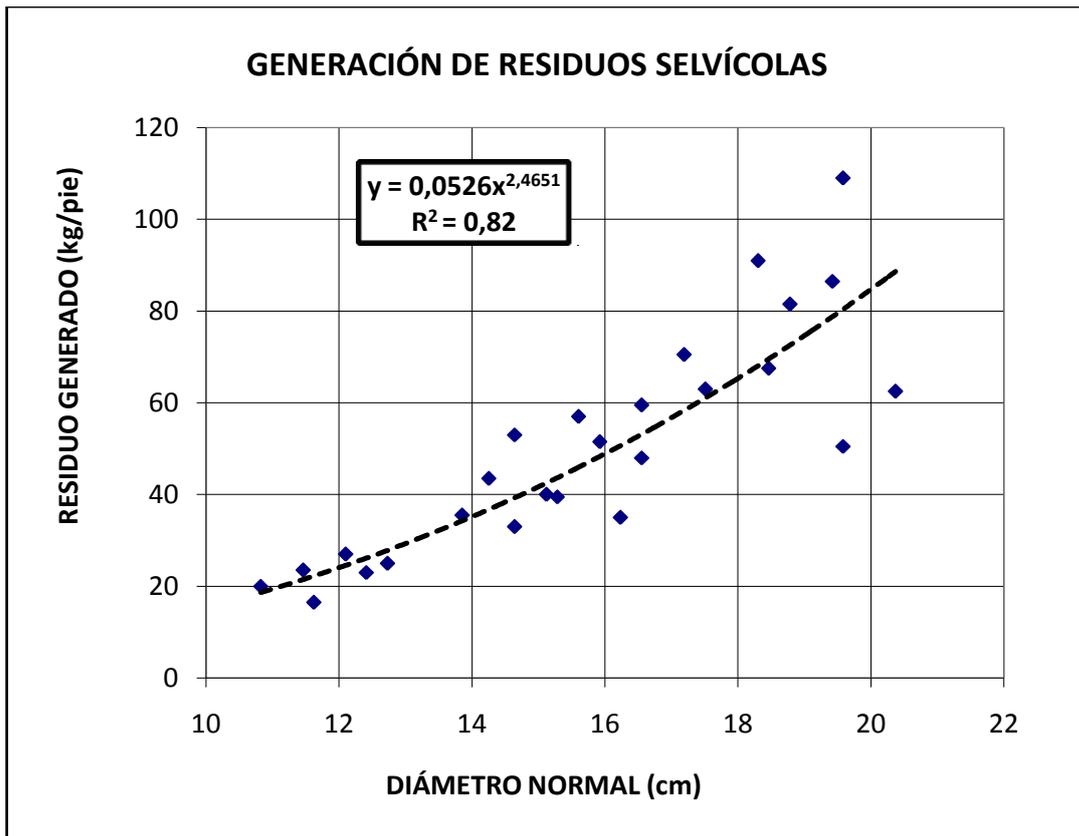


Gráfico 9: Regresión de residuo generado respecto a diámetro normal

El mejor parámetro para conocer la cantidad de residuo generado es también el diámetro normal expresado mediante una ecuación potencial con un valor de R^2 de 0,82.

Los residuos generados se expresan en peso verde (kg) en lugar de en volumen (m^3), como se hace en otros estudios, debido a la dificultad y la variabilidad en la medición del volumen aparente y específico del residuo selvícola suelto de los pies cortados. Algunos autores aplican las siguientes fórmulas para la determinación de densidades de residuos selvícolas (Korpilahti, 2001):

$$[10] \quad y = 397 + 9,4035 x$$

siendo y = densidad en kg/m^3

x = humedad en %

Con el residuo empacado sí se determinaron densidades, empleándose indistintamente unidades de peso o de volumen. Los residuos se pesaron inmediatamente después de cortar los pies y su humedad era superior al 60%. La elevada humedad se puede ver reflejada en la alta densidad aparente del fuste, $958 kg/m^3$.

| | DENSIDAD APARENTE FUSTE (kg/m ³) | RELACIÓN PESO RAMAS/TOTAL | COEFICIENTE GENERACIÓN DE RESIDUOS (t/m ³) |
|--|---|------------------------------|---|
| VALOR MEDIO | 958,37 | 0,4 | 0,66 |
| DESVIACIÓN TÍPICA | 178,95 | 0,06 | 0,17 |
| ERROR TÍPICO | 35,071 | 0,012 | 0,034 |
| ERROR RELATIVO (nivel de confianza=0,95) | 7,32% | 5,75% | 10,26% |

Tabla 13: Resultados de generación de residuos

La media del coeficiente de generación de residuos expresa que se generaron aproximadamente 2/3 de t de residuos por cada m³ de madera. La media de la relación del peso de las ramas respecto del total indica que el peso se repartía en un 40% en las ramas y un 60% en el fuste. Los valores de cantidad de biomasa producida en los residuos selvícolas es muy alta con respecto



Foto 34: Ramas de *Pinus sylvestris* en Filabres

a lo calculado en el estudio de producción de biomasa realizado por Montero *et ál.* (2005). Esto es debido a las características particulares de abundante ramosidad del pino silvestre en la Sierra de Los Filabres.

El cálculo del coeficiente de generación de residuos sirve para tener un parámetro que de forma rápida e intuitiva permita conocer, incluso a «ojo forestal», la cantidad de residuos generados una vez conocido el volumen de madera que extraer.

| | RESIDUO GENERADO (regresión) | | RESIDUO GENERADO (coeficiente) | |
|------------|---------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| | t | t/ha | t | t/ha |
| EPP | 51,91 | 29,00 | 50,91 | 28,44 |
| EMP | 12,18 | 29,00 | 13,74 | 32,72 |
| ECN | 295,60 | 19,95 | 276,15 | 18,63 |

Tabla 14: Residuo generado en parcelas de ensayo

Las cantidades de residuo generado calculadas con la regresión $Y = 0,0526 X^{2,4651}$ (siendo X el diámetro normal) y el coeficiente de generación de residuos presentan diferencias, siendo el error máximo del 13% para el EMP y el error en el ECN del 6,5%.

2.2 Residuo empacado

El número de balas totales producidas en el tratamiento selvícola y transportadas a fábrica es de 463. A los ensayos de empacado a pie de pista, en máxima pendiente y por curvas de nivel corresponden 430 balas. Las 33 balas restantes corresponden a 10 del ensayo del residuo desprendido y a 23 no procedentes de las parcelas de ensayo.

| | RESIDUO EMPACADO | |
|--------------|------------------|-------------|
| | Balas | Balas/ha |
| EPP | 59 | 33 |
| EMP | 15 | 35,7 |
| ECN | 356 | 24,9 |
| TOTAL | 430 | 25,2 |

Tabla 15: Cantidad de balas producidas

Las características medias de las balas son:

| | PESO VERDE (kg) | LONGITUD (m) | DIÁMETRO (m) | VOLUMEN APARENTE (m ³) | DENSIDAD APARENTE (kg/m ³) |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|---|
| VALOR MEDIO | 490 | 3,1 | 0,75 | 1,37 | 358,30 |
| DESVIACIÓN TÍPICA | 24,413 | 0,035 | 0,020 | 0,067 | 22,690 |
| ERROR TÍPICO | 4,651 | 0,007 | 0,004 | 0,013 | 4,323 |
| ERROR RELATIVO (nivel de confianza=0,95) | 1,95% | 0,44% | 1,06% | 1,93% | 2,48% |

Tabla 16: Características medias de las balas



Foto 35: Medición de humedad con higrómetro

La humedad de la bala pesada en verde tiene un valor medio del 50%. La bala seca al aire tiene una humedad inferior al 18%. Los cargaderos de balas estaban expuestos a los vientos y a altas insolaciones, por lo que se alcanzaron humedades inferiores al 18% en menos de dos semanas desde la generación de la bala. De acuerdo a la metodología descrita, la humedad de la bala que se utilizó es la medida en el exterior, por lo que su humedad en el interior cabría esperar que fuera mayor. No se consiguió un valor medio de humedad seca al aire, sino un valor umbral, porque el higrómetro que se utilizó tenía un intervalo para su buen funcionamiento del 15% al 65% de humedad. A falta de mayor exactitud, se considera el 18% de humedad como valor medio más aproximado de la bala seca al aire.

| | |
|--|--------------|
| PESO MEDIO BALA SECA AL AIRE (kg) | 264 |
| DENSIDAD APARENTE SECA AL AIRE (kg/m ³) | 193 |
| DENSIDAD ESPECÍFICA SECA AL AIRE (kg/m ³) | 482 |
| COEFICIENTE DE EMPACADO (m ³ residuo/m ³) | 0,4 |
| PODER CALORÍFICO SUPERIOR EN BASE HÚMEDA (Humedad = 43%) (kcal/kg) | 2.738 |

Tabla 17: II Características medias de las balas

El coeficiente de empacado, que expresa el volumen ocupado por residuo respecto al volumen aparente de la bala, se calcula como el cociente de la densidad aparente entre la densidad específica.

Los datos de las características de las balas producidas en el ensayo en Finlandia por Kärhä y Vartiamäki (2006), con WoodPac y *Picea abies* L. Karst., presentaron valores similares. El volumen aparente de la bala es algo menor, 1,3 m³, por tener un diámetro de 73 cm. La densidad específica mediade la bala es de 760 kg/m³ y el peso es de 328 kg para una humedad del 39%, siendo valores distintos de los ensayos en Filabres por que se obtuvieron a partir de humedades distintas. También formularon la siguiente expresión:

$$[11] \quad Y = - 40,8058 + 372,9928 X_1 - 9,9749 X_2 + 0,2064 X_2^2$$

siendo Y = peso de la bala en kg

X_1 = volumen aparente de la bala en m³

X_2 = humedad en %

Según esta expresión, con un volumen aparente de 1,37 m³ y un 50% de humedad, el peso verde la bala es de 488 kg, que es similar al obtenido en los ensayos en Filabres. Si bien, esta fórmula no se puede aplicar para humedades bajas, puesto que arroja mayores pesos al disminuir la humedad del 22%. Por lo que no se puede comparar con los pesos obtenidos de la bala seca al aire.

El coeficiente de empacado calculado por Kärhä y Vartiamäki (2006) es de 0,43. Este parámetro no depende tanto de la humedad, considerando que no se alcanzan humedades muy bajas que hagan perder elasticidad a las ramas, y sí es más determinante la capacidad de compresión de la empacadora, por este motivo el coeficiente es similar al 0,4 obtenido en Filabres. Las otras empacadoras estudiadas por Kärhä y Vartiamäki (2006), tienen unos valores de coeficiente de empacado de 0,5 para Fiberpac y de 0,37 para Pika.

El contenido energético de la bala para una humedad del 43% es de 3,18 kWh/kg (2.738 kcal/kg). Según la fórmula de Kärhä y Vartiamäki (2006), para un 43% de humedad la bala pesaría 425 kg,

por lo que contendría 1,35 MWh. El valor medio hallado por Kärhä y Vartiamäki (2006) en las balas producidas por la empacadora WoodPac es menor, 0,97 MWh, para una humedad del 39%.

Al considerar las condiciones medias de las balas a su entrada en fábrica, peso de 264 kg con una humedad del 18%, el poder calorífico superior en base húmeda (PCSh) se calculó mediante la fórmula de Nierat, que hace intervenir el contenido en agua en tanto por ciento de la materia verde.

$$[12] \quad PCSh = PCSo \times \frac{100 - E}{E} - 6E$$

siendo H = humedad en tanto por uno

$$E = 100 * H / (1 + H)$$

$$PCSo \text{ (poder calorífico superior en base seca)} = 4.184 \text{ kcal/kg}$$

El PCSo se calculó de la fórmula de Nierat y con un PCSh y H conocido. El PCSh para una humedad del 18% sería de 3.454 Kcal/kg ó 4,01 kWh/kg, por lo que el contenido energético de una bala es 1,06 MWh, 0,77 MWh/m³ aparente ó 1,93 MWh/m³ sólido. Andersson *et ál.* (2000) utiliza el factor de conversión de 0,8 MWh/m³ aparente, que es un valor cercano al calculado en los ensayos de Filabres.



Foto 36: Almacenado de balas en fábrica

Una de las características fundamentales del residuo empacado, y que le confiere ventajas respecto a otros sistemas de aprovechamiento como el astillado, es la capacidad de almacenamiento durante grandes periodos de tiempo sin perder sus características fundamentales (Lehtikangas *et ál.*, 1997). En Suecia las balas permanecieron durante 6 meses almacenadas

al descubierto (Andersson *et ál.*, 2000). Otro estudio realizado en Reino Unido (FCA, 2000) se analizaron datos de humedad, poder calorífico y materia seca de balas almacenadas al cabo de

12 meses sin apreciar diferencias significativas. Según Johansson *et ál.* (2006) al cabo de un año la pérdida de tensión en las cuerdas de plástico (polipropileno) de las balas fue sólo de un 20%.

2.2.1.1 Análisis granulométrico

El contenido de la bala se separó en dos fracciones: gruesa y fina. La fracción fina suponía un 25% del peso total de la bala, mientras que un 75% correspondía a la fracción gruesa. Ambas fracciones estaban constituidas por acículas, corteza, secciones de rama fina y gruesa y astilla. En el caso de la fracción gruesa se separaron, lo que permitió calcular el porcentaje en peso de cada parte.

| | FRACCIÓN FINA (25%) | FRACCIÓN GRUESA (75%) | |
|--------------------|--|---|-------|
| Acículas | Sí | Sí | 3,1% |
| Corteza | Sí | Sí | 6,5% |
| Rama fina | Diámetro: < 0,5 mm Longitud: < 25 mm | Diámetro: < 5,5 mm Longitud: < 60 mm | 14,2% |
| Rama gruesa | No | Diámetro: 6 - 14 mm Longitud: < 60 mm | 7,2% |
| Astilla | Anchura: < 0,5 mm Longitud: < 15 mm Grosor: < 0,2 mm | Anchura: 10 - 20 mm Longitud: 20 - 40 mm Grosor medio: 3 mm | 69% |

Tabla 18: Resultados de análisis granulométrico



Foto 37: Componentes de fracción gruesa de bala astillada

Para su uso en la industria del tablero sólo sería apta la rama gruesa y la astilla de la fracción gruesa. De esta forma, cabe considerar que un 57% en peso del contenido de la bala se podría destinar a la industria del tablero y el residuo selvícola, 43%, se utilizaría como biocombustible.

2.3 Residuo desprendido y no recogido. Análisis de nutrientes.

El ensayo efectuado con las 10 balas generó los siguientes valores:

| | RESIDUO EMPACADO | RESIDUO DESPRENDIDO |
|--|---------------------|------------------------|
| PORCENTAJE DE RESIDUOS | 68 % | 32 % |
| VALOR MEDIO POR BALA (kg) | 503,89 | 240,69 |
| DESVIACIÓN TÍPICA | 34,17 | 33,53 |
| ERROR TÍPICO | 10,68 | 10,48 |
| ERROR RELATIVO (nivel de confianza=0,95) | 4,24% | 8,71% |

Tabla 19: Resultados de residuo desprendido en el empacado

De las 10 balas producidas en el ensayo, se establece que un 32% del residuo recogido (Rr) es devuelto al monte como residuo desprendido (Rd) desmenuzado. El porcentaje del Rd respecto al residuo empacado (B), denominado coeficiente de pérdidas de residuos en el empacado (Pe) es de 0,47.



Foto 38: Residuo empacado y desprendido

Para el cálculo de cada tipo de residuo en los ensayos se hacen los siguientes cálculos, expresándolos en toneladas verdes:

$$[13] \quad B = n^{\circ} \text{ balas} * \text{ peso verde de la bala (Pb)}$$

$$[14] \quad Rd = Pe * B$$

$$[15] \quad Rr = B + Rd$$

$$[16] \quad Rnr = Rg - Rr$$

$$[17] \quad \text{Eficiencia en la recogida (Er)} = Rr / Rg$$

| | Rg (t) | B (t) | Rd (t) | Rr (t) | Rnr (t) | Er |
|------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|-------------|
| EPP | 51,91 | 28,91 | 13,60 | 42,51 | 9,40 | 0,82 |
| EMP | 12,18 | 7,35 | 3,46 | 10,81 | 1,37 | 0,89 |
| ECN | 295,60 | 174,44 | 82,09 | 256,53 | 39,07 | 0,87 |

Tabla 20: Cantidades de residuos y eficiencia en la recogida

La menor eficiencia en la recogida corresponde al ensayo de empacado a pie de pista porque la manipulación del residuo selvícola fue mayor al sacarse éste con el autocargador. Además, la grapa del autocargador que desembosca el residuo selvícola tiene una geometría más desfavorable para la recogida que la de la empacadora, lo que motiva que la eficiencia sea aún menor. Esta eficiencia depende de la geometría de la grapa de la grúa, la pericia del maquinista y la disposición del residuo selvícola en la pila.

2.3.1 Análisis de nutrientes

Los resultados del análisis de los nutrientes en los residuos selvícolas se presentan en la siguiente tabla expresados en valores medios:

| | Humedad | Materia Orgánica | Nitrógeno | Fósforo | Magnesio | Calcio | Potasio | Sulfatos |
|-----------|---------|------------------|-----------|---------|----------|--------|---------|----------|
| | % | % | % | % | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg |
| Rg | 44,0 | 96,97 | 0,39 | <0,10 | 1.076 | 3.661 | 3.333 | 85 |
| Rd | 43,3 | 96,06 | 0,58 | 0,12 | 1.183 | 4.339 | 3.934 | 114 |
| B | 43,3 | 96,93 | 0,58 | <0,10 | 1.084 | 4.176 | 3.414 | 200 |

Tabla 21: Concentración de nutrientes en residuos

Las concentraciones de nitrógeno y sulfatos en el residuo empacado arrojan valores más altos de lo esperado al compararlos con las concentraciones del residuo desprendido y suelto. La toma de muestras del residuo empacado se realizó extrayendo material de las balas formadas, por lo que la representatividad de estas muestras es cuestionable debido a la heterogeneidad de la bala.

El porcentaje de nutrientes que permaneció en el monte sería el siguiente:

| | | Materia Orgánica | Nitrógeno | Fósforo | Magnesio | Calcio | Potasio | Sulfatos |
|------------|--------------------|------------------|-----------|---------|----------|--------|---------|----------|
| EMP | % _{[N]Rd} | 28% | 43% | 56% | 31% | 34% | 34% | 38% |
| | % _{[N]m} | 39% | 54% | 67% | 42% | 45% | 45% | 49% |
| ECN | % _{[N]Rd} | 28% | 42% | 55% | 31% | 33% | 33% | 37% |
| | % _{[N]m} | 41% | 55% | 68% | 44% | 46% | 46% | 50% |

Tabla 22: Porcentajes de nutrientes en residuo no extraído

En el EPP sólo permaneció en el monte el residuo no recogido (Rnr), que era un 18% del residuo generado (Rg) y, considerando que la concentración de nutrientes en el Rg y en el Rnr era la misma, el porcentaje de aporte de nutrientes en este ensayo sería del 18%.

El pequeño tamaño de los fragmentos del Rd, de dimensiones (largo, ancho y grueso) inferiores a 5 mm, facilitaría su descomposición para incorporarse al suelo frente a los residuos de ramas no recogidos de mayores dimensiones.



Foto 39: Residuo desprendido

3 ANÁLISIS DE LA EMPACADORA

3.1 Descripción del ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo de la empacadora estudiada se corresponde con el proceso de formación de una bala, denominado ciclo de empacado, más las operaciones complementarias diarias de funcionamiento de la empacadora, que son dos:

- Calentamiento: corresponde al periodo inicial diario de puesta en marcha y preparación de la empacadora para comenzar el trabajo.
- Posicionamiento en calle: son los desplazamientos que realiza diariamente desde el lugar donde aparca hasta la calle para comenzar los trabajos y, al finalizar éstos, hasta el lugar de aparcamiento.

El ciclo de empacado comienza cuando la empacadora se desplaza por las calles y se para junto a varias pilas de residuos selvícolas. El maquinista pone en funcionamiento los rodillos de la empacadora y gira el asiento 180° para encararse con ella. Con la grúa empieza a recoger el residuo selvícola de las pilas, que suelta por la parte superior de la empacadora. Una vez recogido todo el residuo selvícola de las pilas al alcance de la grúa, el maquinista coloca la grúa por encima de la empacadora en posición de reposo y gira el asiento hacia delante para desplazarse hasta las siguientes pilas de residuos. El funcionamiento de la cámara de empacado es continuo y consiste en una cámara de compresión formada por siete rodillos, seis de ellos motores, que mediante su giro originan una resultante interior levógira. Esta rotación provoca un efecto «alud» que enreda los residuos entre sí y realiza el empacado, mientras la parte móvil de la cámara efectúa una carga de compresión. Cuando la fuerza de compresión interna de los residuos selvícolas supera la compresión ejercida por la cámara, se suspende la alimentación y seis inyectores introducen un extremo de hilo en la masa. Esta penetración inicial asegura

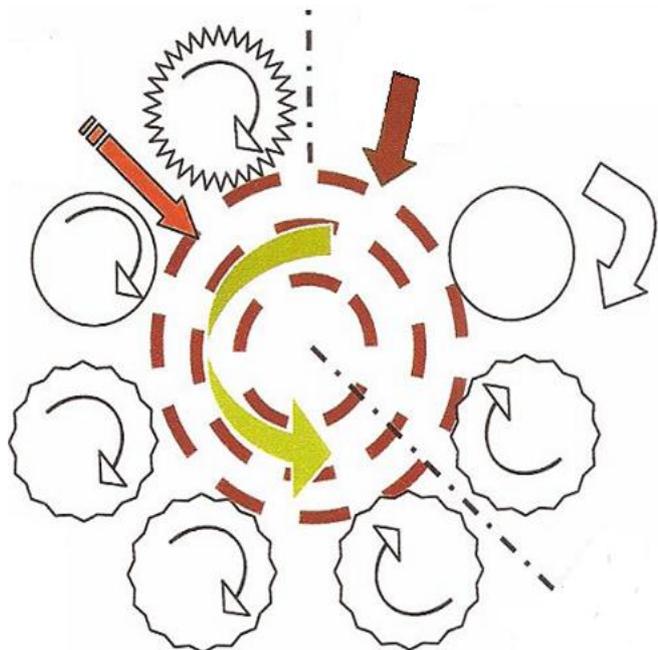


Ilustración 2: Cámara de empacado

que la masa de residuo selvícola arrastre el hilo en su giro. Una vez ocurrido esto, se abre la cámara y la bala cae al suelo, con lo que desaparece la presión sobre la bala y ésta se expande y tensa el hilo enrollado a su alrededor.

Este ciclo de empacado se puede dividir en tres fases temporales:

1. Desplazamiento: descrito por el movimiento del autocargador a lo largo de la calle entre los puntos de parada de recogida del residuo selvícola.
2. Alimentación: corresponde a la recogida del residuo selvícola. El movimiento de la grúa o ciclo de la grúa se puede diferenciar en dos procesos consecutivos y repetitivos:
 - a. Recogida del residuo selvícola: comprendida por el desplazamiento de la grúa hacia el residuo selvícola (en vacío) y la empacadora (en carga), y los movimientos de la grapa para captura del residuo selvícola.
 - b. Suelta de los residuos selvícolas por la parte superior de la empacadora.
3. Atado y descarga de la bala. A diferencia de los tiempos de desplazamiento y de alimentación, es el único movimiento no repetitivo en el ciclo de empacado.



Foto 40: Sistema de inyección de hilo

3.2 Análisis de producción de la empacadora WoodPac

El análisis de producción de la empacadora Valmet WoodPac comprende el estudio de sus rendimientos en los ensayos efectuados en función de la metodología de toma de datos descrita.

3.2.1 Distribución de tiempos y coeficiente de efectividad

La distribución de tiempos está construida a partir de los datos tomados en los partes diarios.

Los tiempos se expresan en minutos.

| | Tiempo de actividad (TA) | Tiempo de control (TC) | Tiempo de trabajo (TT) | | | Tiempo no operativo (TNO) | | |
|----------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---|
| | | | TT | Tiempo de trabajo productivo (TTP) | Tiempo de trabajo indirecto (TTI) | TNO | Tiempo de interrupción (TInterrup) | Tiempo de demora relacionada con el trabajo (TDT) |
| Día 1 | 300 | 640 | 300 | 190 | 110 | 340 | | 340 |
| Día 2 | 690 | 820 | 690 | 381 | 309 | 130 | | 130 |
| Día 3 | 630 | 820 | 630 | 445 | 185 | 190 | | 190 |
| Día 4 | 660 | 820 | 660 | 422 | 238 | 160 | | 160 |
| Día 5 | 690 | 820 | 658 | 183 | 475 | 162 | | 162 |
| Día 6 | 660 | 700 | 600 | 184 | 416 | 100 | | 100 |
| Día 7 | 510 | 640 | 495 | 317 | 178 | 145 | | 145 |
| Día 8 | 660 | 700 | 600 | 464 | 136 | 100 | | 100 |
| Día 9 | 630 | 760 | 510 | 439 | 71 | 250 | | 250 |
| Día 10 | 510 | 730 | 510 | 451 | 59 | 220 | 45 | 175 |
| Día 11 | 580 | 820 | 580 | 490 | 90 | 240 | 110 | 130 |
| Día 12 | 630 | 820 | 620 | 570 | 50 | 200 | | 200 |
| Día 13 | 540 | 700 | 530 | 290 | 240 | 170 | | 170 |
| Día 14 | 555 | 760 | 545 | 489 | 56 | 215 | 45 | 170 |
| Día 15 | 720 | 880 | 720 | 120 | 600 | 160 | | 160 |
| Día 16 | 440 | 760 | 440 | 255 | 185 | 320 | 160 | 160 |
| Día 17 | 570 | 760 | 570 | 389 | 181 | 190 | | 190 |
| Día 18 | 750 | 880 | 750 | 341 | 409 | 130 | | 130 |
| Día 19 | 150 | 170 | 142 | 142 | 0 | 28 | | 28 |
| TOTALES | 10.875 | 14.000 | 10.550 | 6.562 | 3.988 | 3.450 | 360 | 3.090 |

Tabla 23: Distribución general de tiempos

El tiempo de control o presencia se distribuye en un 75% para el tiempo de trabajo (TTP + TTI) y un 25% para el tiempo de trabajo no operativo. El promedio de TA diario, exceptuando el primer y último día, en que no se trabajó a jornada completa, es de 613 minutos, aproximadamente unas 10 horas.

DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS RESPECTO AL TIEMPO DE CONTROL

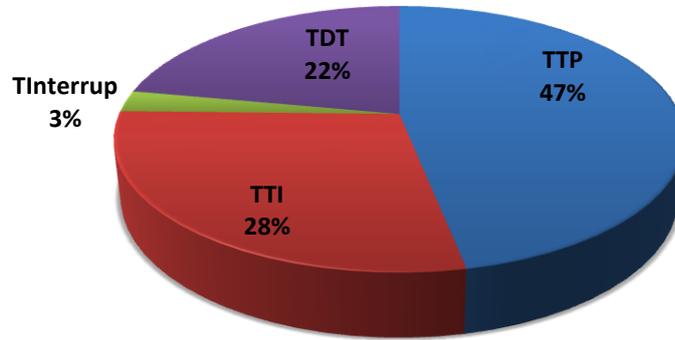


Gráfico 10: Distribución de tiempos respecto al tiempo de control

El TNO se reparte en un 22% referido a lo tiempos de almuerzo del maquinista, y un 3% a tiempos de interrupción por visitas para ver los trabajos.

La distribución porcentual de los tiempos respecto al tiempo de actividad de los ensayos se presenta en el siguiente gráfico. De acuerdo a la fórmula planteada para el cálculo del tiempo de actividad.

DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS RESPECTO AL TIEMPO DE ACTIVIDAD

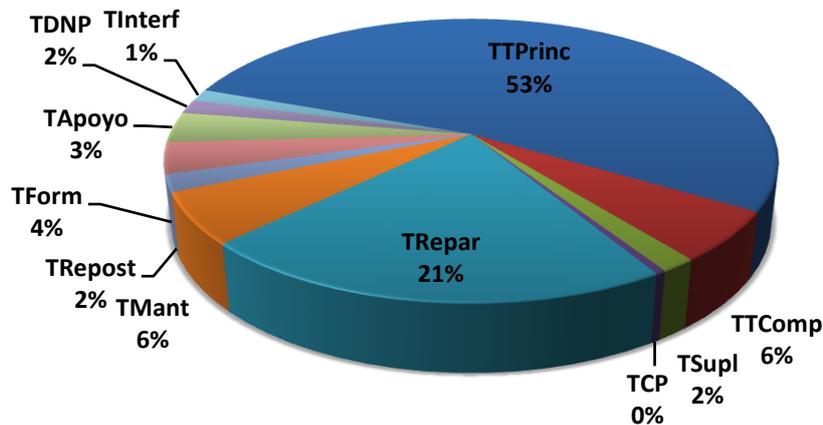


Gráfico 11: Distribución de tiempos respecto al tiempo de actividad de los ensayos

Dentro del TA la mayor parte del tiempo está dedicado al ciclo de empaçado, tal y como muestra el TTPrinc o TEe. El coeficiente de efectividad en los ensayos representa un 53%. El tiempo de reparación supone un 21% del TA en los ensayos, lo que representa un valor elevado por el uso de una máquina desconocida como es la empaçadora. Este desconocimiento incide en dos



Foto 41: Parada para reparación

factores, por un lado, la previsión de tener repuestos de piezas con mayor probabilidad de averías y por otro lado, conocer los límites de funcionamiento de la empaçadora en las condiciones extremas de trabajo. Por estos motivos las mayores pérdidas de tiempo por averías se debieron a la reparación de latiguillos

internos de la grúa y al calentamiento de la máquina, que obligaba a hacer paradas para enfriar el circuito hidráulico.

En el estudio realizado por Kärhä y Vartiamäki (2006) los tiempos no efectivos de trabajo se referían a mantenimiento, mal funcionamiento de la máquina y demoras por llamadas de teléfono. El tiempo efectivo de trabajo resultaba un 41% del tiempo de trabajo con interrupciones menores de 15 minutos, valor que los autores consideraron bajo y por lo que propusieron mejoras para el aumento de la efectividad. Según Cuchet *et ál.* (2004) en el estudio realizado con la empaçadora Fiberpac el tiempo efectivo de trabajo era del 78%. El coeficiente de efectividad en el trabajo anual de una máquina forestal debería estar por encima del 75% para obtener unos resultados adecuados.

Si el tiempo de actividad anual fuera de 1.800 horas y la efectividad del 78%, esto supondría 1.404 hte/año. Al suponer también una jornada laboral óptima de ocho horas y, por lo tanto, 225 días de actividad al año, el número de horas efectivas de trabajo diarias sería 6,24, es decir, 375 minutos efectivos. Al representar la evolución temporal diaria del TEe y el coeficiente de efectividad (encima de las columnas) en los ensayos, se puede comprobar que se superan los

375 minutos efectivos en siete días de los 19 de duración. También se supera el coeficiente de efectividad del 78%, en tres días.

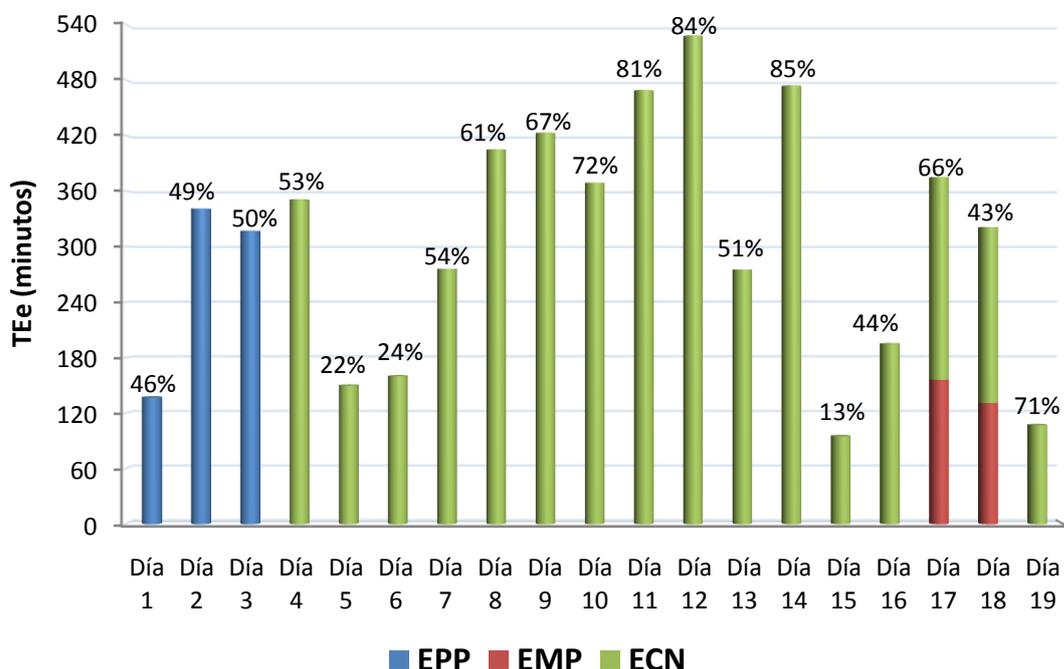


Gráfico 12: Evolución del tiempo efectivo de empacado y coeficiente de efectividad en los ensayos

3.2.1.1 Ensayo a pie de pista (EPP)

La distribución de tiempos para el ensayo a pie de pista se realizó con los tres días de trabajo efectuados. En la tabla se representan solamente los tiempos pertenecientes al tiempo de actividad (TA), que se expresan en minutos y no indican los tiempos con valor nulo.

| | TIEMPO DE ACTIVIDAD (TA) | Tiempo de trabajo principal (TTPrin) | Tiempo de trabajo complementario (TComp) | Tiempo de trabajo suplementario (TTSupl) | Tiempo de reparación (TRepar) | Tiempo de mantenimiento (TMant) | Tiempo de repostaje (TRepost) | Tiempo de formación (TForm) |
|----------------|--------------------------|--------------------------------------|--|--|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Día 1 | 300 | 137 | 38 | 15 | | 40 | 10 | 60 |
| Día 2 | 690 | 341 | 30 | 10 | 260 | 13 | 10 | 26 |
| Día 3 | 630 | 317 | 45 | 83 | 45 | 40 | 15 | 85 |
| TOTALES | 1.620 | 795 | 113 | 108 | 305 | 93 | 35 | 171 |

Tabla 24: Distribución de tiempos de empacado en EPP

En este caso el tiempo de actividad es igual al tiempo de trabajo, puesto que no se registran tiempos de necesidades personales ni de interferencia. El tiempo de actividad en el EPP representa un 71% del tiempo de control. El tiempo de trabajo productivo en este caso representa el 63% del tiempo de trabajo o de actividad frente al tiempo de trabajo indirecto, que es del 37%.

DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS RESPECTO AL TIEMPO DE ACTIVIDAD EN EPP

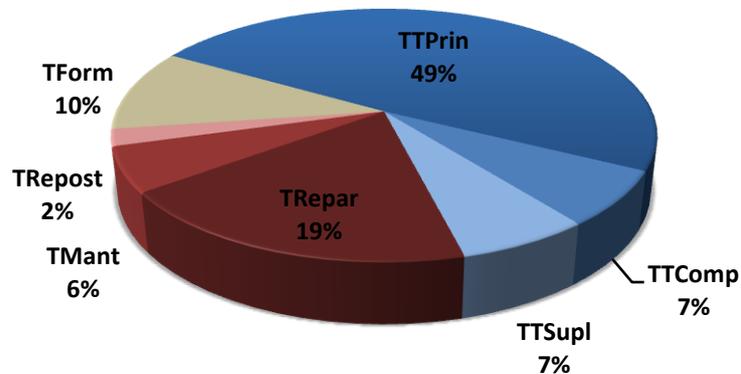


Gráfico 13: Distribución porcentual de tiempos respecto al tiempo de actividad en EPP

Al ser el primer ensayo que se realizó, la falta de experiencia se muestra en los valores de dos tiempos: TForm, un 10% dedicado básicamente a dar instrucciones al maquinista para la correcta realización del trabajo, y TSupl, un 7% dedicado a colocar los residuos de la pila en mejor disposición. Además, el segundo día ocurrió la primera avería con un tiempo de reparación de más de cuatro horas, debido a la rotura de un latiguillo de la grúa. En condiciones normales, una reparación de este tipo no debería haber llevado mucho tiempo, pero al no tener repuestos adecuados de material se tuvieron que realizar más operaciones. Estos tres tiempos que representan un 36% (10+7+19) del tiempo de actividad no deberían ocurrir con mayor experiencia en el trabajo de la empacadora, pudiendo conseguir un aumento en la efectividad del 49% al 75%.

3.2.1.2 Ensayo por curvas de nivel (ECN)

La distribución de tiempos para el ensayo por curvas de nivel se realizó con los 16 días de trabajo efectuados. Éste fue el ensayo con mayor superficie de trabajo y por lo tanto de mayor duración. Los tres últimos días presentan menor tiempo de actividad (TA) porque en los días 17 y 18 se realizó también el ensayo de máxima pendiente y el día 19 corresponde a la finalización de los trabajos de la empacadora en la Sierra de Los Filabres ejecutándose la pequeña parte que quedó marcada para ese día, antes de preparar la máquina para su traslado fuera de Andalucía. En la tabla se representan solamente los tiempos pertenecientes al tiempo de actividad (TA), que se expresan en minutos y no indican los tiempos con valor nulo.

| | TA | TTPrin | TTComp | TTSupl | TCP | TRepar | TMant | TRepost | TForm | TApooyo | TDNP | TInterf |
|----------------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Día 4 | 660 | 351 | 71 | | | 90 | 30 | 10 | 108 | | | |
| Día 5 | 690 | 150 | 33 | | | 450 | | 10 | 15 | | | 32 |
| Día 6 | 660 | 160 | 24 | | | 360 | 40 | | 16 | | 60 | |
| Día 7 | 510 | 276 | 41 | | | 110 | 40 | 10 | 18 | | 15 | |
| Día 8 | 660 | 405 | 46 | 13 | | 101 | 25 | | 10 | | 60 | |
| Día 9 | 630 | 423 | 16 | | | 20 | 30 | 11 | 10 | | | 120 |
| Día 10 | 510 | 369 | 67 | 15 | | 4 | 25 | 20 | 10 | | | |
| Día 11 | 580 | 469 | 21 | | | 17 | 30 | 33 | 10 | | | |
| Día 12 | 630 | 528 | 28 | 14 | | 10 | 30 | 10 | | | 10 | |
| Día 13 | 540 | 275 | 15 | | | | 230 | 10 | | | 10 | |
| Día 14 | 555 | 474 | 15 | | | 14 | 12 | 20 | 10 | | 10 | |
| Día 15 | 720 | 95 | 25 | | | 600 | | | | | | |
| Día 16 | 440 | 195 | 35 | 25 | | 30 | 20 | 10 | | 125 | | |
| Día 17 | 330 | 219 | | | 40 | 30 | 30 | 11 | | | | |
| Día 18 | 270 | 190 | | | | 60 | | 20 | | | | |
| Día 19 | 150 | 107 | 35 | | | | | | | | 8 | |
| TOTALES | 8.535 | 4.686 | 472 | 67 | 40 | 1.896 | 542 | 175 | 207 | 125 | 173 | 152 |

Tabla 1: Distribución de tiempos de empaqueo en ECN

El tiempo de actividad en el ECN representa el 78% del tiempo de control.

DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS RESPECTO AL TIEMPO DE ACTIVIDAD EN ECN

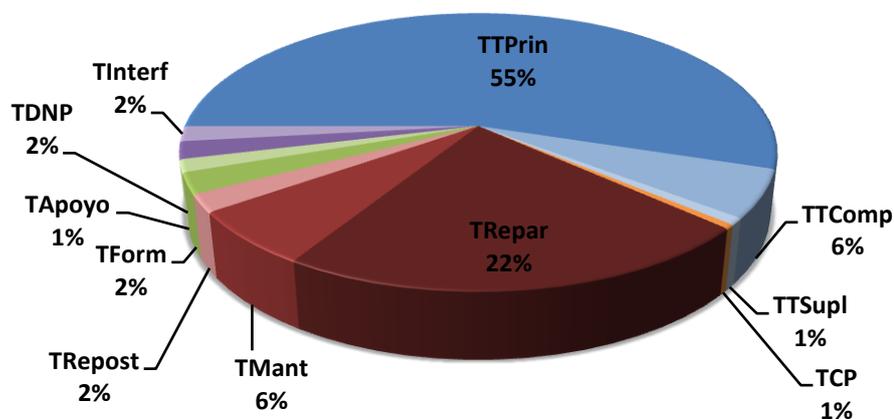


Gráfico 14: Distribución porcentual de tiempos respecto al tiempo de actividad en ECN

El tiempo de trabajo productivo representa el 62% del tiempo de actividad, frente al tiempo de trabajo indirecto que es del 34%. El tiempo no operativo es el 4% del tiempo de actividad. El TEE o TTPrin es mayor que en el EPP debido a que la evolución en el aumento de conocimiento de los trabajos motiva una mayor dedicación al tiempo de empaquetar el residuo selvícola. Este hecho también provoca la reducción del tiempo de formación. Pero el desconocimiento y la falta de adaptación de la empacadora a las condiciones de trabajo motivan el 22% del TA en reparaciones. Por ser este ensayo el de mayor duración, en él aparecen algunos tiempos de menor cuantía que no se dan en los otros, como el TInterf ocasionado por las esperas para la

ampliación de calles (2%), el TCP para traslado a otra zona de ensayo (1%) y el TDNP, que corresponde fundamentalmente a almuerzos en el lugar de trabajo (2%) que no se contabilizarían dentro del TA si ocurrieran fuera del lugar de trabajo como la mayoría de los días. La reducción en el tiempo de reparaciones y la eliminación de tiempos como TInterf, TCP, TDNP y TApoyo conllevaría a obtener una efectividad por encima del 75%.

3.2.1.3 Ensayo por máxima pendiente (EMP)

El ensayo de máxima pendiente se realizó en dos días de trabajo y de forma complementaria al ensayo por curvas de nivel (ECN). Al ser la superficie de trabajo pequeña en este ensayo, los tiempos de actividad también son bajos. En la tabla se representan solamente los tiempos pertenecientes al tiempo de actividad (TA), que se expresan en minutos y no indican los tiempos con valor nulo.

| | TA | TTPrin | TTComp | TCP | TRepar | TForm | TApoyo |
|----------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|
| Día 17 | 240 | 156 | 14 | 10 | 60 | | |
| Día 18 | 480 | 131 | 20 | | 64 | 10 | 255 |
| TOTALES | 720 | 287 | 34 | 10 | 124 | 10 | 255 |

Tabla 26: Distribución de tiempos de empackado en EMP

En este caso el tiempo de actividad es igual al tiempo de trabajo, puesto que no se registran tiempos de necesidades personales ni de interferencia. El tiempo de actividad en el EMP representa un 95% del tiempo de control. Este porcentaje es elevado debido al poco tiempo de duración de este ensayo, en el que no se produjeron tiempos no operativos.

DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS RESPECTO AL TIEMPO DE ACTIVIDAD EN EMP

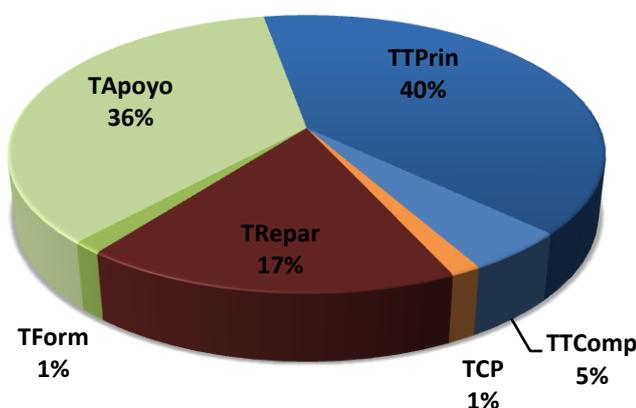


Gráfico 15: Distribución porcentual de tiempos respecto al tiempo de actividad en EMP



Foto 42: Empacado en máxima pendiente

El tiempo de trabajo productivo representa en este caso el 45% del tiempo de trabajo o de actividad frente al tiempo de trabajo indirecto, que es del 65%. El elevado TApoyo (36%) corresponde a las labores de saca de madera realizadas con la empacadora por no poderlas realizar el autocargador. El TTPrin o TEe incluye desplazamientos excepcionales de la empacadora para soltar la bala en lugar accesible al autocargador al inicio de la calle, debido que éste no pudo transitar por toda la calle. Las averías producidas en este ensayo se debieron al calentamiento de la máquina por el sobreesfuerzo necesario para el enfriamiento del circuito hidráulico. Estas averías se podrían subsanar sobredimensionando la bomba hidráulica para conseguir un aumento del caudal de aceite.

El tiempo de trabajo productivo representa en este caso el 45% del tiempo de trabajo o de actividad frente al tiempo de trabajo indirecto, que es del 65%. El elevado TApoyo (36%) corresponde a las labores de saca de madera realizadas con la empacadora por no poderlas realizar el autocargador.

3.2.2 Rendimientos

En este apartado se presentan los rendimientos medios de los ensayos, así como su evolución temporal.

| | RENDIMIENTO EFECTIVO ENSAYOS (balas/hte) | RENDIMIENTO ENSAYOS (balas/h) | COEFICIENTE DE EFECTIVIDAD Cee |
|-----|--|-------------------------------|--------------------------------|
| EPP | 4,45 | 2,19 | 0,49 |
| ECN | 4,56 | 2,50 | 0,55 |
| EMP | 3,14 | 1,25 | 0,40 |

Tabla 27: Rendimientos y coeficientes de efectividad en ensayos

La producción de la empacadora WoodPac en el estudio de Andersson *et ál.* (2000) y de Öhlund (2003) es de 18-20 balas/hte, y 15 balas/E₁₅ (E₁₅ = tiempo de trabajo con demoras menores de 15 minutos). En el estudio de Kärhä y Vartiamäki (2006) es de 9 a 14 balas/E₁₅, coincidiendo con Timperi (2003) en que los factores más importantes en la productividad de la empacadora, y en este orden, son el maquinista, el tiempo efectivo de trabajo y las condiciones en las que se

encuentra apilado el residuo selvícola suelto. De hecho, la productividad de la empacadora Fiberpac varía de 13 a 26 balas/E₁₅ en función del maquinista y puede disminuir la productividad hasta un 20% si los residuos están mal apilados (Kärhä y Vartiamäki, 2006). En el cálculo de tiempos y costes de los sistemas de aprovechamientos forestales la experiencia del maquinista es un factor decisivo en la productividad de la maquinaria (Purfürst, 2006). Las empacadoras WoodPac y Pika tienen producciones menores que Fiberpac (Kärhä y Vartiamäki, 2006). Además de las diferencias en los maquinistas y la experiencia en aprovechamientos forestales con maquinaria de alta tecnología, en la comparación de producciones entre estos estudios y los de la Sierra de Los Filabres, hay que destacar la diferencia en las condiciones y sistema de trabajo. En los estudios nórdicos se trabajó con pendiente cero o muy baja y el tránsito de la maquinaria no es una inconveniente por trabajar en cortas a hecho o por calles rectas con anchura superior a 5 metros.

3.2.2.1 Ensayo a pie de pista (EPP)

El EPP presentaba las mejores condiciones para conseguir los valores más altos de producción, puesto que la empacadora no se desplazaba por calles y tenía todo el residuo selvícola apilado a pie de pista.

| | NÚMERO DE BALAS (Balas) | PRODUCCIÓN EFECTIVA (Balas/hte) | COEFICIENTE DE EFECTIVIDAD (Cee) |
|----------------|----------------------------|---------------------------------------|--|
| Día 1 | 18 | 7,88 | 0,46 |
| Día 2 | 22 | 3,87 | 0,49 |
| Día 3 | 19 | 3,60 | 0,50 |
| TOTALES | 59 | 4,45 | 0,49 |

Tabla 28: Resultados de producción en EPP

La producción efectiva el primer día es casi el doble que la obtenida los otros dos días. Esto se debe a que el primer día el operario que trabajó con la empacadora era un maquinista experto en autocargadores, distinto del que trabajó el resto de los días de ensayo, que tenía poca experiencia en el uso de maquinaria forestal. El primer día el tiempo efectivo de empacado fue bajo con respecto a la media, lo que también favoreció el aumento del rendimiento. Los otros dos días del ensayo mantuvieron una producción similar, incluso esta producción se mantuvo en el primer día del ECN, cuando cabía esperar una reducción en la producción al cambiar desfavorablemente las condiciones del trabajo. Además de los condicionantes mencionados anteriormente, este hecho puede explicarse por un factor que incidió en la duración del trabajo en el EPP. El residuo selvícola apilado a pie de pista se encontraba en grandes pilas en las que se



Foto 43: Apilado de residuo generado en EPP

perdía la orientación común de las ramas, que incluso llegaban a entremezclarse, lo que originó una pérdida de tiempo inesperada.

A pesar del escaso tiempo de trabajo de la empacadora en este ensayo se pueden destacar dos factores muy importantes que se ponen de manifiesto y que son: el maquinista y la disposición de los residuos en las pilas.

3.2.2.2 Ensayo por curvas de nivel (ECN)

La parcela del ECN está situada en una zona distinta a las otras dos parcelas de ensayos, que se diferencian básicamente por la menor cantidad de residuo selvícola y el desplazamiento por calles con pendiente media. La parcela del ECN se encuentra en una ladera donde aumenta la pendiente conforme se desciende por ella. El diseño de los ensayos de trabajar de menor a mayor dificultad respecto a las condiciones del terreno impuso que se comenzase a empacar por la parte más alta de la ladera y se fuese descendiendo, con lo que la pendiente iba aumentando en el transcurso del ensayo.



Foto 44: Empacado en ECN

Por lo tanto, cabía esperar un descenso de la producción, pero ocurrió lo contrario. Dado que la producción estaba condicionada por la experiencia del maquinista, los rendimientos efectivos en los ensayos fueron distintos de los que cabría esperar.

| | NÚMERO DE BALAS (Balas) | PRODUCCIÓN EFECTIVA (Balas/hte) | COEFICIENTE DE EFECTIVIDAD (Cee) |
|----------------|------------------------------------|--|---|
| Día 4 | 22 | 3,76 | 0,53 |
| Día 5 | 14 | 5,60 | 0,22 |
| Día 6 | 11 | 4,13 | 0,24 |
| Día 7 | 16 | 3,48 | 0,54 |
| Día 8 | 24 | 3,56 | 0,61 |
| Día 9 | 19 | 2,70 | 0,67 |
| Día 10 | 25 | 4,07 | 0,72 |
| Día 11 | 34 | 4,35 | 0,81 |
| Día 12 | 39 | 4,43 | 0,84 |
| Día 13 | 26 | 5,67 | 0,51 |
| Día 14 | 47 | 5,95 | 0,85 |
| Día 15 | 10 | 6,32 | 0,13 |
| Día 16 | 18 | 5,54 | 0,44 |
| Día 17 | 20 | 5,48 | 0,66 |
| Día 18 | 20 | 6,32 | 0,70 |
| Día 19 | 11 | 6,17 | 0,71 |
| TOTALES | 356 | 4,56 | 0,55 |

Tabla 29: Resultados de producción en ECN

La experiencia del maquinista aumentaba conforme avanzaba el tiempo de trabajo y por ello el rendimiento efectivo se incrementó. Los seis primeros días del ensayo, que corresponden a los primeros días de trabajo empacando a pie de tocón, presentaron una variabilidad del rendimiento efectivo y unos valores alejados de lo esperado. El rendimiento efectivo en los seis primeros días fue bajo, excepto en el día 5 y 6 que se registraron valores más altos debido al poco tiempo efectivo diario de empacado. Como es lógico, la experiencia del maquinista es el parámetro que más influyó en el rendimiento de los primeros días. Este hecho se hace notar al mostrar en una gráfica los valores de rendimiento efectivo diario a partir del día 10, de tal forma que la evolución puede venir representada por una tendencia exponencial con un valor de $R^2 = 0,787$. Aunque la línea de tendencia que se mejor se ajusta a los valores obtenidos es la potencial, cabe pensar que la evolución temporal del rendimiento de la empacadora en unas mismas condiciones de trabajo llevaría a obtener un valor asintótico y específico de cada maquinista, determinado por su experiencia y pericia en el trabajo. Según empresas que trabajan con maquinaria forestal, un maquinista comienza a tener experiencia a partir de las 500 horas de trabajo en una máquina. Al finalizar los ensayos, el tiempo de actividad fue de aproximadamente 181 horas y tiempo efectivo de empacado de unas 96 hte.

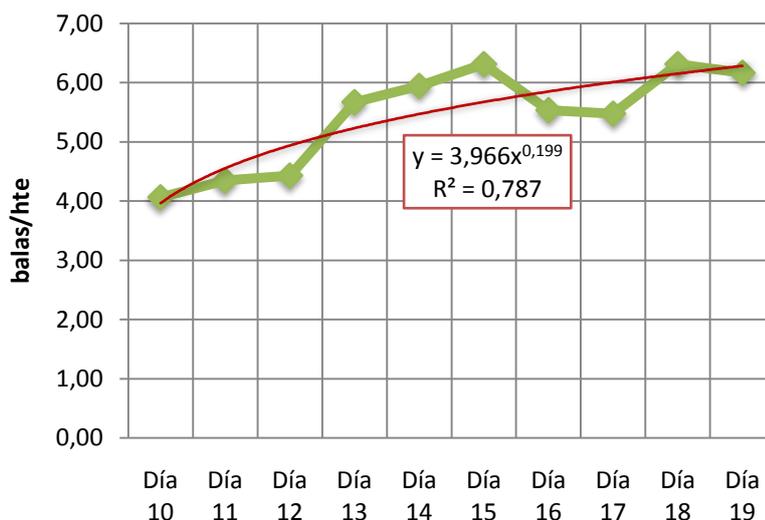


Gráfico 16: Evolución del rendimiento efectivo diario

La gran pericia del maquinista queda demostrada al analizar el tiempo transcurrido y la evolución temporal del rendimiento, donde se llegó a sobrepasar en tres días 6 balas/hte diarias. Tanto es así, que el maquinista pasó a formar parte de la plantilla de la empresa al terminar los ensayos.

3.2.2.3 Ensayo por máxima pendiente (EMP)

La parcela de EMP, de iguales características de vegetación que en el EPP pero con mayor pendiente, es la de menor superficie de las tres y donde sólo se produjeron 15 balas. El efecto de la pendiente en el ensayo se pone de manifiesto en los valores de los rendimientos efectivos, que son menores que los del ECN. Al realizarse el ensayo en los últimos días la experiencia del maquinista no es el factor más influyente en los datos observados, sino la modificación del ciclo de trabajo de la empacadora, puesto que tuvo que desplazarse para soltar la bala al principio de la calle donde la pendiente es cero.

| | NÚMERO DE BALAS (Balas) | PRODUCCIÓN EFECTIVA (Balas/hte) | COEFICIENTE DE EFECTIVIDAD (Cee) |
|----------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Día 17 | 9 | 3,46 | 0,65 |
| Día 18 | 6 | 2,75 | 0,27 |
| TOTALES | 15 | 3,14 | 0,40 |

Tabla 30: Resultados de producción en EMP

El segundo día de trabajo en el EMP disminuyó la producción efectiva debido a que la pendiente del terreno aumentó en la última parte de la parcela de ensayo.

3.3 Descripción del modelo de productividad

El modelo de productividad de la empacadora estima el número de balas que pueden producirse por unidad de tiempo efectivo. Para ello, el modelo muestra el tiempo medio del ciclo de empacado, es decir, el tiempo medio estimado para la formación de una bala.

El tiempo total de un ciclo de empacado (T_{cb}) se expresa en segundos por bala y está compuesto por:

$$[18] \quad T_{cb} = t_d + t_g + t_a$$

t_d : tiempo de desplazamiento (s)

t_g : tiempo de alimentación (s)

t_a : tiempo de atado y descarga (s)

3.3.1 Tiempo de desplazamiento

El tiempo de desplazamiento se calcula para los ensayos ECN y EMP como:

$$[19] \quad t_d = d_r / v_e$$

v_e : velocidad media de desplazamiento de la empacadora (m/s). Se calcula como el cociente de los datos tomados en campo, de distancia y tiempo entre pilas de residuos, con el método de cronometraje continuo.

| VELOCIDAD MEDIA DE DESPLAZAMIENTO DE LA EMPACADORA | | |
|--|--------------|--------------|
| | ECN | EMP |
| VALOR MEDIO (m/s) | 0,339 | 0,122 |
| DESVIACIÓN TÍPICA | 0,34 | 0,05 |
| ERROR TÍPICO | 0,02 | 0,01 |
| ERROR RELATIVO (nivel de confianza=0,95) | 14% | 24% |
| Tamaño de la muestra | 180 | 11 |

Tabla 31: Velocidad media de desplazamiento de la empacadora

d_r : distancia recorrida para formar una bala (m)

$$[20] \quad d_r = 10.000 / e * R_{gb} / R_g$$

e : espaciamiento medio entre calles (m). Corresponde al doble del alcance de la grúa.

R_g : residuo generado por superficie (t verde / ha)

R_{gb} : residuo generado para formar una bala (t verde)

El residuo generado para formar una bala se puede calcular como la suma del residuo empacado o peso verde de la bala (Pb), más las pérdidas de residuo (no recogido y desprendido) para formar una bala. Estas pérdidas se pueden calcular a partir de la eficiencia de recogida (Er) y el coeficiente de pérdida de residuos en el empacado (Pe).



Foto 45: Balas en calle en ECN

$$[21] \quad R_{gb} = R_{rb} / E_r$$

Rrb: residuo recogido por bala (t verde)

$$[22] \quad R_{rb} = P_b (1 + P_e)$$

| | EPP | ECN | EMP |
|------------------------|-------|-------|-------|
| e (m) | 20 | | |
| Rg (t verde/ha) | 29 | 19,95 | 29 |
| Pb (t verde) | 0,49 | | |
| Er | 0,82 | 0,87 | 0,89 |
| Pe | 0,47 | | |
| Rrb (t verde) | 0,721 | | |
| Rgb (t verde) | 0,88 | 0,83 | 0,81 |
| dr (m) | - | 20,75 | 13,95 |

Tabla 32: Valores para cálculo de distancia recorrida de la empacadora

3.3.2 Tiempo de alimentación

El tiempo de alimentación para formar una bala se calcula como:

$$[23] \quad \boxed{tg = Gb * tgg}$$

Gb: número de movimientos de grúa para formar una bala en el ciclo de la grúa.

tgg: duración media de un ciclo de grúa en la recogida del residuo selvícola (s).

Los valores medios de estos parámetros proceden de los datos muestrales recogidos con la metodología de cronometraje continuo para Gb y de filmación para tgg.

| | Gb | | | tgg | | |
|--|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | EPP | ECN | EMP | EPP | ECN | EMP |
| VALOR MEDIO | 8,92 | 15,07 | 12,80 | 53,04 | 41,61 | 53,16 |
| DESVIACIÓN TÍPICA | 1,35 | 3,90 | 1,61 | 13,64 | 19,35 | 16,64 |
| ERROR TÍPICO | 0,22 | 0,31 | 0,11 | 1,08 | 1,14 | 3,42 |
| ERROR RELATIVO (nivel de confianza=0,95) | 4,93% | 4,13% | 1,74% | 4,06% | 5,48% | 12,86% |
| Tamaño de la muestra | 23 | 109 | 14 | 103 | 248 | 18 |

Tabla 33: Valores para cálculo de tiempo de alimentación de la empacadora

3.3.3 Tiempo de atado y descarga



Foto 46: Descarga de bala

El tiempo medio de atado y descarga de la bala se calcula directamente con los valores de tiempo tomados mediante el método de filmación. Este tiempo se calcula de forma conjunta para todos los ensayos puesto que no hay variaciones apreciables entre sus tiempos. Esto se debe a que esta operación es independiente de los parámetros del monte y del terreno en los ensayos realizados.

| | ta |
|--|--------------|
| VALOR MEDIO (s) | 51,62 |
| DESVIACIÓN TÍPICA | 15,25 |
| ERROR TÍPICO | 1,54 |
| ERROR RELATIVO (nivel de confianza=0,95) | 5,96% |
| Tamaño de la muestra | 80 |

Tabla 34: Valores de tiempo de atado y descarga de la empacadora

3.3.4 Parámetros del modelo de productividad

A modo de resumen, los parámetros necesarios para utilizar el modelo de productividad son:

| PARÁMETROS DEL APROVECHAMIENTO | Símbolo | Unidad |
|---|---------|--------------|
| Cantidad de residuo selvícola generado por superficie | Rs | t verde / ha |
| Espaciamiento medio entre calles | e | m |
| PARÁMETROS DE LA EMPACADORA | | |
| Velocidad media de desplazamiento | ve | m/s |
| Número de movimientos de grúa para formar una bala | Gb | unidad |
| Duración media de un ciclo de grúa en la recogida del residuo selvícola | tgg | s |
| Tiempo de atado y descarga | ta | s |
| Peso de la bala fresca | Pb | t verde |
| Eficiencia en la recogida | Er | |
| Coefficiente pérdida de residuos en el empaçado | Pe | |

Tabla 35: Parámetros del modelo de productividad de la empacadora

El rendimiento efectivo de la empacadora, expresado en balas por hora de trabajo efectivo (hte), vendrá dado por la siguiente fórmula:

$$[24] \quad \text{Ree} = 3600/Tcb$$

| | EPP | ECN | EMP |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| td (s) | 0 | 61,21 | 114,38 |
| tg (s) | 477,36 | 624,15 | 691,08 |
| ta (s) | 51,62 | 51,62 | 51,62 |
| Tcb (s) | 528,98 | 736,98 | 857,08 |
| Ree (balas/hte) | 6,81 | 4,88 | 4,20 |

Tabla 36: Valores de tiempos y rendimiento del modelo de productividad de la empacadora

El tiempo de alimentación es lo que ocupa mayor tiempo en el ciclo de empaçado por lo que los parámetros que más influyen en el tiempo de formación de una bala son el número de movimientos de la grúa y la duración media del ciclo de la grúa. Ambos parámetros están relacionados, puesto que a menor número de movimientos de grúa necesarios para formar una bala, mayor es la duración media del ciclo. Los factores del aprovechamiento que inciden en estos dos parámetros son la cantidad y disposición de los residuos. Otros factores que influyen en estos dos parámetros son las características de la grapa de la grúa y la pericia del maquinista en el manejo de la grúa.

3.4 Validación del modelo de productividad

El modelo de productividad se valida con el parámetro del tiempo del ciclo de empaçado o formación de una bala (Tcb).

Los valores de los datos tomados en campo por la metodología de cronometraje continuo para el tiempo de ciclo de empaclado se presentan en la siguiente tabla:

| | EPP | ECN | EMP |
|--|---------------|----------------|-----------------|
| Valor medio Tcb (s) | 842,00 | 727,081 | 1.053,60 |
| Desviación típica | 139,93 | 242,91 | 560,37 |
| error típico | 40,33 | 17,72 | 204,62 |
| error relativo (nivel de confianza=0,95) | 10% | 5% | 39% |
| Tamaño de la muestra | 10 | 124 | 5 |

Tabla 37: Valores de tiempos de ciclo de empaclado según cronometraje continuo

| | Tcb (s) ENSAYOS | Tcb (s) MODELO | ERROR MODELO |
|------------|--------------------|-------------------|--------------|
| EPP | 842,00 | 528,98 | 37% |
| ECN | 727,08 | 736,98 | 1% |
| EMP | 1.053,60 | 857,08 | *19% |

Tabla 38: Valores de validación de modelo de productividad de la empacadora

El error del modelo es apreciable en los dos ensayos de menor duración y producción de balas. En el caso del EPP, el modelo no considera ningún tiempo de desplazamiento cuando en realidad sí lo hay, por lo que la productividad de la empacadora según el modelo es mayor que la del ensayo. Por lo que este modelo sólo es válido para el trabajo de la empacadora por calles.

En el caso del EMP, la diferencia entre la productividad del modelo y el rendimiento en el ensayo también se debe al tiempo desplazamiento no considerado para la suelta de la bala en lugar accesible para el autocargador. Para corregir el modelo se tendría que considerar que el tiempo de desplazamiento es de al menos el doble, es decir, 228,76 s. Por lo que el Tcb según el modelo sería de 971,46 s y el error sería del ***7,8%**.

3.5 Análisis económico de la empacadora

Para el cálculo de los costes de la empacadora se hacen las siguientes consideraciones:

[25] Tiempo de actividad (TA) = 1.800 h/año (225 días/año * 8 h/día)

[26] Tiempo efectivo de empaclado (TEe) = 1.404 hte/año (Cee = 0,78)

El coeficiente de efectividad de empaclado considerado es del 78%, puesto que el funcionamiento continuo de este trabajo conllevará como objetivo su realización en condiciones óptimas.

| | VALORES BASE | INCREMENTO ANUAL | VALOR MEDIO ANUAL (€/año) |
|-------------------------------------|---|------------------|---------------------------|
| Amortización | Pc = 384.650 € Valor residual = 10% * Pc n = 6 años | | 57.698 |
| Intereses | i = 7% | | 14.136 |
| Seguro | 0,6% * Pc | 1% | 2.775 |
| Maquinista | Coste Salario = 20,92 €/h Dieta = 56,5 €/día Vehículo = 19,36 €/día | | 54.725 |
| Combustible | Consumo gasoil= 12 l/hte Precio gasoil = 1 €/l | | 16.848 |
| Lubricante | 15% * Coste gasoil | | 2.527 |
| Mantenimiento y reparaciones | 7,8 €/hte | 10% | 17.316 |
| Neumáticos | Precio = 1.200 €/neumático Vida media = 2.500 h | | 5.391 |
| TOTAL | | | 171.415 |
| | | 95,23 €/h | |

Tabla 39: Costes de empacadora WoodPac

El periodo de amortización se considera como la vida útil de la máquina; el valor estimado de seis años es bajo con respecto a la realidad, pero en cualquier caso la superación de esta vida útil teórica conllevaría la disminución de las horas de funcionamiento de la máquina para no incrementar excesivamente los gastos en reparaciones, es decir, no se cumplirían unas condiciones óptimas de trabajo. Al fin y al cabo, realizar el cambio de máquina al finalizar el periodo de amortización supone garantizar sus condiciones de trabajo y su actualización tecnológica. El periodo de amortización considerado por Kärhä y Vartiamäki (2006) para esta empacadora es de 5 años, y 6,5 para la máquina base, pero consideraron 2.650 h₁₅/año -vida útil de 13.250 h-, y una tasa de interés del 4,2%.

No se supone un incremento anual para el coste del gasoil y del lubricante por su alto precio en el mercado actual y por la dificultad de evaluar su variabilidad alcista o bajista. El precio del gasoil considerado por Kärhä y Vartiamäki (2006) es prácticamente la mitad, 0,45 €/l, aunque el consumo es algo superior, 13,5 l/h₁₅.

Los costes de mantenimiento y reparaciones los facilitó el distribuidor de la maquinaria y no se consideraron los gastos diarios de mantenimiento por mano de obra al incluirlos en el salario del maquinista. Estos costes de 17.316 €/año son inferiores a los calculados por Kärhä y Vartiamäki (2006), 6.385 €/año en gastos de mantenimiento y administración y 8,1 €/h₁₅ de reparaciones. El coste horario de la empacadora WoodPac es de 78 €/h₁₅ (Kärhä y Vartiamäki (2006)). Este valor es menor que el calculado para los ensayos en la Sierra de Los Filabres, y se debe fundamentalmente a la diferencia en los costes de amortización e intereses, reparaciones y gasoil.

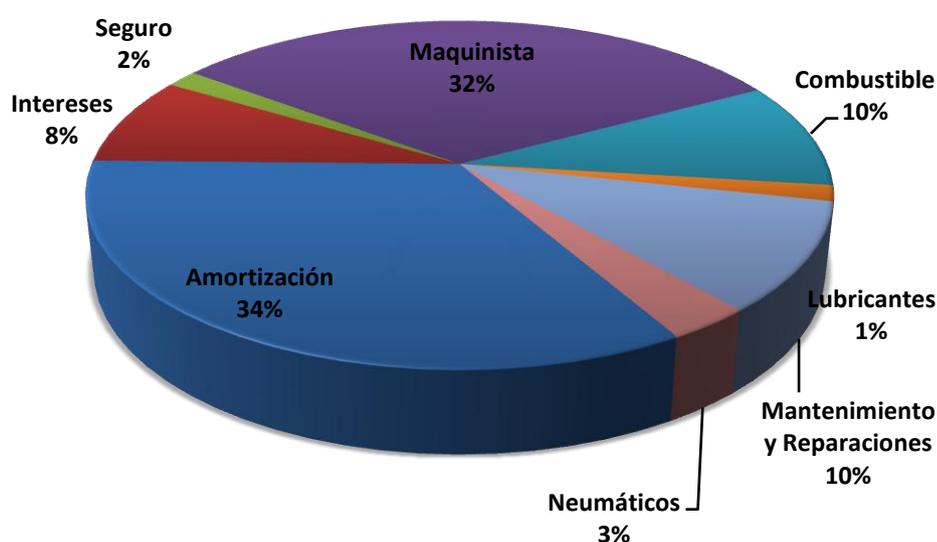


Gráfico 17: Distribución porcentual de costes de empacadora

El coste de amortización suma el 42% del importe anual de funcionamiento de la empacadora, incluidos también los intereses. Este porcentaje es alto debido al elevado importe del precio de compra de la máquina. El segundo coste más importante es el del maquinista, de un 32%, que también es alto porque se atribuye un buen salario y se pagan dietas y vehículo todos los días de trabajo.

Si en vez de considerar solamente una efectividad del 78% se considerase también la de los ensayos, se podrían calcular los costes de producción en función de los rendimientos y coeficientes efectivos de empacado de los ensayos. También se calcula el coste de producción respecto a m³ de residuo sólido según la siguiente fórmula del contenido de volumen de residuo sólido en cada bala:

$$[27] \quad \text{Volumen aparente bala} * \text{Coeficiente de empacado} = 1,37 * 0,4 = 0,55 \text{ m}^3/\text{bala}$$

| | PRODUCCIÓN MEDIA (balas/h) | COSTE HORARIO (€/h) | COSTE PRODUCCIÓN (€/bala) | COSTE PRODUCCIÓN (€/m³) |
|-------------|---|------------------------------------|--|---|
| EPP | 2,19 | 86,54 | 39,52 | 71,85 |
| ECN | 2,50 | 88,34 | 35,34 | 64,25 |
| EMP | 1,25 | 83,84 | 67,07 | 121,95 |
| ECN* | 4,71 | 94,93 | 20,16 | 36,65 |

Tabla 40: Rendimientos y costes según actividad de ensayos

El caso de ECN* corresponde a la hipótesis del empaquetado en las condiciones medias del ensayo por curvas de nivel con una producción de 6 balas/hte y un coeficiente de efectividad del 78%.

Los costes de producción de la empacadora WoodPac en el estudio de Kärhä y Vartiamäki (2006) resultaron entre 13 y 19,5 €/m³. Son valores más bajos que los calculados en la Sierra de Los Filabres debido al menor coste horario y mayor producción de la empacadora en las condiciones nórdicas.

Para reducir los costes de empaquetado es fundamental aumentar la productividad de la empacadora, trabajando a dos turnos con un maquinista experimentado y un buen método de trabajo (Kärhä y Vartiamäki, 2006).

4 ANÁLISIS DEL TRANSPORTE EXTRAVIARIO Y VIARIO

4.1 Análisis de producción y costes

4.1.1 Transporte extraviario

El ciclo de trabajo del autocargador en el desembosque de balas comprende el desplazamiento del autocargador desde el cargadero hasta el monte, donde carga su plataforma al máximo de capacidad desplazándose por las calles y retorna al cargadero para descargar las balas transportadas.

Por lo tanto, el tiempo total del ciclo del autocargador para la saca de balas (T_{cab}) comprende cinco tiempos:

$$[28] \quad T_{cab} = t_{d_o} + t_{d_{ec}} + t_{d_c} + t_{cb} + t_{db}$$

t_{d_o} : tiempo de desplazamiento en vacío (s)

$t_{d_{ec}}$: tiempo de desplazamiento en carga (s)

t_{d_c} : tiempo de desplazamiento cargado (s)

t_{cb} : tiempo de carga de balas (s)

t_{db} : tiempo de descarga de balas (s)

Los valores medios de estos tiempos en los viajes seguidos en el ECN y el rendimiento efectivo resultante, son:

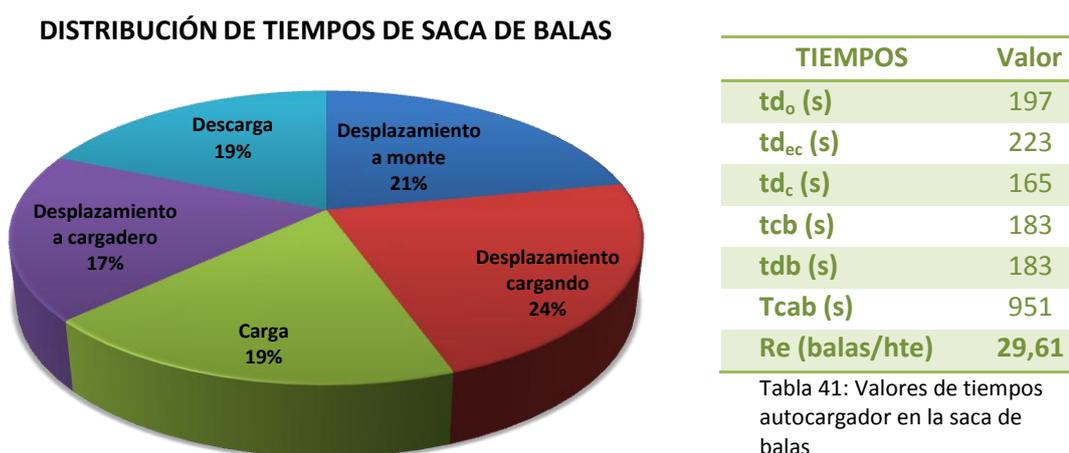


Gráfico 18: Distribución porcentual de saca de balas con autocargador

Andersson *et ál.* (2000) calcularon para condiciones de trabajo en montes de Suecia y 300 metros de distancia de saca, una productividad de 40 balas/hte. Kärhä y Vartiamäki (2006)

obtuvieron valores más altos de productividad del autocargador, 46 balas/h₁₅, para una distancia de saca de 250 m y en montes de Finlandia.

Los valores medios del desembosque de balas en el ECN son:

| PARÁMETROS | VALOR |
|-----------------------------------|-------|
| Nº balas por viaje (balas) | 8 |
| Distancia a monte (m) | 242 |
| Distancia media cargando (m/bala) | 26 |
| Distancia a cargadero (m) | 202 |

Tabla 42: Valores de toma de datos de seguimiento de viajes de autocargador

La distancia media de saca (Ds), calculada como el valor medio de las distancias de los trayectos medidos entre cargadero y el monte en el ECN, es de 222 m.

Los datos de los partes diarios donde aparecen los tiempos de actividad en los ensayos se usan para calcular los rendimientos.

| | EPP | ECN | EMP |
|-------------------------|------|-------|-------|
| Tiempo de actividad (h) | 20 | 21 | 1,5 |
| Nº balas | 59 | 356 | 15 |
| Rendimiento (balas/h) | 2,95 | 16,95 | 10,00 |
| Rendimiento (t verde/h) | 2,60 | 8,31 | 4,90 |

Tabla 43: Rendimiento de saca de balas con autocargador

En el EPP no se sacaron balas, sino residuo selvícola suelto. Se expresa en balas producidas en el EPP, 59, entre el tiempo de actividad para establecer la comparación con la producción en el ECN. También se puede hacer la comparativa en t verde/h, ya que se conoce el peso medio en verde de la bala (490 kg), el número de balas y la estimación del residuo generado en el EPP, 51,91 t.

El rendimiento del autocargador en el EPP resultó de 2,60 t verde/h de residuo generado. Si la saca hubiera sido de las 59 balas, en lugar del residuo suelto, para el mismo tiempo de actividad el rendimiento sería de 1,44 t verde/h de residuo empacado. Este rendimiento es el más bajo y se debe a dos parámetros: densidad de carga y la cantidad de residuo que se extrae que no forma parte de la bala. Para mejorar la producción en la saca de residuo suelto habría que hacer mejoras en la plataforma del autocargador para aumentar su capacidad de carga, tanto en volumen como en densidad.

Los valores de producción en el EMP no son reales puesto que el autocargador no realizó todo el desembosque y recibió la ayuda de la empacadora, por lo que la producción debería ser algo menor de 10 balas/h. En cualquier caso, se mantiene esta producción como válida porque, dentro de la hora y media de trabajo, en el EMP se realizaron varios intentos para la recogida de las balas y se efectuaron los desplazamientos debidos.



Foto 47: Saca de balas con autocargador

El coeficiente de efectividad, hallado para el ECN, se calcula como el cociente del rendimiento del ensayo entre el rendimiento efectivo, que da un valor del 57%. Este valor es similar al obtenido para la empacadora en el ECN, que es del 55%.

El coste de subcontratación del autocargador fue de 60 €/h.

| COSTE | EPP | ECN | EMP |
|------------------|-------|-------|-------|
| € ensayo | 1.200 | 1.260 | 90 |
| €/t verde | 23,12 | 7,22 | 12,24 |
| €/bala | 20,34 | 3,54 | 6,00 |
| €/m ³ | 36,98 | 6,44 | 10,91 |

Tabla 44: Coste de saca de balas con autocargador

El coste de producción referido a m³ de residuo selvícola se calcula a partir del contenido de volumen sólido en la bala, 0,55 m³.

En el estudio de Kärhä y Vartiamäki (2006) el coste horario del autocargador dio un valor de 62 €/h₁₅, y el coste de producción fue de 3,1 €/m³. El coste horario es similar, pero el coste de producción es inferior al calculado en la Sierra de Los Filabres debido a que la productividad del autocargador en las condiciones nórdicas es casi el doble. Al comparar los parámetros básicos de la saca de balas en Filabres con el estudio de Kärhä y Vartiamäki (2006), el tiempo de realización

del trabajo es el valor diferencial. Por lo que las diferencias radican en los factores que afectan a la velocidad del trabajo: experiencia del maquinista y velocidad media del autocargador.

4.1.2 Transporte viario



Foto 48: Transporte de balas en camión con remolque

Se realizaron un total de 9 portes para transportar las 463 balas con un peso total de 122,28 t. Los destinos fueron Linares (Jaén) y Pozo Cañadas (Albacete), siendo la distancia media de transporte de 300 km. Se utilizaron dos tipos de camiones:

- Camión con remolque (I): camión provisto de grúa y con remolque.
- Camión con góndola (II): cabeza tractora con plataforma tipo góndola.

La duración del transporte fue de un porte diario con un conductor y dos portes diarios cuando trabajaron dos conductores.

Las características de carga de estos vehículos son:

| | I | II |
|--------------------------------------|-----------------------|----------|
| Ancho plataforma (m) | 2.3 | 2.4 |
| Longitud de plataforma (m) | 6.2 (remolque) 7.2 | 13.2 |
| Altura de carga (m) | 3 | 3 y 3.75 |
| Capacidad de carga (estéreos) | 92 | 110 |
| Nº balas transportadas | 24 (remolque) 24 | 57 |

Tabla 45: Características camiones

La carga se transportó longitudinalmente, porque la longitud de la bala era mayor que el ancho de plataforma y además, al no ser un transporte especial, habría superado los límites establecidos por las normas de circulación de tráfico. La sección de carga longitudinal está formada por un paralelepípedo con las siguientes dimensiones:

- Alto: es el producto del diámetro de la bala por el valor entero del cociente de la altura de carga entre el diámetro de la bala. Su valor es 3 m, 3,75 m en el camión tipo II en la sección baja de la plataforma.
- Ancho: es el producto del diámetro de la bala por el valor entero del cociente del ancho de plataforma entre el diámetro de la bala. Su valor es 2,25 m.

Por lo tanto, el volumen de una unidad de carga es el área de la sección de carga por la longitud de la bala.

Con estos datos se calcula el coeficiente de apilado de las balas (Cab) a partir del volumen ocupado por una unidad de carga con la siguiente fórmula:

$$[29] \quad Cab = N^{\circ} \text{ balas en una unidad de carga} * \text{Volumen aparente bala} / (\text{Sección de carga} * \text{longitud de bala})$$

El número de balas en una unidad de carga es de 12 para el camión tipo I y II y de 15 para el tipo II en la sección baja. El Cab es de 0,78.

La altura y la anchura dadas por las características de las plataformas permiten una carga optimizada al tener dimensiones que casi son múltiplos del diámetro de la bala. Pero el transporte no tenía optimizada la carga por no ocupar la capacidad máxima en volumen, ya que las longitudes de plataforma no eran múltiplos de la longitud de la bala. En el caso del camión tipo I, la plataforma del remolque tiene una longitud de 7,2 m y las dos unidades de carga que transporta tienen una longitud de 6,2 m. En el tipo II, la longitud de la plataforma es de 13,2 m y la longitud de las cuatro unidades de carga es de 12,4 m. En ambos casos, el volumen no ocupado es superior al volumen aparente de tres balas.

El tiempo de carga en el camión tipo I, que fue el único en el que se midió aunque sólo en el primer porte, fue de 50 minutos para cargar 48 balas y de 25 minutos para la colocación de la lona protectora.

El coste del transporte se subcontrató como precio medio para los dos posibles destinos y con los dos tipos de camiones. Su valor fue de 600 €/porte, por lo que el coste total del transporte

de 463 balas fue de 5.400 € y el precio medio de **11,66 €/bala** ó 21,2 €/m³. Kärhä y Vartiamäki (2006) calcularon el coste de transporte de las balas en un camión maderero a una distancia de 80 km en 6,4 €/m³. Este precio es parecido al calculado en Filabres, si consideramos un tercio de la distancia transportada, y por lo tanto un tercio del coste, 7 €/m³.

Puesto que el precio del porte es un valor fijo, hay distintos precios por bala en función de la capacidad de carga del vehículo utilizado. Así, para el tipo I el precio sería de 12,5 €/bala y para el tipo II sería de 10,5 €/bala. Por supuesto, si los camiones empleasen la máxima capacidad de carga, el precio podría disminuir hasta un 10%.

4.2 Modelo de productividad para la saca de balas

El modelo de productividad del autocargador para la saca de balas estima el número de balas que pueden desemboscarse por unidad de tiempo efectivo. Para ello, el modelo muestra el tiempo medio del ciclo de trabajo del autocargador a partir de su descomposición de tiempos: desplazamiento en vacío, cargando, cargado, y carga y descarga de las balas.

4.2.1 Tiempos de desplazamiento

Los tres tiempos de desplazamiento que recoge el modelo corresponden al ciclo de trabajo del autocargador. El primero (td_o) es el transcurrido durante el desplazamiento en vacío que realiza desde el cargadero hasta la primera bala que recoger. El segundo (td_{ec}) es el tiempo invertido en desplazarse desde que se detiene junto a la primera bala hasta que completa la carga. El tercer tiempo (td_e) es el que realiza de retorno al cargadero con la plataforma al máximo de carga.

Estos tres tiempos de desplazamiento se calculan con las siguientes fórmulas:

$$[30] \quad td_o = Ds / v_o$$

siendo Ds la distancia media de saca (m) y v_o la velocidad en vacío (m/s). Estos dos datos se obtienen como el valor medio de los datos tomados en campo en el seguimiento de los viajes.

$$[31] \quad td_{ec} = N^{\circ} \text{ balas por viaje} * dr / v_{ec}$$

siendo dr la distancia recorrida para formar una bala, obtenida en el modelo de productividad de la empacadora, y v_{ec} la velocidad en carga que se obtiene de los datos de campo. El cálculo del número de balas por viaje se explica en los tiempos de carga y descarga.

$$[32] \quad td_e = Ds / v_c$$

siendo v_c la velocidad del autocargador cargado (m/s). Este dato se obtiene como el valor medio de los datos tomados en campo en el seguimiento de los viajes.

4.2.2 Tiempos de carga y descarga

El tiempo de carga corresponde a la recogida en el monte, o ciclo de la grúa cargando, de las balas por transportar. El tiempo de descarga corresponde a la suelta y colocación de la bala en el cargadero. Ambos tiempos se calculan con valores medios para una bala a partir de los datos tomados en campo y se denominan duración media de un ciclo de grúa en carga y duración media de un ciclo de grúa en descarga. El número de ciclos de grúa que se realizan es el número de balas máximas que pueden transportarse. De este modo, los tiempos de carga y descarga se calculan como:

$$[33] \quad tcb = N^{\circ} \text{ balas por viaje} * \text{Duración media de un ciclo de grúa en carga}$$

$$[34] \quad tdb = N^{\circ} \text{ balas por viaje} * \text{Duración media de un ciclo de grúa en descarga}$$

El número de balas por viaje se estima para el desembosque con mayor cantidad de balas por viaje en la plataforma del autocargador. La capacidad de carga viene dada por el peso y por el volumen transportado. El peso máximo que transportar lo indican las características del autocargador, en nuestro caso, 9.000 kg. Pero el limitante en el transporte de balas no es el peso, sino el volumen. Generalmente, por analogía con la saca de madera, la carga puede colocarse transversal o longitudinalmente. La carga transversal no era posible porque la longitud de la bala excedía la anchura de la plataforma del autocargador. La carga longitudinal expresada en número de balas se calcula con la siguiente fórmula:

$$[35] \quad \text{Carga longitudinal} = A * H * Lb * Sc * Cab / Vb$$

A: ancho de plataforma (m)

H: altura de carga (m)

Lb: longitud de la bala (m)

Sc: número de secciones de carga. Es la cantidad de balas que caben longitudinalmente en la plataforma del autocargador. Se calcula como el valor entero del cociente de la longitud de bala entre la longitud de plataforma.

Cab: coeficiente de apilado de la bala. Se calcula en el transporte de camión.

Vb: volumen aparente de la bala (m^3)

El número entero del valor de la carga longitudinal es el número de balas por viaje que se utilizan en el modelo de productividad.

4.2.3 Parámetros del modelo de productividad del autocargador para la saca de balas

| PARÁMETROS DEL APROVECHAMIENTO | Símbolo | Valor | Unidad |
|--|-----------------|-------|----------------|
| Distancia media de saca | Ds | 222 | m |
| Longitud de la bala | Lb | 3,1 | m |
| Volumen aparente de la bala | Vb | 1,37 | m ³ |
| Coficiente de apilado de la bala | Cab | 0,78 | |
| Distancia recorrida para formar una bala | Dr | 20,75 | m |
| PARÁMETROS DEL AUTOCARGADOR | | | |
| Ancho de plataforma | A | 2,4 | m |
| Longitud de plataforma | Lp | 4,95 | m |
| Altura de carga | H | 2,4 | m |
| Nº balas por viaje | | 8 | balas |
| Velocidad de desplazamiento en vacío | v _o | 1,28 | m/s |
| Velocidad de desplazamiento en carga | v _{ec} | 0,92 | m/s |
| Velocidad de desplazamiento cargado | v _c | 1,26 | m/s |
| Duración media de un ciclo de grúa en carga | | 22,97 | s |
| Duración media de un ciclo de grúa en descarga | | 23,55 | s |

Tabla 46: Parámetros del modelo de productividad del autocargador para la saca de balas

El rendimiento efectivo del autocargador para la saca de balas, expresado en balas por hora de trabajo efectivo (hte), vendrá dado por la siguiente fórmula:

$$[36] \quad Re = N^{\circ} \text{ balas por viaje} * 3600/Tcab$$

| TIEMPOS | Valor |
|----------------------|-------|
| td _o (s) | 174 |
| td _{ec} (s) | 226 |
| td _c (s) | 176 |
| tcb (s) | 229 |
| tdb (s) | 235 |
| Tcab (s) | 1.040 |
| Re (balas/hte) | 34,6 |

Tabla 47: Valores de tiempos del modelo de productividad del autocargador para la saca de balas

4.2.4 Validación del modelo de productividad del autocargador para la saca de balas

Al igual que en la validación del modelo de productividad de la empacadora, se emplea el tiempo del ciclo del autocargador para la saca de balas o el rendimiento efectivo. La diferencia entre ambos tiempos es de 89 s, que resulta un error del modelo del **8,5%**. Existen dos datos en el modelo que son distintos del ensayo:

- Nº balas por viaje: en el modelo se supone que el autocargador transporta con su máxima capacidad de carga, que son 10 balas. La media de balas transportadas en los viajes estudiados es de 8, aunque en dos de los viajes el autocargador iba cargado con 10 balas. Esta diferencia provoca que los tiempos de carga y descarga de la bala en el total del viaje sean mayores en el modelo.
- Distancia entre balas: la distancia media cargando es de 26 m/bala según lo obtenido en la toma de datos; en cambio, el valor de la distancia recorrida para formar una bala en el ECN es de 20,75 m, según el cálculo del modelo de productividad de la empacadora, que es el utilizado en el del autocargador. Hay poca diferencia entre los tiempos de desplazamientos en carga puesto que la distancia total que recorrer, que es de 204 m en la toma de datos, se compensa al aumentar el número de balas en el modelo, lo que resulta en 207,5 m.



Foto 49: Balas en cargadero

5 ANÁLISIS DEL SISTEMA LOGÍSTICO DE EMPACADO

Este análisis persigue los valores generales de rendimientos y costes del sistema logístico de empacado de balas en los ensayos realizados. El sistema logístico comprende todas las operaciones que se realizan desde que el residuo selvícola está en el monte hasta el parque del punto de transformación, habiendo realizado un proceso previo de empacado. Estas operaciones son: empacado, saca de balas (o residuo suelto) y transporte a fábrica.

| | EPP | | ECN | | EMP | | TRANSPORTE |
|-----------------------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|------------------|
| | EMPACADO | SACA | EMPACADO | SACA | EMPACADO | SACA | A FÁBRICA |
| PRODUCCIÓN (balas/h) | 2,19 | 2,95 | 2,50 | 16,95 | 1,25 | 10,00 | 1 viaje/día |
| COSTE (€/bala) | 39,52 | 20,34 | 35,34 | 3,54 | 67,07 | 6,00 | 11,66 |
| COSTE TOTAL SISTEMA | 71,52 | | 50,54 | | 84,73 | | €/bala |
| | 270,91 | | 191,44 | | 320,95 | | €/t |
| | 130,04 | | 91,89 | | 154,05 | | €/m ³ |

Tabla 48: Rendimiento y costes del sistema logístico integrado en ensayos

El coste del sistema, expresado en €/t, se calcula considerando el peso medio de la bala seca al aire, 0,264 t. El coste expresado en €/m³, se calcula a partir del volumen sólido contenido en la bala, 0,55 m³.

Los costes del sistema son muy altos debido fundamentalmente a los siguientes factores:

- Baja producción de la empacadora en los ensayos: los rendimientos medios efectivos son bajos. De hecho, en los últimos días se mantienen rendimientos efectivos superiores a la media. El coeficiente de efectividad en el empacado también es bajo, debido a condicionantes propios de los ensayos que pueden subsanarse en un trabajo continuo.
- Efectividad de la saca: el coeficiente de efectividad del autocargador es bajo, pero puede mejorarse. Si bien en los ensayos el autocargador también realiza la saca de madera, el coeficiente de efectividad sería aún más bajo de no hacerlo por la teoría del eslabón débil en los sistemas de producción, ya que el autocargador tiene mayor productividad que la empacadora.
- Distancia de transporte elevada: el coste de transporte es alto debido a que la distancia de transporte es superior a los 300 km.
- Pérdida de peso de la bala: al referir los costes del sistema a tonelada seca al aire, se hace notar la pérdida de peso de la bala, que pasa de 0,49 t en verde a 0,264 t seca al

aire, casi la mitad, por lo que los costes en €/t respecto al peso medio en verde de la bala bajarían a casi la mitad. Por ejemplo, para el ECN serían de 103,14 €/t verde. En el ensayo, tanto el empacado como la saca se realizaron con la bala en verde. Sólo el transporte trabajó con la bala seca al aire porque se efectuó finalizado el verano.

Se plantea ponderar estos tres factores para conocer el coste del sistema logístico de empacado en condiciones de mejora del sistema. La hipótesis es considerar un coeficiente de efectividad del 78% y un rendimiento de empacado de 6 balas/hte (ECN*). Estos valores se consideran pesimistas puesto que fueron alcanzados durante los ensayos en un 25% de los días estudiados. Se considera una distancia media de transporte que permita hacer tres portes diarios.

| | EMPACADO | SACA | TRANSPORTE |
|-----------------------------|---------------|------------------------|------------|
| PRODUCCIÓN (balas/h) | 4,71 | 23,09 | |
| COSTE (€/bala) | 20,16 | 2,60 | 3,89 |
| COSTE TOTAL SISTEMA | | | |
| | 26,65 | €/bala | |
| | 100,93 | €/t | |
| | 54,38 | €/ t verde | |
| | 48,45 | €/m³ | |

Tabla 49: Rendimiento y costes del sistema logístico empacado en condiciones óptimas

El coste total del sistema logístico de empacado ha disminuido prácticamente a la mitad respecto a los ensayos, lo que demuestra la enorme sensibilidad del coste a la producción de la empacadora y la distancia de transporte. Por este motivo, el coste del sistema logístico de empacado en las condiciones del estudio de Kärha y Vartiamäki (2006) y a una distancia de transporte de 100 km, da un valor de 22 €/m³ y pudiendo optimizarse hasta alcanzar los 19 €/m³.

Para analizar esta sensibilidad en relación con la rentabilidad de los trabajos, podemos hacer variar el rendimiento de la empacadora y suponer tres distancias medias de transporte que permitan hacer un porte, dos y tres diarios. A este coste del sistema se le aplica un aumento del 19% en concepto de gastos generales de empresa (p. ej. la parte proporcional de capataz y medios auxiliares necesarios para la realización de los trabajos) y beneficio empresarial. No se incluyen impuestos.

Se consideran dos ingresos: el obtenido por la venta de la materia prima y el ingreso de la administración por “eliminar el residuo” en monte público.

- El precio de venta en los ensayos fue de 24,04 €/t (4 pts/kg), que, repercutido al peso medio de la bala seca al aire, alcanza los 6,35 €/bala.

- El coste de administración para la recogida y eliminación de los residuos, obtenido a partir de proyectos ejecutados durante los años 95-96, tiene un valor medio de 774 euros/ha (Carreras, C., 1999). Este valor supondría un ingreso de 31,08 €/bala. Según las tarifas TRAGSA vigentes en proyectos en ejecución en el 2009 se paga por la recogida y astillado de residuos unos 2.400 €/ha.

El ingreso total da un valor de 37,43 €/bala.

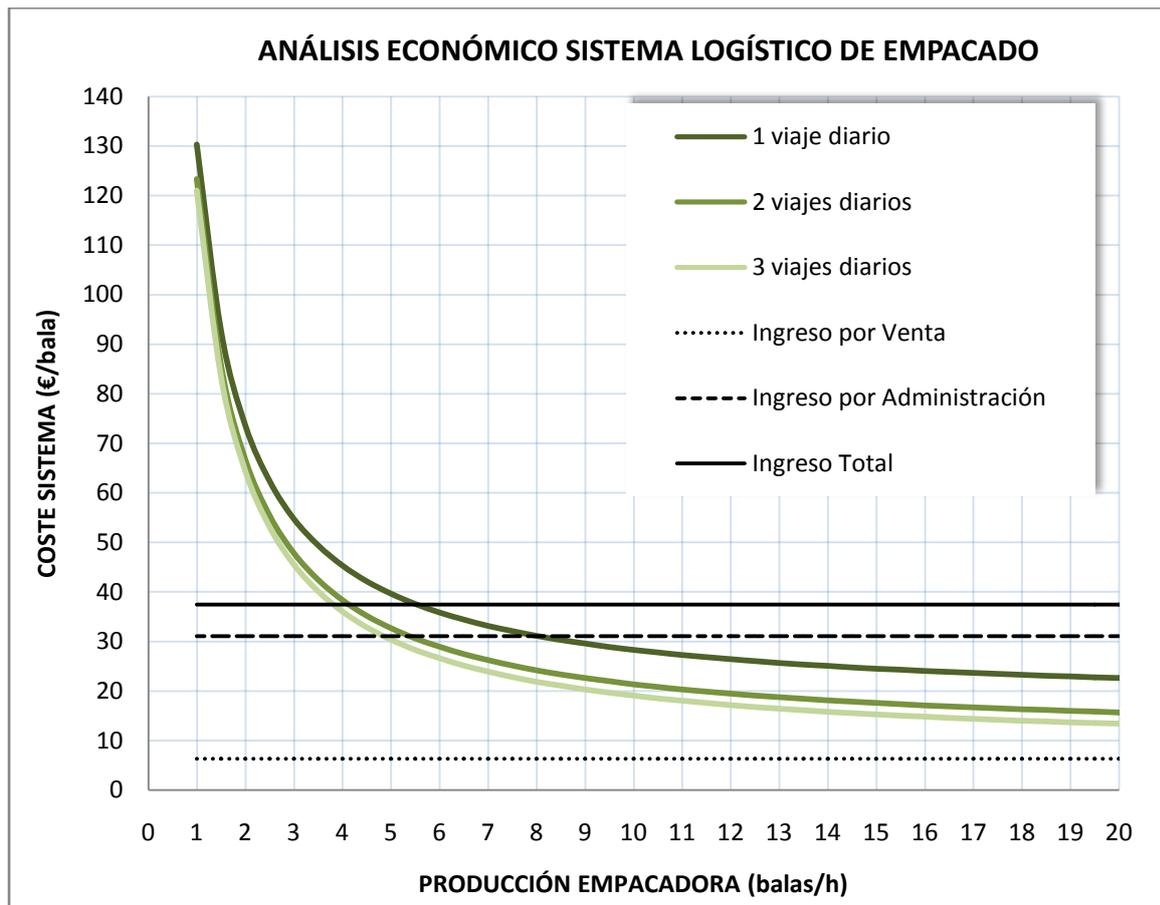


Gráfico 19: Análisis económico del sistema logístico de empacado

Contemplando únicamente como ingreso la venta de la materia prima, habría que contar con un ingreso alto para que los trabajos tuvieran beneficios y con distancias de transporte que permitieran hacer al menos tres portes diarios. Si se consideran los dos ingresos, las producciones necesarias para obtener rentabilidad en el suministro de materia prima, deberían estar a partir de 3,9 y 5,4 balas/h.

La sensibilidad del coste del sistema en función de la producción de la empacadora disminuye conforme aumenta la producción.

6 ANÁLISIS DEL SISTEMA LOGÍSTICO INTEGRADO Y TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL

6.1 Análisis de productividad

En el caso de la empacadora se estima que estos coeficientes son los mismos que los del autocargador, ya que se supone que la reducción de la productividad de la empacadora en función de la pendiente viene dada por la máquina base donde va montada.

| RENDIMIENTO EFECTIVO POR PENDIENTE | | |
|------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| CLASES DE PENDIENTE | EMPACADORA (balas/hte) | AUTOCARGADOR (balas/hte) |
| 0-15 % | 4,88 | 10,53 |
| 15-30% | 3,90 | 8,42 |
| 30-50% | 2,19 | 4,74 |

Tabla 50: Rendimiento efectivo por pendiente de empacadora y autocargador

La cantidad de balas anuales que se producen a partir de las 15.275 t verde generadas es de 18.444, que corresponde a 10.107 m³ de residuo sólido (Contenido de residuo sólido en bala: 0,55 m³).

| | TA ₁ | | TA ₂ | | TA ₃ | |
|---------------------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | UMq | Ce | UMq | Ce | UMq | Ce |
| PROCESADORA | 15 | 0,75 | 8 | 0,71 | 7 | 0,81 |
| AUTOCARGADOR | 11 | 0,74 | 6 | 0,68 | 5 | 0,81 |
| EMPACADORA | 5 | 0,67 | 3 | 0,56 | 2 | 0,84 |

Tabla 51: Número de unidades de medios de producción y efectividad

El trabajo a dos turnos se plantea como la posibilidad de trabajar el doble de tiempo con una máquina dentro del mismo periodo de amortización, lo que reduce los costes. Sin embargo, el sistema de organización del trabajo en máquinas a dos turnos exigiría unas normas básicas para su correcto funcionamiento. La tercera hipótesis, TA₃, persigue como objetivo la máxima reducción de costes con la mejor organización posible basándose en una elevada efectividad de los medios de producción.

6.2 Análisis económico

El coste horario de los medios de producción para las tres hipótesis planteadas se presenta en la siguiente tabla.

| | TA ₁ (€/h) | TA ₂ (€/h) | TA ₃ (€/h) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| PROCESADORA | 88,36 | 71,69 | 75,46 |
| AUTOCARGADOR | 70,19 | 58,99 | 62,82 |
| EMPACADORA | 92,04 | 67,95 | 76,36 |

Tabla 52: Coste horario de los medios de producción del sistema logístico

El coste del sistema logístico integrado se determina con los costes horarios y las productividades de los medios. También se calcula el coste por hectárea a partir de las existencias que se van a extraer.

| TA ₁ | | | | |
|---------------------|------------------|--------|----------|------------------|
| CLASES DE PENDIENTE | SBM | SBNM | SLI | |
| | €/m ³ | €/bala | €/ha | €/m ³ |
| 0-15 % | 24,11 | 37,07 | 973,98 | 31,24 |
| 15-30% | 28,77 | 46,34 | 1.174,53 | 37,67 |
| 30-50% | 49,85 | 82,39 | 2.047,88 | 65,68 |
| TA ₂ | | | | |
| CLASES DE PENDIENTE | SBM | SBNM | SLI | |
| | €/m ³ | €/bala | €/ha | €/m ³ |
| 0-15 % | 21,25 | 33,12 | 860,89 | 27,61 |
| 15-30% | 25,37 | 41,41 | 1.038,94 | 33,32 |
| 30-50% | 43,98 | 73,61 | 1.812,24 | 58,12 |
| TA ₃ | | | | |
| CLASES DE PENDIENTE | SBM | SBNM | SLI | |
| | €/m ³ | €/bala | €/ha | €/m ³ |
| 0-15 % | 19,34 | 25,96 | 758,63 | 24,33 |
| 15-30% | 23,08 | 32,45 | 914,06 | 29,32 |
| 30-50% | 40,01 | 57,69 | 1.592,97 | 51,09 |

Tabla 53: Costes del sistema logístico integrado

SBM: sistema de biomasa maderable o aprovechamiento de madera.

SBNM: sistema de biomasa no maderable o aprovechamiento del residuo selvícola.

SLI: sistema logístico integrado. La unidad €/m³ es respecto al volumen de madera en rollo.

Los valores medios ponderados del coste del SLI son de 47,95 €/m³ (TA₁), de 42,42 €/m³ (TA₂) y de 37,31 €/m³ (TA₃). Estos costes se refieren al m³ de madera en rollo generado y no incluyen el transporte de la materia prima a fábrica.

Se considera que la distancia de transporte es la que permite hacer dos portes diarios.

| | TRAYECTO (€/día) | MADERA (€/m ³) | RESIDUO EMPACADO (€/bala) |
|-------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|
| TRANSPORTE | 600 | 6,79 | 5,83 |

Tabla 54: Costes del transporte viario

Se calcula un incremento del 19% en concepto de gastos generales y beneficio. Por lo tanto, el gasto del tratamiento selvícola con la materia prima puesta en planta es de:

| | €/ha | €/m ³ |
|-----------------------|----------|------------------|
| TA₁ | 2.072,65 | 66,47 |
| TA₂ | 1.867,48 | 59,89 |
| TA₃ | 1.677,85 | 53,81 |

Tabla 55: Precio del tratamiento selvícola con la materia prima puesta en planta

En el análisis económico no se tienen en cuenta los ingresos procedentes de la administración, aunque ésta financia los tratamientos selvícolas en monte público. Un análisis de los proyectos de tratamiento selvícola ejecutados durante los años 95-96 ofrece un coste medio de 230.000 pta./ha (1.380 €/ha) (C. Carreras, 1999). Según el *PTO Gérgal*, el presupuesto para la clara es de 1.803,04 €/ha, que comprenden el apeo, la saca de madera de pies de diámetro normal superior a 17,5 cm y el astillado de los pies menores. No se consideran los costes de eliminación del residuo. Actualmente, el importe del tratamiento selvícola, reflejado por unidades de obra en los proyectos de ejecución, según tarifas TRAGSA sobrepasa como valor medio los 4.000 €/ha.

6.2.1 Evaluación financiera

Los ingresos considerados por la venta de los productos son:

- Madera aserrada seca: por determinar.
- Astilla industrial y serrín: 23,4 €/m³ (fuente: fábrica de tablero).
- Energía: 118,29 €/MWh_e para residuo selvícola y 71,35 €/MWh_e para residuo de aserradero (fuente: Real Decreto 661/2007).

Se determinan dos umbrales como parámetros del análisis financiero:

- Umbral de rentabilidad: su valor es el interés del préstamo de la inversión, 5,5%.
- Umbral de viabilidad: su valor es 12,28%.

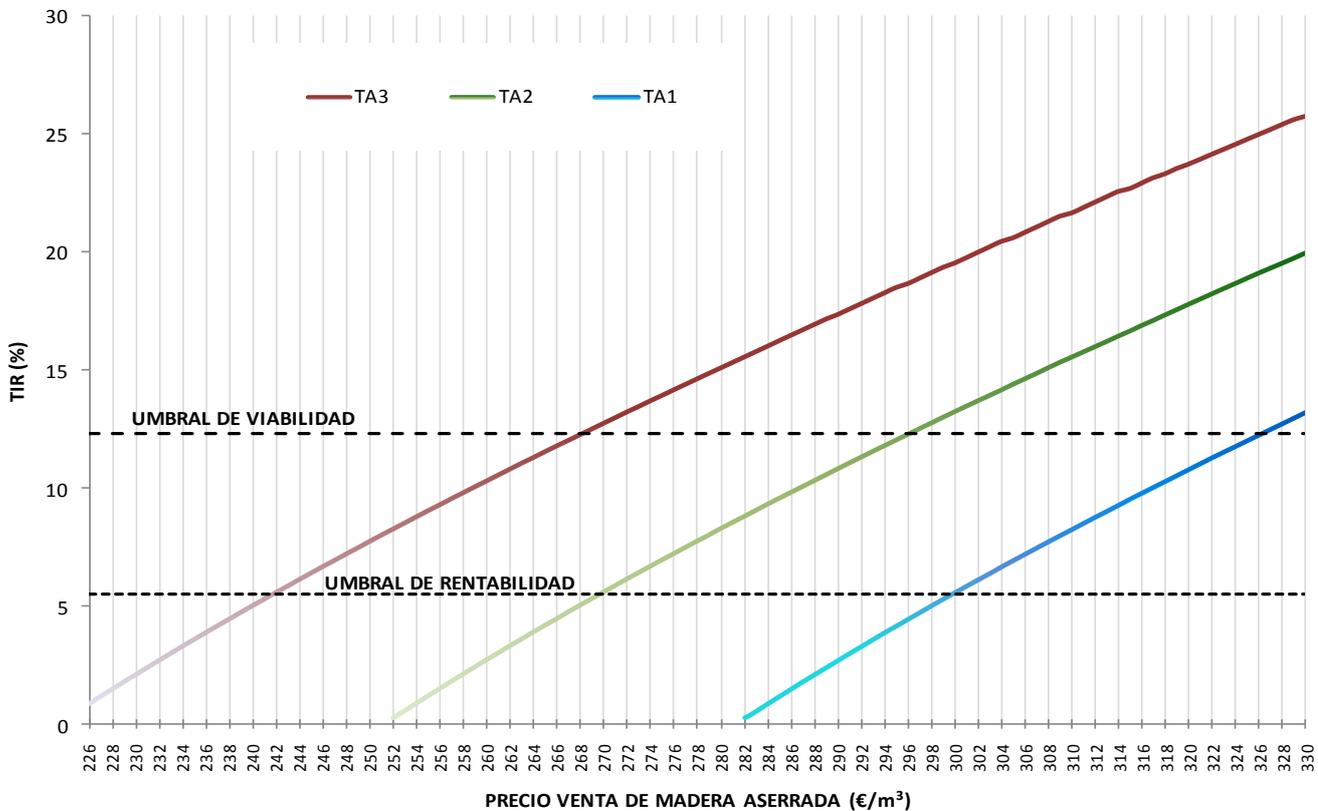


Gráfico 20: Evaluación financiera de la planta industrial

La pronunciada pendiente de las curvas muestra la gran sensibilidad de la rentabilidad del proyecto al precio de venta de la madera aserrada; tanto es así, que un aumento de 2 €/m³ supone un incremento de 0,5 puntos en la TIR.

Los precios umbrales de venta de la madera aserrada para que el proyecto sea rentable son de 300 €/m³ (TA₁), 270 €/m³ (TA₂) y 242 €/m³ (TA₃).

Los precios umbrales de venta de la madera aserrada para que el proyecto sea viable son de 326 €/m³ (TA₁), 296 €/m³ (TA₂) y 268 €/m³ (TA₃). En el caso de que hubiera alguna aportación de capital en el primer año de funcionamiento, el umbral de viabilidad se reduciría considerablemente. Por ejemplo, según la hipótesis TA₃, para una aportación de capital propio de 129.166 €, el valor de la TIR que haría viable el proyecto es del 10,32%, que corresponde a un precio de venta de la madera aserrada de 260 €/m³.

El precio de la madera aserrada de pino silvestre depende básicamente de su calidad y dimensiones. Según empresas del sector, el precio de la tabla de pino silvestre puede variar

entre 140 y 540 €/m³. Por este motivo es primordial el estudio de mercado de la madera aserrada para conocer un precio que asegure la rentabilidad del proyecto.

En el presente análisis se han fijado los destinos de la materia prima según el criterio de máximo valor añadido. Por este motivo, toda la astilla y serrín se vende a la industria del tablero, mientras que el resto se quema para generar energía. Pero, debido al bajo precio de la astilla para la formación de tablero en relación al precio subvencionado de la energía, se plantean dos cambios en el destino de la materia prima y se realiza el mismo análisis económico que en la hipótesis TA₃.

MP₁. Se envía astilla a quemar hasta la máxima capacidad de la planta de cogeneración de 3 MW_e. El incremento de materia prima a la planta de cogeneración es de 5.761 m³ y 3.262 m³, procedente de la astilla de la bala y del serrín, respectivamente. La producción eléctrica resultante es de 20.974 MWh_e y el precio de venta de la madera aserrada que hace rentable el proyecto es de 226 €/m³.

MP₂. Toda la biomasa no maderable se destina a la planta de cogeneración. Se redimensiona la potencia de la planta y se modifica la financiación. El incremento de materia prima a la planta de cogeneración es de 53.883 m³, procedente del serrín y de la astilla del residuo y la madera. La potencia térmica necesaria es de 21 MW y la potencia eléctrica de 6 MW con una producción eléctrica de 44.351 MWh. La financiación total requerida es de 17.594.148 € y el precio de venta de la madera aserrada que hace rentable el proyecto es de **187 €/m³**.

IV. CONCLUSIONES



TESIS: EMPACADO DISCONTINUO
A PIE DE TOCÓN DE RESIDUOS
SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL DE
BIOMASA FORESTAL

1. El peso de la clara determina la cantidad de residuo selvícola generado y éste es un parámetro importante en el rendimiento de la empacadora.
2. El diseño de las calles es imprescindible en la maniobrabilidad de la maquinaria y por lo tanto en su rendimiento.
3. El residuo selvícola generado (Rg) se puede cuantificar a partir del diámetro normal (Dn), expresado en cm, según la ecuación

$$Rg \text{ (kg/pie)} = 0,0526 * Dn^{2,4651}$$

También se puede estimar el peso en verde del Rg a partir del volumen de biomasa maderable mediante el coeficiente de generación de residuos, que tiene un valor de 0,66 t/m³.

4. Las características medias de una bala son:

| | VALOR MEDIO | UNIDAD |
|---|-------------|-------------------|
| LONGITUD | 3,1 | m |
| DIÁMETRO | 0,75 | m |
| VOLUMEN APARENTE | 1,37 | m ³ |
| PESO VERDE (Humedad = 50%) | 490 | kg |
| PESO SECA AL AIRE (Humedad = 18%) | 264 | kg |
| DENSIDAD APARENTE | 358,3 | kg/m ³ |
| DENSIDAD APARENTE SECA AL AIRE | 193 | kg/m ³ |
| DENSIDAD ESPECÍFICA SECA AL AIRE | 482 | kg/m ³ |
| COEFICIENTE DE EMPACADO | 0,4 | |
| VOLUMEN SÓLIDO | 0,55 | m ³ |
| CONTENIDO ENERGÉTICO (Humedad = 18%) | 1,06 | MWh |

Tabla 56: Resumen características medias de bala

5. La estructura de la bala permite su manipulación y almacenamiento durante grandes periodos de tiempo sin perder sus características fundamentales y sin necesidad de infraestructuras.
6. La bala está compuesta por acículas, corteza, rama fina, rama gruesa y astilla. Un 57% en peso de la bala es astilla industrial.

7. Los nutrientes que se quedan en el monte provienen del residuo no recogido y del desprendido. Las pequeñas dimensiones de estos residuos facilitan su incorporación al suelo, sobre todo en el caso del residuo desprendido con tamaño inferior a 5 mm. La cantidad de nutrientes devuelta al monte oscila entre un 41% y un 68%, dependiendo del nutriente.
8. El empacado discontinuo es un método de aprovechamiento del residuo selvícola integrable en un sistema logístico, puesto que se trata de una operación secuencial que emplea los mismos medios de producción que el transporte viario y extraviario de la madera. Por lo tanto, tiene las mismas limitaciones por condiciones del monte que el sistema mecanizado 1+1 y puede trabajar por calles con anchura de 3,5 m.
9. El rendimiento de la empacadora depende fundamentalmente de tres factores:
 - Experiencia del maquinista: es un factor determinante del rendimiento efectivo de la empacadora. Deja de ser determinante cuando el maquinista adquiere la experiencia necesaria. Este coste de aprendizaje no ocurriría si existieran en España escuelas de formación de formación profesional.
 - Efectividad de la empacadora: el número de horas efectivas de trabajo al año, como para cualquier medio de producción, es el factor determinante en la producción de la empacadora. Éste depende de los tiempos que no son efectivos y, en el caso de los ensayos, el mayor porcentaje corresponde al tiempo de averías. Estos tiempos no deberían producirse con el adecuado conocimiento de los trabajos, la máquina y su adaptación al medio.
 - Condiciones del monte: la pendiente y la cantidad de residuo selvícola son parámetros que afectan a la producción de la empacadora.
10. La empacadora puede trabajar en pendientes superiores al 30%.
11. El modelo de productividad de la empacadora es válido para predecir el número de balas por hora que se producirán en unas determinadas condiciones valoradas por los parámetros del aprovechamiento y de la empacadora. Para ajustar el modelo a condiciones no estudiadas en esta tesis, es necesario realizar ensayos de validación.
12. El empacado implica un coste adicional en el aprovechamiento de los residuos. Los mayores costes de la empacadora corresponden a la amortización y al coste del maquinista.
13. El autocargador para la saca de madera se puede emplear también para la saca de las balas.

14. El número de balas por viaje es un parámetro muy importante en la producción del autocargador, de tal forma que cualquier mejora que se hiciera para aumentar el volumen de carga conseguiría un considerable aumento en la producción.
15. El camión para el transporte de madera se puede emplear también para el transporte de las balas.
16. La limitación en la capacidad de transporte de las balas no es el peso, sino el volumen, por lo que cualquier acción dirigida a mejorar el volumen de la plataforma del camión optimizaría su transporte.
17. El empacado elimina los problemas logísticos, de almacenamiento y transporte, del residuo astillado.
18. Si se mantienen los precios de compra de biomasa como biocombustible en 24,04 €/t, el sistema de empacado solamente sería rentable si se consideran los ingresos provenientes de la Administración por la limpieza del monte.
19. Para que la inversión en la transformación industrial sea rentable, el precio de venta de la madera aserrada debe fluctuar, entre 242 y 300 €/m³.
20. Si toda la biomasa no maderable se destinara a la planta de cogeneración en vez de su venta para astilla, haría falta mayor inversión pero el proceso sería rentable con un precio de venta de la madera aserrada de 187 €/m³.

V. BIBLIOGRAFÍA



TESIS: EMPACADO DISCONTINUO
A PIE DE TOCÓN DE RESIDUOS
SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL DE
BIOMASA FORESTAL

ABELLANAS, B. 2003. *Estudio de optimización de las claras y clareos efectuados en la Sierra de Los Filabres*. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

AGUDO, R. 1999. *Abastecimiento de Materia Prima una Industria Transformadora de Productos procedentes de Tratamientos Selvícolas*. Proyecto fin de carrera. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

ANDERSSON, G.; NORDÉN, B. 1996. *Baling of logging residues: A system analysis*. Skogforsk. Stencil 06-20.

ANDERSSON, G.; NORDÉN, B.; JIRJIS, R.; ÅSTRAND, C. 2000. *Composite residue logs cut Wood-fuel costs*. Skogforsk. Results 1.

BAUMGRAS, J.; JEFF, A. 1978. *The weak link logging systems analyzer*. Forest Service, U.S. Department of Agriculture. Technical report NE-40. 63 pág.

BJÖHERDEN, R. 1995. *Forest Work Study. Nomenclature*. IUFRO WP 3.04.02. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Operational Efficiency. Garpenberg (Suecia).

CARRERAS, C.; VALERO, J. 1999. *Consideraciones sobre los tratamientos selvícolas y las repoblaciones en Almería*. Encuentro medioambiental almeriense: en busca de soluciones.

COBO, D. 1998. *Estudio de Viabilidad, Mercado y Producción para la Implantación de una Industria de Aserrío en Andalucía Oriental*. Proyecto fin de carrera. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

CUCHET, E.; ROUX, P.; SPINELLI, R. 2004. *Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France*. Biomass & Bioenergy, nº 27, pp. 31-39.

FORESTRY CONTRACTING ASSOCIATION, 2000. *Forest residue baling due diligence assessment, proving & transport trials*. Report ETSU B/U1/00589/REP. 42 pág. RU.

FRIDLEY, J. 1982. *Densifying forest biomass into large round bales*. American Society of Agricultural Engineers, nº 81, pp. 1277-1281. Michigan (EE.UU.).

GÓMEZ MENDOZA, J.; MATA OLMO, R. 2002. *Repoblación forestal y territorio (1940-1971). Marco doctrinal y estudio de la Sierra de los Filabres (Almería)*. Ería n.º 58, pp. 129-155.

GUTIÉRREZ, A.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. 1997. *Cálculo de la densidad y de las variaciones dimensionales de la madera. Equivalencias numéricas entre valores*. Montes 49, pp. 28-33.

- HAKKILA, P. 1989. *Utilization of residual forest biomass*. Ed. Springer Verlag Berliini. 568 pág.
- HAKKILA, P. 2004. *Developing technology for large scale production of forest chips*. Final report Wood Energy Technology Program 1999-2003 Tekes. 99 pág. Helsinki (Finlandia).
- KALLIO, M.; LEINONEN, A. 2005. *Production technology of forest chips in Finland*. Report PR02/P2032/05 Biosouth. VTT. 96 págs. Finlandia.
- JIMÉNEZ, P. 2000. *Aprovechamiento integral de biomasa en tres montes del sur de Suecia*. Proyecto fin de carrera. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.
- JOHANSSON, J.; LISS, J.; GULLBERG, T.; BJÖRHEDEN, R. 2006. *Transport and handling of forest energy bundles-advantages and problems*. Biomass & Bioenergy, nº 30, pp. 334-341.
- JUNTA DE ANDALUCÍA, 2003. *Ortofotografía digital de Andalucía de resolución 1 m*.
- JUNTA DE ANDALUCÍA, 2003. *Plan Energético de Andalucía 2033-2006*. Ed. Consejería de Empleo y Desarrollo Tecnológico.
- JUNTA DE ANDALUCÍA, 2005. *Modelo Digital del Terreno de Andalucía generado a partir de fotografías aéreas a escala 1:20.000*.
- JUNTA DE ANDALUCÍA, 2007. *Informe de estadística de tratamientos selvícolas en Andalucía*. www.cma.juntadeandalucia
- KÄRHÄ, K. 2007. *Machinery for forest chip production in Finland in 2007*. Metsätehon tulosalvosarja 2007/14. 37 pp. Finlandia.
- KÄRHÄ, K.; VARTIAMÄKI, T. 2006. *Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions*. Biomass & Bioenergy, nº 30, pp. 1043-1052. Helsinki (Finlandia).
- KEPNER, R. 1978. *Principles of farm machinery*. AVI Publishing, 3rd ed. Citado en Jiménez, 2000.
- KORPILAHTI, A. 2001. *Wood fuel chips production based on comminution at the heat and power plant*. En: KÄRHÄ, K.; VARTIAMÄKI, T. 2006. *Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions*. Biomass & Bioenergy, nº 30, pp. 1043-1052. Helsinki (Finlandia).
- LEHTIKANGAS, P.; JIRJIS, R. 1997. *Storage of logging residues in bales*. Proceedings of the International Conference Biomass for Energy and Industry. En: CUCHET, E.; ROUX, P.; SPINELLI, R. 2004. *Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France*. Biomass & Bioenergy, nº 27, pp. 31-39.

LERMONTOFF, A. 1970. *La medición del trabajo por el cronometraje. Curso programado*. Ed Sagitario.

LÓPEZ, E. 1998. *Aprovechamiento integral de Biomasa con apoyo de tecnología SIG en un grupo de montes repoblados*. Proyecto fin de carrera. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba.

MESÓN, M.; MONTOYA, J.M. 1993. *Selvicultura mediterránea*. Ed. Mundi Prensa.

MONTERO, G.; DEL RÍO, M.; ORTEGA, C. 2000. *Ensayo de claras en una masa natural de Pinus sylvestris en el Sistema Central*. Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales, vol. 9(1):147-168.

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M. 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. Monografías INIA: Serie forestal nº 13.

ÖHLUND, A. 2003. *Productivity study in bundling logging residues and small stems with WoodPac*. Sveriges lantbruksuniversitet, Skogsteknologi, Studentuppsatser 60.

PRADES, C. 1996. *Bases para la utilización de un sistema de aprovechamientos mecanizado de alta tecnología*. Tesis doctoral. E.T.S.I.M. Universidad Politécnica de Madrid.

PRADES, C.; RUBIO, J. 1997. *Aplicaciones de un sistema de aprovechamiento mecanizado 1+1, a claras de pináceas en montes repoblados*. Montes del futuro: Respuestas ante un mundo en cambio. Ed. SECF. Pamplona. ISBN 84-235-1589-3.

PRADES, C.; RUBIO, J. 1998. *Evolución de los medios de corta y mecanización integral de los aprovechamientos*. Revista forestal española, pp. 4-8. ISSN 1130-958X.

PRADES, C.; RUBIO, J.; LÓPEZ, A. 2000. *Valorización de la biomasa forestal*. Almírez 9, vol. VIII, pp. 57-68. ISSN 1134-1211.

PRADES, C.; RUBIO, J.; LÓPEZ, E. 1998. *Nuevas tecnologías en la industria y los aprovechamientos forestales en relación con la ordenación y la selvicultura*. Actas de la II Reunión Científica del grupo de trabajo de Ordenación de Montes de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. Córdoba. ISBN 84-921265-5-8.

PURFÜRST, J.E. 2006. *The precision of productivity models for the harvester – do we forget the human factor?*. Institute of Forest Utilization and Forest Technology, University of Technology Dresden (Germany).

ROMERO, C. 1980. *Normas prácticas para la evaluación financiera de proyectos de inversión en el sector agrario*. Ed. Mundi-Prensa. ISBN 84-7114-093-4.

RUBIO, J.; AGUDO, R.; ORTEGO, I. 2005. *Logística para el aprovechamiento de residuos selvícolas en Andalucía: tecnología y sistemas*. Actas del 1st International Congress of Energy and Environment Engineering and Management, pp. 278-279. Portalegre, Portugal.

RUBIO, J.; AGUDO, R.; LÓPEZ, E.; LÓPEZ A. 2002. *Valorización energética de residuos biomásicos: Propuesta tecnológica*. Sol, Energía e vida, pp. 102-109. ISBN 972-95854-4-X. Vilamoura, Portugal.

RUBIO, J.; AGUDO, R.; PRADES, C. 2000. *Estudio sobre viabilidad técnica y económica para la creación de un centro de desarrollo tecnológico y de una planta industrial piloto para la transformación de la biomasa procedente de los tratamientos selvícolas de montes arbolados en productos industriales de alto valor añadido y en energía eléctrica*. Grupo de Investigación de Energía y Recursos Renovables. No publicado. Córdoba (España).

RUBIO, J.; AGUDO, R.; PRADES, C. 2001. *Propuesta tecnológica y logística para aprovechamientos forestales en Andalucía oriental*. Actas del II Congreso Forestal Español, pp. 677-684. Granada.

RUBIO, J.; PRADES, C. 1997. *Industrialización de madera de pequeñas dimensiones y residuos selvícolas*. Montes del futuro: Respuestas ante un mundo en cambio. Ed. SECF. Pamplona. ISBN 84-235-1589-3.

RUBIO, J.; PRADES, C.; AGUDO, R. 2000. *Gestión integrada de la biomasa forestal: Propuesta tecnológica*. Energías Renovables y Desarrollo Sostenible Vol. I, pp. 848-859. ISBN 84-7801-636-8. Madrid.

SANZ, F.; PIÑEIRO, G. 2003. *Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. Parte I: Situación actual y evaluación de sistemas de tratamiento*. Revista CIS-Madera nº 10, pp. 6-25. Galicia (España).

TIMPERI, A. 2003. *A novel biomass fuel production technology demonstrated and tested in the different areas around Europe*. En: KÄRHÄ, K.; VARTIAMÄKI, T. 2006. *Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions*. Biomass & Bioenergy, nº 30, pp. 1043-1052.

TOLOSANA, E. 1999. *El aprovechamiento forestal mecanizado en las cortas de mejora de Pinus sylvestris L. modelos de tiempos, rendimientos y costes y estudio de sus efectos ambientales*. Tesis doctoral. E.T.S.I.M. Universidad Politécnica de Madrid.

TRAGSATEC, 2003. *Plan técnico de ordenación del grupo de montes de Gérgal*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

VIGNOTE, S.; TOLOSANA, E.; AMBROSIO, T. 2001. *Manual de gestión forestal sostenible de las primeras claras sobre repoblaciones de coníferas*. Ed. A.I.T.I.M.C.

ANEXO I: DATOS DE ENSAYOS

INVENTARIO INICIAL
INVENTARIO FINAL
RESIDUO GENERADO
CARACTERÍSTICAS DE BALAS Y RESIDUO DESPRENDIDO
ANÁLISIS DE NUTRIENTES Y PODER CALORÍFICO
PARTES DIARIOS EMPACADORA
TOMA DE TIEMPOS EMPACADORA
TRANSPORTE DE BALAS

TESIS DOCTORAL: EMPACADO
DISCONTINUO A PIE DE TOCÓN DE
RESIDUOS SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL
DE BIOMASA FORESTAL

ANEXO I: DATOS INVENTARIO INICIAL

| Especie | P. silvestre | |
|---------|--------------|--------|---------|--------------|--------|---------|--------------|--------|---------|--------------|--------|---------|--------------|--------|
| Parcela | 1 | | Parcela | 2 | | Parcela | 3 | | Parcela | 4 | | Parcela | 5 | |
| Zona | 1 | | Zona | 2 | |
| Nº | Dn | Estado |
| 1 | 13 | b | 1 | 16 | b | 1 | 13,5 | b | 1 | 16 | b | 1 | 16 | b |
| 2 | 15 | b | 2 | 17 | b | 2 | 17,5 | b | 2 | 16 | b | 2 | 14 | b |
| 3 | 15 | b | 3 | 12 | m | 3 | 13 | b | 3 | 18 | b | 3 | 16,5 | b |
| 4 | 13 | b | 4 | 15 | b | 4 | 15,5 | b | 4 | 13,5 | b | 4 | 15,5 | b |
| 5 | 15 | b | 5 | 14 | b | 5 | 16 | b | 5 | 16,5 | b | 5 | 13 | b |
| 6 | 7 | m | 6 | 16 | b | 6 | 17 | b | 6 | 16,5 | b | 6 | 15,5 | b |
| 7 | 16 | b | 7 | 16 | b | 7 | 23 | b | 7 | 16 | b | 7 | 15 | b |
| 8 | 13 | b | 8 | 17 | b | 8 | 14 | b | 8 | 18 | b | 8 | 17 | b |
| 9 | 9,5 | m | 9 | 16 | b | 9 | 16 | b | 9 | 19,5 | b | 9 | 17 | b |
| 10 | 10 | m | 10 | 15 | b | 10 | 15 | b | 10 | 18,5 | b | 10 | 9,5 | m |
| 11 | 13 | b | 11 | 16 | m | 11 | 17 | b | 11 | 20 | b | 11 | 15 | b |
| 12 | 14,5 | b | 12 | 14,5 | b | 12 | 14 | b | 12 | 17,5 | b | 12 | 11 | b |
| 13 | 17 | b | 13 | 16 | b | 13 | 23,5 | b | 13 | 20 | b | 13 | 14,5 | b |
| 14 | 13 | b | 14 | 8 | m | 14 | 20 | b | 14 | 13,5 | b | 14 | 13,5 | b |
| 15 | 11 | b | 15 | 13 | b | 15 | 7,5 | m | 15 | 18 | b | 15 | 18 | b |
| 16 | 12 | b | 16 | 19 | b | 16 | 15,5 | b | 16 | 13,5 | b | 16 | 16,5 | b |
| 17 | 16 | b | 17 | 16 | b | 17 | 15,5 | b | 17 | 13,5 | b | 17 | 10,5 | m |
| 18 | 16 | b | 18 | 18 | b | 18 | 18,5 | b | 18 | 14,5 | b | 18 | 19,5 | b |
| 19 | 12 | b | 19 | 20 | b | 19 | 21 | b | 19 | 15 | b | 19 | 17 | b |
| 20 | 10 | b | 20 | 20,5 | b | 20 | 9,5 | m | 20 | 16,5 | b | 20 | 19,5 | b |
| 21 | 16 | b | 21 | 24 | b | 21 | 17,5 | b | 21 | 15,5 | b | 21 | 13 | b |
| 22 | 15 | b | 22 | 18,5 | b | 22 | 15 | b | 22 | 16 | b | 22 | 14,5 | b |
| 23 | 8 | m | 23 | 18,5 | b | 23 | 15 | b | 23 | 17,5 | b | 23 | 13,5 | b |
| 24 | 17,5 | b | 24 | 20 | b | 24 | 15 | b | 24 | 13 | b | 24 | 17 | b |
| 25 | 11 | m | 25 | 16,5 | b | 25 | 9,5 | m | 25 | 14,5 | b | 25 | 12,5 | b |
| 26 | 18,5 | b | 26 | 15 | m | 26 | 12,5 | b | 26 | 13 | b | 26 | 15 | b |
| 27 | 17,5 | b | 27 | 15 | b | 27 | 18 | b | 27 | 12 | b | 27 | 16 | b |
| 28 | 12 | b | 28 | 7 | m | 28 | 7 | m | 28 | 17 | b | 28 | 9,5 | b |
| 29 | 16 | b | 29 | 9,5 | m | 29 | 11 | b | 29 | 13 | b | 29 | 15,5 | b |
| 30 | 11,5 | m | 30 | 15 | b | 30 | 19,5 | b | 30 | 18 | b | 30 | 21 | b |
| 31 | 15,5 | b | 31 | 15 | b | 31 | 18 | b | 31 | 15,5 | b | 31 | 14 | b |
| 32 | 13 | b | 32 | 14,5 | m | 32 | 18 | b | 32 | 18,5 | b | 32 | 19,5 | b |
| 33 | 15,5 | b | 33 | 13 | m | 33 | 19 | b | 33 | 13,5 | b | 33 | 20 | b |
| 34 | 13 | m | 34 | 13,5 | b | 34 | 21 | b | 34 | 11,5 | b | 34 | 12,5 | b |
| 35 | 16,5 | b | 35 | 16 | b | 35 | 16,5 | b | 35 | 20 | b | 35 | 15 | b |
| 36 | 7 | m | 36 | 15,5 | b | 36 | 11 | b | 36 | 16 | b | 36 | 16,5 | b |
| 37 | 9 | m | 37 | 16,5 | b | 37 | 17,5 | b | 37 | 13 | b | 37 | 23 | b |
| 38 | 15 | m | 38 | 11,5 | b | 38 | 12,5 | b | 38 | 15,5 | b | 38 | 15,5 | b |
| 39 | 12 | b | 39 | 14 | b | 39 | 16 | b | 39 | 16 | b | 39 | 15 | b |
| 40 | 11,5 | b | 40 | 16 | b | 40 | 20,5 | b | 40 | 19,5 | b | 40 | 18 | b |
| 41 | 8,5 | m | 41 | 9 | b | 41 | 12,5 | b | 41 | 18 | b | 41 | 14 | b |
| 42 | 18,5 | b | 42 | 10,5 | b | 42 | 16 | b | 42 | 19 | b | 42 | 17,5 | b |
| 43 | 11 | b | 43 | 10,5 | b | 43 | 14,5 | b | 43 | 18 | b | 43 | 16 | b |
| 44 | 13 | b | 44 | 10,5 | b | 44 | 13,5 | b | 44 | 11,5 | b | 44 | 14,5 | b |
| 45 | 17,5 | b | 45 | 10,5 | b | 45 | 12 | b | 45 | 13 | b | 45 | 14 | b |
| 46 | 14 | b | 46 | 11,5 | b | 46 | 18,5 | b | 46 | 15,5 | b | 46 | 19 | b |
| 47 | 16 | b | 47 | 12,5 | b | 47 | 19,5 | b | 47 | 20 | b | 47 | 18 | b |
| 48 | 14 | b | 48 | 13,5 | b | 48 | 11 | b | 48 | 13 | b | 48 | 19 | b |

ANEXO I: DATOS INVENTARIO INICIAL

| Especie | P. silvestre | | | | |
|---------|--------------|---|---------|--------------|---|---------|--------------|---|---------|--------------|---|---------|--------------|---|--|--|--|
| Parcela | 1 | | Parcela | 2 | | Parcela | 3 | | Parcela | 4 | | Parcela | 5 | | | | |
| Zona | 1 | | Zona | 2 | | | | |
| 49 | 11 | b | 49 | 13,5 | b | 49 | 12 | b | 49 | 13 | b | 49 | 15 | b | | | |
| 50 | 15 | b | 50 | 11,5 | b | 50 | 11 | b | 50 | 17 | b | 50 | 15 | b | | | |
| 51 | 14 | b | 51 | 9 | b | 51 | 21 | b | 51 | 13 | b | 51 | 18 | b | | | |
| 52 | 13,5 | b | 52 | 9,5 | b | | | | | | | 52 | 14,5 | b | | | |
| 53 | 17,5 | b | 53 | 9,5 | b | | | | | | | 53 | 19 | m | | | |
| 54 | 12 | m | 54 | 11,5 | b | | | | | | | 54 | 13 | m | | | |
| 55 | 12 | m | 55 | 16 | b | | | | | | | 55 | 16 | b | | | |
| 56 | 13,5 | m | 56 | 11,5 | b | | | | | | | 56 | 14,5 | b | | | |
| 57 | 17,5 | b | | | | | | | | | | 57 | 16,5 | b | | | |
| 58 | 14 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 59 | 17 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | 14 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 61 | 19 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 62 | 12 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 63 | 11 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64 | 10 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65 | 19,5 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 66 | 10 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 67 | 12 | m | | | | | | | | | | | | | | | |
| 68 | 14 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 69 | 13 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | 9,5 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 71 | 13 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 72 | 9 | m | | | | | | | | | | | | | | | |
| 73 | 13 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 74 | 13,5 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75 | 8 | m | | | | | | | | | | | | | | | |
| 76 | 12 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 77 | 12,5 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 78 | 13,5 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 79 | 12 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | 12,5 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 81 | 13,5 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 82 | 11 | b | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83 | 12,5 | m | | | | | | | | | | | | | | | |
| 84 | 16 | b | | | | | | | | | | | | | | | |

ANEXO I: DATOS INVENTARIO FINAL

| Especie | P. silvestre |
|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|
| Parcela | 1 | Parcela | 2 | Parcela | 3 | Parcela | 4 | Parcela | 5 | Parcela | 6 | Parcela | 7 |
| Zona | 1 | Zona | 1 | Zona | 2 |
| Nº | Dn |
| 1 | 17 | 1 | 15 | 1 | 19 | 1 | 15 | 1 | 18 | 1 | 21 | 1 | 17 |
| 2 | 20 | 2 | 19 | 2 | 16 | 2 | 15 | 2 | 18 | 2 | 18 | 2 | 20 |
| 3 | 16 | 3 | 13 | 3 | 18 | 3 | 18 | 3 | 15 | 3 | 17 | 3 | 15 |
| 4 | 20 | 4 | 18 | 4 | 20 | 4 | 18 | 4 | 17 | 4 | 16 | 4 | 20 |
| 5 | 15 | 5 | 12 | 5 | 15 | 5 | 17 | 5 | 14 | 5 | 20 | 5 | 19 |
| 6 | 15 | 6 | 13 | 6 | 15 | 6 | 14 | 6 | 21 | 6 | 17 | 6 | 18 |
| 7 | 20 | 7 | 13 | 7 | 17 | 7 | 16 | 7 | 18 | 7 | 23 | 7 | 20 |
| 8 | 15 | 8 | 14 | 8 | 15 | 8 | 18 | 8 | 20 | 8 | 17 | 8 | 17 |
| 9 | 17 | 9 | 14 | 9 | 13 | 9 | 18 | 9 | 18 | 9 | 19 | 9 | 18 |
| 10 | 19 | 10 | 19 | 10 | 14 | 10 | 17 | 10 | 16 | 10 | 20 | 10 | 16 |
| 11 | 17 | 11 | 16 | 11 | 19 | 11 | 15 | 11 | 20 | 11 | 20 | 11 | 14 |
| 12 | 16 | 12 | 17 | 12 | 15 | 12 | 17 | 12 | 22 | 12 | 19 | 12 | 17 |
| 13 | 19 | 13 | 16 | 13 | 13 | 13 | 14 | 13 | 16 | 13 | 25 | 13 | 15 |
| 14 | 17 | 14 | 18 | 14 | 15 | 14 | 15 | 14 | 19 | 14 | 19 | 14 | 18 |
| 15 | 16 | 15 | 18 | 15 | 15 | 15 | 18 | 15 | 17 | 15 | 21 | 15 | 17 |
| 16 | 19 | 16 | 16 | 16 | 22 | 16 | 17 | 16 | 16 | 16 | 18 | 16 | 18 |
| 17 | 16 | 17 | 18 | 17 | 14 | 17 | 17 | 17 | 16 | 17 | 18 | 17 | 20 |
| 18 | 18 | 18 | 19 | 18 | 17 | 18 | 16 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 17 |
| 19 | 14 | 19 | 16 | 19 | 20 | 19 | 17 | 19 | 20 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| 20 | 17 | 20 | 18 | 20 | 14 | 20 | 14 | 20 | 21 | 20 | 20 | 20 | 16 |
| 21 | 15 | 21 | 17 | 21 | 20 | 21 | 15 | 21 | 15 | 21 | 19 | 21 | 18 |
| 22 | 18 | 22 | 15 | | | 22 | 17 | 22 | 18 | | | 22 | 18 |
| 23 | 14 | 23 | 15 | | | 23 | 15 | 23 | 17 | | | 23 | 19 |
| 24 | 16 | 24 | 18 | | | 24 | 16 | 24 | 14 | | | | |
| 25 | 15 | 25 | 13 | | | 25 | 17 | 25 | 16 | | | | |
| 26 | 19 | 26 | 16 | | | 26 | 20 | 26 | 14 | | | | |
| | | 27 | 16 | | | 27 | 16 | 27 | 19 | | | | |
| | | | | | | 28 | 16 | 28 | 17 | | | | |
| | | | | | | 29 | 15 | 29 | 19 | | | | |
| | | | | | | 30 | 17 | | | | | | |
| | | | | | | 31 | 19 | | | | | | |

ANEXO I: DATOS RESIDUO GENERADO

| PIE NUMERO | ESPECIE | PESO RAMAS (kg) | PESO RABERON (kg) | Dn (cm) | TROZA N°1 | | | | TROZA N°2 | | | | TROZA N°3 | | | |
|---------------|--------------|-----------------------|-------------------------|------------|-----------|-------|-------|------|-----------|-------|-------|------|-----------|------|------|------|
| | | | | | D1 | D2 | Long | Peso | D1 | D2 | Long | Peso | D1 | D2 | Long | Peso |
| 1 | P. silvestre | 30 | 13,5 | 14,25 | 16,5 | 12,25 | 237,5 | 24 | 12,25 | 8 | 241,5 | 37 | | | | |
| 2 | P. silvestre | 53 | 14,5 | 18,46 | 23,75 | 16,25 | 226 | 59 | 16,25 | 12,75 | 225 | 42,5 | 12,75 | 7,5 | 262 | 22,5 |
| 3 | P. silvestre | 40 | 8 | 16,55 | 20,25 | 13 | 216,5 | 47 | 13 | 6,5 | 246 | 22 | | | | |
| 4 | P. silvestre | 49,5 | 13 | 20,37 | 22,5 | 17,5 | 250 | 75 | 17,5 | 13 | 240 | 45 | 13 | 7,5 | 213 | 20 |
| 5 | P. silvestre | 53 | 17,5 | 17,19 | 22 | 16 | 240 | 60 | 16 | 9 | 243 | 38 | | | | |
| 6 | P. silvestre | 34,5 | 22,5 | 15,6 | 19,5 | 14 | 240 | 44 | 14 | 9,5 | 241 | 32 | | | | |
| 7 | P. silvestre | 5 | 11,5 | 11,62 | 14,25 | 9,5 | 232 | 21,5 | 9,5 | 6,75 | 225,5 | 12,5 | | | | |
| 8 | P. silvestre | 10,5 | 9,5 | 10,82 | 8,75 | 7,5 | 235 | 17 | 7,5 | 6 | 217 | 10 | | | | |
| 9 | P. silvestre | 79 | 12 | 18,3 | 22,75 | 15,25 | 248,5 | 66 | 15,25 | 10,3 | 244 | 36,5 | 10,3 | 6,75 | 169 | 11,5 |
| 10 | P. silvestre | 36 | 14,5 | 19,58 | 25,25 | 15,25 | 238 | 63 | 15,25 | 10,5 | 237 | 40 | 10,5 | 7,5 | 150 | 11 |
| 11 | P. silvestre | 101 | 8 | 19,58 | 25,25 | 17 | 240 | 57 | 17 | 12 | 239 | 39 | 12 | 5,75 | 242 | 15,5 |
| 12 | P. silvestre | 26,5 | 9 | 13,85 | 18 | 12,5 | 240 | 33 | 12,5 | 6,9 | 240 | 17 | | | | |
| 13 | P. silvestre | 82 | 4,5 | 19,42 | 20,25 | 16,75 | 242 | 37 | 16,75 | 12,15 | 236 | 32 | 12,15 | 5,6 | 200 | 12 |
| 14 | P. silvestre | 9 | 16 | 12,73 | 14,25 | 10,5 | 248 | 25,5 | 10,5 | 7,1 | 244 | 16 | | | | |
| 15 | P. silvestre | 14 | 9 | 12,41 | 14,25 | 10,5 | 239 | 24 | 10,5 | 7,1 | 232 | 14 | | | | |
| 16 | P. silvestre | 57 | 6 | 17,51 | 20,25 | 14,65 | 243 | 47 | 14,65 | 10,4 | 234 | 31 | 10,4 | 5,2 | 237 | 8 |
| 17 | P. silvestre | 26,5 | 6,5 | 14,64 | 16,4 | 6,3 | 241 | 31,5 | 6,3 | 6 | 240 | 18,5 | | | | |
| 18 | P. silvestre | 33 | 7 | 15,12 | 18,1 | 11,9 | 241 | 38 | 11,9 | 6,5 | 243 | 20 | | | | |
| 19 | P. silvestre | 17 | 10 | 12,1 | 15,92 | 10,82 | 240 | 27,5 | 10,82 | 6,8 | 240 | 15 | | | | |
| 20 | P. silvestre | 13 | 10,5 | 11,46 | 18,46 | 10,5 | 240 | 25 | 10,5 | 6,68 | 240 | 16 | | | | |
| 21 | P. silvestre | 30,5 | 9 | 15,28 | 20,05 | 14,01 | 240 | 40 | 14,01 | 9,55 | 240 | 30 | | | | |
| 22 | P. silvestre | 40 | 11,5 | 15,92 | 18,14 | 13,69 | 240 | 43 | 13,69 | 7,64 | 240 | 25 | | | | |
| 23 | P. silvestre | 35 | 0 | 16,23 | 18,78 | 14,32 | 240 | 42 | 14,32 | 10,19 | 240 | 25,5 | 10,19 | 3,5 | 240 | 20 |
| 24 | P. silvestre | 72 | 9,5 | 18,78 | 25,15 | 14,64 | 240 | 62 | 14,64 | 7,64 | 240 | 20 | | | | |
| 25 | P. silvestre | 45 | 14,5 | 16,55 | 21,33 | 14,01 | 240 | 47 | 14,01 | 9,87 | 240 | 30 | | | | |
| 26 | P. silvestre | 43 | 10 | 14,64 | 19,1 | 12,73 | 240 | 37 | 12,73 | 8,91 | 240 | 20 | | | | |

ANEXO I: DATOS CARACTERÍSTICAS BALAS Y RESIDUO DESPRENDIDO

| Nº bala | Peso bala (kg) | Longitud (m) | Diámetro (m) |
|----------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 490 | 3,11 | 0,77 |
| 2 | 530 | 3,2 | 0,76 |
| 3 | 475 | 3,09 | 0,75 |
| 4 | 520 | 3,1 | 0,75 |
| 5 | 485 | 3,09 | 0,73 |
| 6 | 475 | 3,15 | 0,74 |
| 7 | 515 | 3,14 | 0,75 |
| 8 | 455 | 3,1 | 0,76 |
| 9 | 545 | 3,11 | 0,73 |
| 10 | 460 | 3,07 | 0,75 |
| 11 | 515 | 3,08 | 0,78 |
| 12 | 485 | 3,1 | 0,75 |
| 13 | 470 | 3,13 | 0,72 |
| 14 | 505 | 3,01 | 0,8 |
| 15 | 485 | 3,03 | 0,8 |
| 16 | 495 | 3,08 | 0,73 |
| 17 | 505 | 3,1 | 0,75 |
| 18 | 515 | 3,1 | 0,75 |
| 19 | 510 | 3,12 | 0,72 |
| 20 | 465 | 3,1 | 0,73 |
| 21 | 450 | 3,09 | 0,74 |
| 22 | 460 | 3,1 | 0,74 |
| 23 | 470 | 3,09 | 0,75 |
| 24 | 490 | 3,11 | 0,75 |
| 25 | 485 | 3,1 | 0,75 |
| 26 | 485 | 3,1 | 0,75 |

| Nº bala | Peso bala (kg) | Peso Residuo desprendido en plástico (kg) |
|----------------|-----------------------|--|
| 1 | 490 | 286,5 |
| 2 | 530 | 271,5 |
| 3 | 475 | 196,5 |
| 4 | 520 | 208 |
| 5 | 510 | 255 |
| 6 | 495 | 207,9 |
| 7 | 515 | 206 |
| 8 | 480 | 259,2 |
| 9 | 520 | 275,6 |
| 10 | 595 | 238 |

ANEXO I: DATOS PARTES DIARIOS EMPACADORA

| FECHA | JORNADA | HORA INICIO-HORA FIN | PARCELA | PRODUCCIÓN (balas) | TIEMPO INCIDENCIAS (min) | MOTIVO INCIDENCIAS |
|----------|-------------------------------|----------------------|---------|--------------------|--------------------------|--|
| 28/05/05 | MAÑANA | 11:00-13:00 | EPP | 8 | 30 | Repostaje gasoil, calentar y posicionamiento |
| | | | | | 15 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 10 | Colocación de balas en pilas |
| | TARDE | 18:00-21:00 | | 10 | 45 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 15 | Ajuste de la grúa |
| | | | | | 40 | Limpieza de filtros y máquina |
| 8 | Colocación de balas en pilas | | | | | |
| 30/05/05 | MAÑANA | 7:00-14:00 | EPP | 17 | 30 | Repostaje gasoil, calentar y posicionamiento |
| | | | | | 10 | Se rehace una bala |
| | | | | | 13 | Engrase de cadenas |
| | | | | | 19 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 10 | Colocación de balas en pilas |
| | TARDE | 15:30-20:00 | | 5 | 260 | Rotura de latiguillo |
| 7 | Instrucciones maquinista | | | | | |
| 31/05/05 | MAÑANA | 7:00-13:00 | EPP | 11 | 45 | Colocación de balas en pilas |
| | | | | | 35 | Colocación de residuo suelto en pila |
| | | | | | 48 | Colocación de residuo suelto en pila |
| | | | | | 65 | Instrucciones maquinista |
| | TARDE | 15:30-20:00 | | 8 | 45 | Parada por calentamiento de máquina |
| | | | | | 20 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 15 | Colocación de balas en pilas |
| 40 | Limpieza de filtros y máquina | | | | | |
| 01/06/05 | MAÑANA | 7:00-14:00 | ECN | 17 | 35 | Repostaje gasoil, calentar y posicionamiento |
| | | | | | 15 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 13 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 72 | Instrucciones maquinista |
| | TARDE | 16:00-20:00 | | 5 | 18 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 36 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 90 | Parada por calentamiento de máquina |
| 30 | Limpieza de filtros y máquina | | | | | |
| 02/06/05 | MAÑANA | 7:00-14:00 | ECN | 14 | 30 | Repostaje gasoil, calentar y posicionamiento |
| | | | | | 15 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 13 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 180 | Parada rotura latiguillo interno |
| | | | | | 32 | Parada para ampliar calle |
| | TARDE | 15:30-20:00 | | 0 | 270 | Reparación latiguillo de grúa |
| 03/06/05 | MAÑANA | 7:00-14:00 | ECN | 0 | 350 | Reparación latiguillo de grúa |
| | TARDE | 15:00-20:00 | | 11 | 60 | Reparación latiguillo de grúa |
| | | | | | 16 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 24 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 40 | Limpieza de filtros y máquina |
| 04/06/05 | MAÑANA | 8:00-13:30 | ECN | 14 | 30 | Repostaje gasoil, calentar y posicionamiento |
| | | | | | 15 | Parada para desayuno |
| | | | | | 13 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 12 | Instrucciones maquinista |
| | TARDE | 15:00-18:00 | | 2 | 8 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 6 | Instrucciones Maquinista |
| | | | | | 75 | Parada por calentamiento de máquina |
| | | | | | 35 | Parada para puenteador ventilador |
| | | | | | 40 | Limpieza de filtros y maquina |

ANEXO I: DATOS PARTES DIARIOS EMPACADORA

| FECHA | JORNADA | HORA INICIO-HORA FIN | PARCELA | PRODUCCIÓN (balas) | TIEMPO INCIDENCIAS (min) | MOTIVO INCIDENCIAS |
|----------|---------|----------------------|---------|-------------------------------|--------------------------|---|
| 06/06/05 | MAÑANA | 7:00-13:30 | ECN | 15 | 35 | Calentar y posicionamiento |
| | | | | | 5 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 95 | Reparación: puenteado y cambio de hilos |
| | | | | | 2 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 4 | Maniobras extras por calle |
| | TARDE | 14:30-18:30 | | 9 | 9 | Instrucciones maquinista |
| | | | | | 12 | Se rehace una bala |
| | | | | | 6 | Salida de cadena de grapa |
| | | | 25 | Limpieza de filtros y máquina | | |
| 07/06/05 | MAÑANA | 7:00-13:30 | ECN | 11 | 16 | Calentar y posicionamiento |
| | | | | | 10 | Parada por calentamiento de máquina |
| | | | | | 120 | Parada para ampliar calle |
| | | | | | 5 | Instrucciones maquinista |
| | TARDE | 15:30-19:00 | | 8 | 10 | Parada por calentamiento de máquina |
| | | | | | 11 | Repostaje gasoil |
| | | | | | 30 | Limpieza de filtros y máquina |
| | | | 5 | Instrucciones maquinista | | |
| 08/06/05 | MAÑANA | 7:00-13:15 | ECN | 17 | 10 | Repostaje gasoil |
| | | | | | 25 | Calentar y posicionamiento |
| | | | | | 2 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 4 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 4 | Maniobras extras por calle |
| | | | | | 3 | Instrucciones maquinista |
| | TARDE | 16:00-19:00 | | 8 | 45 | Parada por Visita |
| | | | | | 32 | Desplazamiento excepcional de calle |
| | | | | | 4 | Salida de cadena de grapa |
| | | | | | 15 | Se rehace una bala |
| | | | 10 | Repostaje gasoil | | |
| | | | 25 | Limpieza de filtros y máquina | | |
| 09/06/05 | MAÑANA | 7:00-15:00 | ECN | 26 | 18 | Calentar y posicionamiento |
| | | | | | 3 | Desplazamiento excepcional de calle |
| | | | | | 30 | Visita |
| | | | | | 80 | Visita |
| | | | | | 10 | Parada para quitar piedra en la grapa |
| | | | | | 3 | Problema en corte de hilos |
| | | | | | 4 | Instrucciones maquinista |
| | TARDE | 16:30-20:00 | | 8 | 4 | Salida de cadena |
| | | | | | 23 | Repostaje gasoil |
| | | | 30 | Limpieza de filtros y máquina | | |
| | | | 10 | Repostaje gasoil | | |
| 10/06/05 | MAÑANA | 7:00-14:00 | ECN | 28 | 21 | Calentar y posicionamiento |
| | | | | | 14 | Se rehace una bala |
| | | | | | 3 | Necesidad personal maquinista |
| | | | | | 10 | Parada por calentamiento de máquina |
| | TARDE | 16:30-20:00 | | 11 | 7 | Desplazamiento de maquina a monte |
| | | | | | 30 | Limpieza de filtros y máquina |
| | | | 10 | Repostaje gasoil | | |

ANEXO I: DATOS PARTES DIARIOS EMPACADORA

| FECHA | JORNADA | HORA INICIO-HORA FIN | PARCELA | PRODUCCIÓN (balas) | TIEMPO INCIDENCIAS (min) | MOTIVO INCIDENCIAS | |
|----------|-------------------------------------|----------------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 11/06/05 | MAÑANA | 8:00-14:00 | ECN | 26 | 15 | Calentar y posicionamiento | |
| | | | | | 60 | Parada para cambio de rollos de hilo | |
| | | | | | 3 | Necesidad personal maquinista | |
| | TARDE | 16:00-19:00 | | 0 | 170 | Limpieza de filtros y máquina, engrase y Visita | |
| | | | | | 10 | Repostaje gasoil | |
| 13/06/05 | MAÑANA | 7:00-14:00 | ECN | 36 | 15 | Calentar y posicionamiento | |
| | | | | | 4 | Salida de cadena | |
| | | | | | 3 | Necesidad personal maquinista | |
| | | | | | 45 | Visita | |
| | | | | | 5 | Instrucciones maquinista | |
| | TARDE | 16:00-19:00 | | 11 | 20 | Repostaje gasoil | |
| | | | | | 5 | Necesidad personal maquinista | |
| | | | | | 10 | Parada por calentamiento de máquina | |
| 12 | Cambio de hilos | | | | | | |
| 14/06/05 | MAÑANA | 7:00-14:00 | ECN | 10 | 25 | Calentar y posicionamiento | |
| | | | | | 350 | Rotura latiguillo interno pluma | |
| | TARDE | 16:00-21:00 | | 0 | 350 | Reparación del Latiguillo interno | |
| 15/06/05 | MAÑANA | 9:40-14:30 | ECN | 9 | 30 | Parada para quitar piedra en la grapa | |
| | | | | | 160 | Visita | |
| | TARDE | 16:30-19:00 | | 9 | 35 | Desplazamiento excepcional de calle | |
| | | | | | 25 | Se rehace una bala | |
| | | | | | 125 | Ensayo caracterización residuo selvícola | |
| | | | | | 10 | Repostaje gasoil | |
| | | | | | 20 | Limpieza de filtros y máquina | |
| 17/06/05 | MAÑANA | 7:30-11:30 | EMP | 9 | 14 | Calentar y posicionamiento | |
| | | | | | 5 | Parada por calentamiento de máquina | |
| | | | | | 10 | Parada para nivelación de la grúa | |
| | | | | | 5 | Parada por calentamiento de máquina | |
| | | 50 | | Parada por calentamiento de máquina | | | |
| | 11:30-13:30 | ECN | 4 | 40 | Desplazamiento hasta parcela ECN | | |
| | | | | 10 | Parada por calentamiento de máquina | | |
| | TARDE | 16:00-19:30 | ECN | 16 | 10 | Parada por calentamiento de máquina | |
| | | | | | 11 | Repostaje gasoil | |
| 30 | | | | | Limpieza de filtros y máquina | | |
| 18/06/05 | MAÑANA | 7:00-11:00 | EMP | 6 | 20 | Calentar y posicionamiento | |
| | | | | | 44 | Parada por calentamiento de máquina | |
| | | | | | 255 | Saca de madera | |
| | | | | | 20 | Parada por calentamiento de máquina | |
| | | | | | 10 | Instrucciones maquinista | |
| | TARDE | 16:30-21:00 | | ECN | 20 | 20 | Repostaje gasoil |
| | | | | | | 30 | Parada por calentamiento de máquina |
| 30 | Parada por calentamiento de máquina | | | | | | |
| 19/06/05 | MAÑANA | 7:30-10:05 | ECN | 11 | 35 | Calentar y posicionamiento | |
| | | | | | 5 | Necesidad personal maquinista | |
| | | | | | 3 | Necesidad personal maquinista | |

ANEXO I: DATOS LABORATORIO ANÁLISIS DE NUTRIENTES Y PODER CALORÍFICO

| MUESTRA | Humedad | Materia Orgánica | Nitrógeno Total | Fósforo Total | Magnesio | Calcio | Potasio | Sulfatos | Poder Calorífico |
|--|---------|------------------|-----------------|---------------|----------|--------|---------|----------|------------------|
| | % | % | % | % | mg/Kg | mg/Kg | mg/Kg | mg/Kg | J/gr |
| Residuo suelto 1 Alicuota A | 45,3 | 96,7 | 0,18 | <0,10 | 1.072 | 3.388 | 3.896 | 103 | |
| Residuo suelto 1 Alicuota B | 42,2 | 97,5 | 0,13 | 0,12 | 1.104 | 2.979 | 4.226 | 92 | |
| Residuo suelto 1 Alicuota C | 44,2 | 97,2 | 0,72 | <0,10 | 1.031 | 3.325 | 3.964 | 70 | |
| Residuo suelto 2 Alicuota A | 46,0 | 97,5 | 0,30 | <0,10 | 1.545 | 4.539 | 4.042 | 45 | |
| Residuo suelto 2 Alicuota B | 44,5 | 97,6 | 0,29 | <0,10 | 938 | 3.575 | 2.241 | 62 | |
| Residuo suelto 2 Alicuota C | 45,6 | 97,1 | 0,46 | 0,16 | 989 | 3.850 | 3.022 | 43 | |
| Residuo suelto 3 Alicuota A | 45,6 | 96,1 | 0,41 | <0,10 | 1.267 | 3.478 | 3.861 | 110 | |
| Residuo suelto 3 Alicuota B | 47,7 | 97,4 | 0,54 | <0,10 | 747 | 2.924 | 2.118 | 130 | |
| Residuo suelto 3 Alicuota C | 47,7 | 96,9 | 0,65 | 0,11 | 1.009 | 4.701 | 3.292 | 126 | |
| Residuo suelto 4 Alicuota A | 39,9 | 97,8 | 0,12 | <0,10 | 1.473 | 6.178 | 3.901 | 78 | |
| Residuo suelto 4 Alicuota B | 39,3 | 95,4 | 0,50 | <0,10 | 808 | 289 | 2.907 | 68 | |
| Residuo suelto 4 Alicuota C | 40,7 | 96,6 | 0,32 | <0,10 | 930 | 4.700 | 2.523 | 98 | |
| Residuo Empacado PACA 1 Bolsa 1 Alicuota A | 43,6 | 96,1 | 0,57 | <0,10 | 1.026 | 8.163 | 4.218 | 141 | |
| Residuo Empacado PACA 1 Bolsa 1 Alicuota B | 44,2 | 96,1 | 0,73 | 0,14 | 1.033 | 4.289 | 3.320 | 141 | |
| Residuo Empacado PACA 1 Bolsa 1 Alicuota C | 39,5 | 95,5 | 0,75 | 0,10 | 1.161 | 4.638 | 3.520 | 110 | |
| Residuo Empacado PACA 1 Bolsa 2 Alicuota A | 44,4 | 95,5 | 0,46 | 0,10 | 1.393 | 5.461 | 3.463 | 107 | |
| Residuo Empacado PACA 1 Bolsa 2 Alicuota B | 40,2 | 96,3 | 0,50 | <0,10 | 1.261 | 4.475 | 3.765 | 105 | |
| Residuo Empacado PACA 1 Bolsa 2 Alicuota C | 39,9 | 95,6 | 0,47 | 0,14 | 1.592 | 3.892 | 5.634 | 83 | |
| Residuo Empacado PACA 2 Bolsa 1 Alicuota A | 46,9 | 96,2 | 0,76 | 0,15 | 1.244 | 4.418 | 3.871 | 127 | |
| Residuo Empacado PACA 2 Bolsa 1 Alicuota B | 47,1 | 96,3 | 0,48 | 0,10 | 1.324 | 4.810 | 4.006 | 182 | |
| Residuo Empacado PACA 2 Bolsa 1 Alicuota C | 45,7 | 96,9 | 0,60 | 0,15 | 1.077 | 3.399 | 3.472 | 80 | |
| Residuo Empacado PACA 2 Bolsa 2 Alicuota A | 46,3 | 95,8 | 0,95 | <0,10 | 1.191 | 5.072 | 4.106 | 190 | |
| Residuo Empacado PACA 2 Bolsa 2 Alicuota B | 43,4 | 95,2 | 0,57 | 0,12 | 1.370 | 4.861 | 4.134 | 104 | |
| Residuo Empacado PACA 2 Bolsa 2 Alicuota C | 45,7 | 96,2 | 0,04 | 0,10 | 1.125 | 4.125 | 3.631 | 120 | |
| Residuo Empacado PACA 3 Bolsa 1 Alicuota A | 42,0 | 95,4 | 0,55 | 0,12 | 1.295 | 3.018 | 4.700 | 90 | |
| Residuo Empacado PACA 3 Bolsa 1 Alicuota B | 41,8 | 96,5 | 0,64 | 0,15 | 1.090 | 3.079 | 3.166 | 114 | |
| Residuo Empacado PACA 3 Bolsa 1 Alicuota C | 44,7 | 96,1 | 0,68 | 0,15 | 875 | 2.846 | 3.615 | 113 | |
| Residuo Empacado PACA 3 Bolsa 2 Alicuota A | 41,5 | 95,7 | 0,14 | 0,11 | 1.170 | 3.120 | 4.696 | 108 | |
| Residuo Empacado PACA 3 Bolsa 2 Alicuota B | 41,8 | 97,9 | 0,66 | <0,10 | 1.009 | 4.007 | 3.804 | 68 | |
| Residuo Empacado PACA 3 Bolsa 2 Alicuota C | 41,4 | 95,9 | 0,86 | <0,10 | 1.067 | 4.421 | 3.685 | 78 | |
| Residuo de PACA 1 Alicuota A | 47,1 | 96,5 | 0,55 | <0,10 | 871 | 3.614 | 3.992 | 94 | 9.556 |
| Residuo de PACA 1 Alicuota B | 40,8 | 96,9 | 1,06 | <0,10 | 1.219 | 5.234 | 3.684 | 112 | 12.519 |
| Residuo de PACA 1 Alicuota C | 46,5 | 96,9 | 1,08 | <0,10 | 1.365 | 5.318 | 3.183 | 66 | 11.090 |
| Residuo de PACA 2 Alicuota A | 45,8 | 97,3 | 0,60 | <0,10 | 961 | 3.121 | 2.663 | 306 | 10.454 |
| Residuo de PACA 2 Alicuota B | 44,0 | 97,2 | 0,63 | <0,10 | 996 | 4.087 | 3.257 | 262 | 10.875 |
| Residuo de PACA 2 Alicuota C | 48,8 | 97,4 | 0,54 | 0,11 | 1.231 | 5.137 | 3.560 | 273 | 10.874 |
| Residuo de PACA 3 Alicuota A | 37,5 | 97,6 | 0,67 | 0,11 | 1.058 | 4.018 | 4.149 | 233 | 12.553 |
| Residuo de PACA 3 Alicuota B | 41,6 | 96,4 | 0,68 | 0,11 | 1.045 | 2.925 | 3.336 | 196 | 12.861 |
| Residuo de PACA 3 Alicuota C | 37,6 | 96,2 | 0,43 | <0,10 | 1.006 | 4.127 | 2.903 | 257 | 12.354 |

ANEXO I: DATOS DE TOMA DE TIEMPOS DE EMPACADORA

| Nº DE MOVIMIENTOS DE GRÚA | | | | |
|---------------------------|-----|----|----|-----|
| EPP | ECN | | | EPP |
| 7 | 28 | 16 | 20 | 11 |
| 10 | 13 | 14 | 10 | 15 |
| 10 | 19 | 14 | 21 | 13 |
| 12 | 19 | 10 | 11 | 12 |
| 9 | 17 | 13 | 14 | 11 |
| 10 | 20 | 11 | 18 | 13 |
| 8 | 23 | 15 | 12 | 12 |
| 10 | 22 | 18 | 14 | 13 |
| 7 | 15 | 15 | 20 | 14 |
| 7 | 19 | 9 | 12 | 14 |
| 10 | 17 | 15 | 10 | 11 |
| 8 | 13 | 14 | 13 | 13 |
| 9 | 21 | 10 | 14 | 15 |
| 10 | 23 | 13 | 10 | 15 |
| 8 | 10 | 29 | 12 | 10 |
| 7 | 14 | 14 | 15 | |
| 9 | 17 | 18 | 13 | |
| 10 | 19 | 10 | 11 | |
| 8 | 10 | 15 | 13 | |
| 10 | 10 | 10 | 10 | |
| 7 | 21 | 15 | 13 | |
| 9 | 17 | 15 | 13 | |
| 9 | 13 | 18 | 13 | |
| 10 | 17 | 14 | 12 | |
| | 16 | 12 | 14 | |
| | 22 | 16 | 13 | |
| | 16 | 18 | 16 | |
| | 13 | 17 | 11 | |
| | 12 | 12 | 16 | |
| | 15 | 15 | 17 | |
| | 17 | 12 | 10 | |
| | 16 | 11 | 14 | |
| | 15 | 15 | 24 | |
| | 17 | 15 | 17 | |
| | 19 | 11 | 15 | |
| | 21 | 12 | 15 | |
| | 14 | 11 | | |

ANEXO I: DATOS DE TOMA DE TIEMPOS DE EMPACADORA

| ECN | | | | | | | | | EPP | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Distancia entre pilas (m) | Tiempo de desplazamiento (s) | Velocidad de desplazamiento (m/s) | Distancia entre pilas (m) | Tiempo de desplazamiento (s) | Velocidad de desplazamiento (m/s) | Distancia entre pilas (m) | Tiempo de desplazamiento (s) | Velocidad de desplazamiento (m/s) | Distancia entre pilas (m) | Tiempo de desplazamiento (s) | Velocidad de desplazamiento (m/s) |
| 4 | 137 | 0,029 | 5 | 36 | 0,139 | 19 | 51 | 0,373 | 5 | 70 | 0,071 |
| 12 | 89 | 0,135 | 7 | 20 | 0,350 | 7 | 37 | 0,189 | 14 | 163 | 0,086 |
| 7 | 117 | 0,060 | 12 | 30 | 0,400 | 8 | 33 | 0,242 | 7 | 80 | 0,088 |
| 2 | 38 | 0,053 | 10 | 11 | 0,909 | 20 | 17 | 1,176 | 3 | 15 | 0,200 |
| 12 | 65 | 0,185 | 5 | 22 | 0,227 | 8 | 21 | 0,381 | 7 | 42 | 0,167 |
| 8 | 90 | 0,089 | 9 | 19 | 0,474 | 10 | 11 | 0,909 | 5 | 26 | 0,192 |
| 11 | 155 | 0,071 | 5 | 10 | 0,500 | 11 | 49 | 0,224 | 6 | 85 | 0,071 |
| 10 | 40 | 0,250 | 5 | 20 | 0,250 | 15 | 87 | 0,172 | 5 | 90 | 0,056 |
| 7 | 25 | 0,280 | 5 | 20 | 0,250 | 11 | 46 | 0,239 | 7 | 95 | 0,074 |
| 9 | 27 | 0,333 | 5 | 10 | 0,500 | 9 | 71 | 0,127 | 5 | 80 | 0,063 |
| 6 | 48 | 0,125 | 3 | 22 | 0,136 | 11 | 77 | 0,143 | 8 | 105 | 0,076 |
| 10 | 170 | 0,059 | 3 | 6 | 0,500 | 12 | 60 | 0,200 | 9 | 105 | 0,086 |
| 11 | 27 | 0,407 | 2 | 49 | 0,041 | 12 | 60 | 0,200 | | | |
| 13 | 32 | 0,406 | 6 | 15 | 0,400 | 17 | 60 | 0,283 | | | |
| 11 | 62 | 0,177 | 6 | 30 | 0,200 | 22 | 60 | 0,367 | | | |
| 8 | 30 | 0,267 | 8 | 70 | 0,114 | 12 | 120 | 0,100 | | | |
| 8 | 30 | 0,267 | 8 | 20 | 0,400 | 5 | 180 | 0,028 | | | |
| 8 | 54 | 0,148 | 5 | 30 | 0,167 | 20 | 60 | 0,333 | | | |
| 9 | 30 | 0,300 | 5 | 35 | 0,143 | 7 | 20 | 0,350 | | | |
| 7 | 40 | 0,175 | 5 | 40 | 0,125 | 4 | 11 | 0,364 | | | |
| 6 | 60 | 0,100 | 4 | 38 | 0,105 | 6 | 17 | 0,353 | | | |
| 6 | 60 | 0,100 | 10 | 27 | 0,370 | 17 | 88 | 0,193 | | | |
| 10 | 60 | 0,167 | 3 | 18 | 0,167 | 10 | 60 | 0,167 | | | |
| 6 | 60 | 0,100 | 7 | 26 | 0,269 | 8 | 10 | 0,800 | | | |
| 10 | 67 | 0,149 | 7 | 45 | 0,156 | 19 | 112 | 0,170 | | | |
| 14 | 60 | 0,233 | 7 | 13 | 0,538 | 10 | 14 | 0,714 | | | |
| 2 | 60 | 0,033 | 11 | 10 | 1,100 | 12 | 22 | 0,545 | | | |
| 10 | 60 | 0,167 | 13 | 16 | 0,813 | 4 | 2 | 2,000 | | | |
| 6 | 120 | 0,050 | 10 | 10 | 1,000 | 15 | 41 | 0,366 | | | |
| 15 | 180 | 0,083 | 3 | 17 | 0,176 | 10 | 8 | 1,250 | | | |
| 5 | 60 | 0,083 | 8 | 10 | 0,800 | 12 | 44 | 0,273 | | | |
| 9 | 120 | 0,075 | 7 | 30 | 0,233 | 9 | 60 | 0,150 | | | |
| 10 | 180 | 0,056 | 6 | 10 | 0,600 | 5 | 60 | 0,083 | | | |
| 9 | 180 | 0,050 | 13 | 54 | 0,241 | 12 | 53 | 0,226 | | | |
| 30 | 180 | 0,167 | 9 | 4 | 2,250 | 11 | 10 | 1,100 | | | |
| 6 | 120 | 0,050 | 8 | 88 | 0,091 | 8 | 31 | 0,258 | | | |
| 9 | 60 | 0,150 | 6 | 24 | 0,250 | 10 | 36 | 0,278 | | | |
| 7 | 60 | 0,117 | 7 | 40 | 0,175 | 9 | 13 | 0,692 | | | |
| 13 | 60 | 0,217 | 12 | 40 | 0,300 | 14 | 202 | 0,069 | | | |
| 5 | 60 | 0,083 | 8 | 20 | 0,400 | 10 | 41 | 0,244 | | | |
| 10 | 60 | 0,167 | 5 | 33 | 0,152 | 18 | 10 | 1,800 | | | |
| 6 | 60 | 0,100 | 11 | 48 | 0,229 | 10 | 36 | 0,278 | | | |
| 12 | 53 | 0,226 | 13 | 26 | 0,500 | 8 | 25 | 0,320 | | | |
| 6 | 14 | 0,429 | 8 | 64 | 0,125 | 12 | 14 | 0,857 | | | |
| 8 | 53 | 0,151 | 15 | 35 | 0,429 | 10 | 56 | 0,179 | | | |
| 4 | 14 | 0,286 | 5 | 15 | 0,333 | 10 | 22 | 0,455 | | | |
| 9 | 7 | 1,286 | 8 | 37 | 0,216 | 11 | 14 | 0,786 | | | |
| 8 | 30 | 0,267 | 2 | 11 | 0,182 | 12 | 12 | 1,000 | | | |
| 5 | 50 | 0,100 | 2 | 36 | 0,056 | 7 | 54 | 0,130 | | | |
| 9 | 37 | 0,243 | 7 | 22 | 0,318 | 11 | 30 | 0,367 | | | |
| 12 | 11 | 1,091 | 7 | 12 | 0,583 | 7 | 20 | 0,350 | | | |
| 13 | 25 | 0,520 | 4 | 20 | 0,200 | 8 | 48 | 0,167 | | | |
| 27 | 37 | 0,730 | 2 | 60 | 0,033 | 8 | 109 | 0,073 | | | |
| 10 | 15 | 0,667 | 2 | 22 | 0,091 | 8 | 20 | 0,400 | | | |
| 6 | 13 | 0,462 | 3 | 40 | 0,075 | 11 | 17 | 0,647 | | | |
| 7 | 28 | 0,250 | 18 | 93 | 0,194 | 24 | 120 | 0,200 | | | |
| 12 | 49 | 0,245 | 7 | 70 | 0,100 | 4 | 60 | 0,067 | | | |
| 13 | 26 | 0,500 | 12 | 16 | 0,750 | 11 | 19 | 0,579 | | | |
| 6 | 20 | 0,300 | 22 | 87 | 0,253 | 16 | 76 | 0,211 | | | |
| 7 | 20 | 0,350 | 20 | 57 | 0,351 | | | | | | |

ANEXO I: DATOS DE TOMA DE TIEMPOS DE EMPACADORA

| TIEMPO DE CICLO DE EMPACADO (s) | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|
| EPP | ECN | | | EPP |
| 600 | 1079 | 646 | 660 | 399 |
| 685 | 875 | 470 | 444 | 649 |
| 890 | 1084 | 603 | 731 | 1040 |
| 670 | 1117 | 615 | 761 | 1800 |
| 910 | 1120 | 645 | 600 | 1380 |
| 1100 | 1056 | 543 | 600 | |
| 980 | 1308 | 705 | 720 | |
| 855 | 906 | 560 | 453 | |
| 750 | 790 | 488 | 629 | |
| 980 | 593 | 502 | 1026 | |
| | 1440 | 390 | 432 | |
| | 1140 | 585 | 480 | |
| | 1080 | 1886 | 831 | |
| | 1020 | 843 | 539 | |
| | 1168 | 801 | 747 | |
| | 666 | 416 | 704 | |
| | 784 | 643 | 575 | |
| | 858 | 796 | 812 | |
| | 473 | 722 | 600 | |
| | 860 | 548 | 650 | |
| | 828 | 893 | 632 | |
| | 751 | 701 | 760 | |
| | 898 | 440 | 732 | |
| | 712 | 636 | 426 | |
| | 845 | 628 | 724 | |
| | 706 | 365 | 842 | |
| | 510 | 598 | 703 | |
| | 474 | 833 | 1091 | |
| | 529 | 553 | 640 | |
| | 682 | 534 | 573 | |
| | 794 | 420 | 783 | |
| | 507 | 660 | 607 | |
| | 840 | 537 | 454 | |
| | 840 | 478 | 547 | |
| | 1200 | 663 | 587 | |
| | 960 | 610 | 618 | |
| | 660 | 480 | 1140 | |
| | 1140 | 868 | 600 | |
| | 1200 | 617 | 840 | |
| | 600 | 575 | 708 | |
| | 600 | 338 | | |
| | 652 | 978 | | |

ANEXO I: DATOS DE TOMA DE TIEMPOS DE EMPACADORA

| TIEMPO DE ALIMENTACIÓN (s) | | | | | | |
|----------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| EPP | | ECN | | | | EPP |
| 62 | 64 | 36 | 26 | 22 | 26 | 45 |
| 57 | 46 | 41 | 60 | 24 | 26 | 49 |
| 60 | 75 | 17 | 86 | 30 | 33 | 57 |
| 37 | 77 | 45 | 44 | 28 | 27 | 43 |
| 32 | 51 | 50 | 105 | 51 | 44 | 55 |
| 40 | 66 | 40 | 50 | 16 | 32 | 65 |
| 52 | 53 | 40 | 37 | 73 | 48 | 46 |
| 51 | 47 | 47 | 35 | 46 | 113 | 64 |
| 40 | 64 | 75 | 45 | 89 | 35 | 59 |
| 49 | 55 | 49 | 43 | 23 | 38 | 64 |
| 30 | 55 | 45 | 77 | 50 | 45 | 102 |
| 48 | 44 | 57 | 41 | 48 | 34 | 70 |
| 39 | 51 | 54 | 23 | 29 | 26 | 38 |
| 44 | 52 | 40 | 42 | 28 | 30 | 40 |
| 58 | 40 | 37 | 61 | 91 | 74 | 30 |
| 42 | 55 | 34 | 43 | 103 | 36 | 40 |
| 63 | 64 | 47 | 47 | 40 | 80 | 51 |
| 29 | 45 | 50 | 51 | 16 | 51 | 39 |
| 46 | 53 | 68 | 33 | 23 | 44 | |
| 51 | 79 | 36 | 47 | 20 | 30 | |
| 51 | 64 | 39 | 33 | 52 | 33 | |
| 23 | 64 | 30 | 31 | 68 | 21 | |
| 36 | 60 | 29 | 23 | 36 | 42 | |
| 66 | 46 | 30 | 58 | 33 | 11 | |
| 36 | 64 | 45 | 36 | 65 | 76 | |
| 59 | 89 | 48 | 55 | 19 | 32 | |
| 31 | 42 | 30 | 57 | 24 | 28 | |
| 48 | 58 | 15 | 33 | 48 | 20 | |
| 54 | 44 | 24 | 70 | 19 | 39 | |
| 68 | 61 | 24 | 118 | 28 | 42 | |
| 42 | 60 | 30 | 70 | 66 | 31 | |
| 34 | 56 | 20 | 82 | 33 | 42 | |
| 52 | 60 | 84 | 44 | 21 | 42 | |
| 58 | 51 | 60 | 24 | 53 | 30 | |
| 65 | 59 | 40 | 38 | 51 | 28 | |
| 43 | 71 | 30 | 25 | 41 | 38 | |
| 65 | 70 | 60 | 20 | 40 | 37 | |
| 34 | 71 | 45 | 58 | 28 | 31 | |
| 77 | 57 | 38 | 30 | 29 | 22 | |
| 34 | 68 | 40 | 54 | 32 | 48 | |
| 50 | 42 | 36 | 32 | 36 | 30 | |
| 39 | 49 | 33 | 20 | 41 | 38 | |
| 51 | 67 | 15 | 37 | 23 | 39 | |
| 36 | 48 | 40 | 39 | 47 | 66 | |
| 48 | 80 | 45 | 42 | 39 | 22 | |
| 66 | 40 | 39 | 34 | 20 | 31 | |
| 30 | 44 | 20 | 25 | 80 | 34 | |
| 58 | 77 | 46 | 44 | 54 | 47 | |
| 42 | 76 | 36 | 46 | 26 | 43 | |
| 71 | 66 | 43 | 30 | 26 | 30 | |
| 32 | 52 | 30 | 29 | 29 | 34 | |
| 79 | | 33 | 39 | 30 | 50 | |
| | | 31 | 46 | 40 | 45 | |
| | | 61 | 42 | 26 | 50 | |
| | | 39 | 36 | 50 | 180 | |
| | | 32 | 31 | 34 | 40 | |
| | | 44 | 48 | 30 | 41 | |
| | | 49 | 25 | 46 | 20 | |
| | | 19 | 75 | 39 | 54 | |
| | | 42 | 33 | 36 | 56 | |
| | | 35 | 40 | 37 | 39 | |
| | | 45 | 43 | 35 | 42 | |

ANEXO I: DATOS TRANSPORTE DE BALAS

| SEGUIMIENTO VIAJES DE AUTOCARGADOR EN LA SACA DE BALAS | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|----------|-------------|------------------------|-------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Nº VIAJE | CARGA (balas) | DISTANCIA (m) | | | TIEMPO (s) | | | | |
| | | A monte | Cargando | A cargadero | Desplazamiento a monte | Desplazamiento cargando | Carga | Desplazamiento a cargadero | Descarga |
| 1 | 9 | 0 | 236 | 250 | 0 | 256 | 246 | 294 | 214 |
| 2 | 8 | 506 | 139 | 0 | 447 | 178 | 171 | 0 | 160 |
| 3 | 7 | 253 | 169 | 301 | 133 | 197 | 209 | 300 | 201 |
| 4 | 7 | 332 | 109 | 180 | 288 | 148 | 170 | 143 | 180 |
| 5 | 10 | 181 | 355 | 130 | 136 | 425 | 234 | 140 | 228 |
| 6 | 6 | 86 | 266 | 96 | 60 | 272 | 96 | 64 | 184 |
| 7 | 7 | 107 | 345 | 158 | 103 | 329 | 135 | 118 | 126 |
| 8 | 7 | 256 | 133 | 179 | 241 | 125 | 154 | 126 | 140 |
| 9 | 6 | 246 | 93 | 170 | 232 | 88 | 112 | 102 | 133 |
| 10 | 9 | 366 | 170 | 168 | 299 | 180 | 210 | 164 | 210 |
| 11 | 10 | 328 | 212 | 587 | 230 | 250 | 271 | 366 | 239 |

| TRANSPORTE VIARIO DE BALAS | | | |
|----------------------------|------------------|-----------|----------|
| FECHA salida | MODELO DE CAMIÓN | PESO (kg) | Nº BALAS |
| 08/09/2005 | I | 12430 | 48 |
| 28/09/2005 | I | 12640 | 48 |
| 28/09/2005 | II | 15160 | 57 |
| 29/09/2005 | I | 12730 | 48 |
| 29/09/2005 | II | 16200 | 57 |
| 13/10/2005 | II | 14860 | 57 |
| 13/10/2005 | I | 12460 | 48 |
| 14/10/2005 | II | 14200 | 53 |
| 14/10/2005 | I | 11600 | 47 |

ANEXO II: MODELOS DE PRODUCTIVIDAD Y COSTES DE PROCESADORA Y AUTOCARGADOR

TESIS DOCTORAL: EMPACADO
DISCONTINUO A PIE DE TOCÓN DE
RESIDUOS SELVÍCOLAS: GESTIÓN INTEGRAL
DE BIOMASA FORESTAL

ANEXO II: MODELOS DE PRODUCTIVIDAD Y COSTES DE PROCESADORA Y AUTOCARGADOR

| MODELOS DE PRODUCTIVIDAD DE PROCESADORA Y AUTOCARGADOR (SACA DE MADERA) | | | | | | | | | |
|---|---|---------|-------|--------------------------------|--|---------|-------------------|---------------------|---|
| | PARÁMETRO | SÍMBOLO | VALOR | UNIDAD | RESULTADO | SÍMBOLO | VALOR | UNIDAD | ALGORITMO DE CÁLCULO |
| APROVECHAMIENTO | Superficie anual | S | 3079 | ha/año | | | | | |
| | Volumen maderable por ha | Vs | 31,18 | m ³ /ha | Volumen maderable anual | Vm | 96.003 | m ³ /año | $Vm=Vs*S$ |
| | Residuo generado por ha | Rs | 4,96 | tv/ha | Residuo generado anual | R | 15.270 | tv/año | $R=Rs*S$ |
| | Residuo generado por ha | | 10,29 | m ³ /ha | Volumen medio maderable por pie | Vp | 0,0993 | m ³ /pie | $Vp=Vs/De$ |
| | Densidad a extraer | De | 314 | pies/ha | | | | | |
| | Longitud de la troza | Lt | 2,2 | m | | | | | |
| | Espaciamiento medio entre calles | e | 20 | m | | | | | |
| | Distancia media de saca | ds | 423 | m | | | | | |
| | Coefficiente de apilado madera | Ca | 0,68 | | | | | | |
| PROCESADORA | Longitud grúa | Lg | 10 | m | | | | | |
| | Velocidad media de desplazamiento | vp | 0,83 | m/s | | | | | |
| | Tiempo de selección, derribo y posicionamiento | t1 | 25,2 | s/pie | Pies procesados en cada ciclo | Nc | 6 | pies/ciclo | $Nc=1,92/10000*Lg^2*De$ |
| | Tiempo de procesado y apilado | t2 | 24 | s/pie | Tiempo en cada ciclo procesadora | Tcp | 309 | s | $Tcp=Lg/vp+Nc*(t1+t2)$ |
| | Porcentaje reducción por pendiente procesadora | Epp | 1 | | Productividad procesadora | Pnp | 6,98 | m ³ /hte | $Pnp=Epp*Nc*Vp*3600/Tcp$ |
| | Coefficiente de efectividad | Cep | 75% | | Producción procesadora | Pp | 5,26 | m ³ /h | $Pp=Pnp*Cep$ |
| AUTOCARGADOR (SACA DE MADERA) | Altura de carga | h | 1,72 | m | Carga longitudinal | ql | 16,42 | est | $ql=a*h*Lt*entero(Lp/Lt)$ |
| | Anchura de plataforma | a | 2,17 | m | Carga transversal | qt | 18,73 | est | $qt=Lp*h*Lt$ |
| | Longitud de plataforma | Lp | 4,95 | m | Carga máxima | qmax | 25,45 | est | $qmax=Cmax*1000/(Dm*Ca)$ |
| | Capacidad máxima de carga | Cmax | 9 | t | Carga útil del autocargador | Q | 18,73 | est | $Q=\text{minimo}(\text{máximo}(ql,qt), qmax)$ |
| | Sección de la grapa | Sg | 0,23 | m ² | | | | | |
| | Velocidad de desplazamiento en vacío | vo | 1,667 | m/s | | | | | |
| | Velocidad de desplazamiento en carga | vc | 0,833 | m/s | Nº movimientos de grúa en una carga | G | 37,02 | | $G= Q/(Sg*Lt)$ |
| | Velocidad de desplazamiento durante la carga | vdc | 0,417 | m/s | Distancia media recorrida en una carga | dc | 204 | m | $dc=10000/e*Q*Ca/Vs$ |
| | Duración media de un ciclo de grúa en carga | Tc | 36 | s | Tiempo del ciclo autocargador | Tca | 3.517 | s | $Tca=G*Tc+dc/vdc+ds/vc+G*Td+ds/vo$ |
| | Duración media de un ciclo de grúa en descarga | Td | 25,2 | s | | | | | |
| | Porcentaje reducción por pendiente autocargador | Epa | 1 | | Productividad autocargador madera | Pna | 13,04 | m ³ /hte | $Pna=Epa*Q*Ca*3600/Tca$ |
| Coefficiente de efectividad | Cea | 74% | | Producción autocargador madera | Pa | 9,61 | m ³ /h | $Pa=Pna*Cep$ | |

ANEXO II: MODELOS DE PRODUCTIVIDAD Y COSTES DE PROCESADORA Y AUTOCARGADOR

| ANÁLISIS DE COSTES PROCESADORA | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|--------------------------------|---------------|--------|---------------------------|-------|--------|
| HIPÓTESIS INICIAL | VALOR | UNID. | CONCEPTOS | VALOR | UNID. | RESULTADOS | VALOR | UNID. |
| Precio procesadora | 312.526 | € | Depreciación efectiva | 281.274 | € | Coste fijo horario | 60,21 | €/hora |
| Periodo de amortización | 7 | año | Coste amortización anual | 40.182 | €/año | Coste variable horario | 28,15 | €/hora |
| Horas anuales amortización | 1.800 | h/año | Interés anual medio | 11.251 | €/año | Coste horario procesadora | 88,36 | €/hora |
| Valor residual | 10 | % | Cálculo valor del seguro | 0,6 | % | | | |
| Interés préstamo amortización | 7 | % | Seguro | 1.875 | €/año | | | |
| Horas efectivas de trabajo | 1.355 | hte | Incremento anual seguros | 1,00 | % | | | |
| Jornada diaria | 8 | h/día | Seguro medio anual | 2.220 | €/año | | | |
| | | | Salario maquinista | 20,92 | €/hora | | | |
| | | | Dieta maquinista | 56,50 | €/día | | | |
| | | | Vehículo maquinista | 19,36 | €/día | | | |
| | | | Coste maquinista | 54.725 | €/año | | | |
| | | | Mantenimiento | 7.199 | €/año | | | |
| | | | Incremento anual mantenimiento | 10 | % | | | |
| | | | Mantenimiento medio anual | 11.761 | €/año | | | |
| | | | Reparaciones | 13.283 | €/año | | | |
| | | | Incremento anual reparaciones | 10 | % | | | |
| | | | Reparaciones medio anual | 21.700 | €/año | | | |
| | | | Neumáticos | 5.203 | €/año | | | |
| | | | Precio neumático | 1.200 | € | | | |
| | | | Número de ruedas | 8 | ruedas | | | |
| | | | Durabilidad neumáticos | 2.500 | h | | | |
| | | | Combustible | 10.434 | €/año | | | |
| | | | Precio gasoil | 1,00 | €/l | | | |
| | | | Consumo | 7,7 | l/hte | | | |
| | | | Consumo lubricante | 15 | % | | | |
| | | | Lubricante | 1.565 | €/año | | | |

ANEXO II: MODELOS DE PRODUCTIVIDAD Y COSTES DE PROCESADORA Y AUTOCARGADOR

| ANÁLISIS DE COSTES AUTOCARGADOR | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|-------|--------------------------------|---------------|--------|---------------------------|-------|--------|
| HIPÓTESIS INICIAL | VALOR | UNID. | CONCEPTOS | VALOR | UNID. | RESULTADOS | VALOR | UNID. |
| Precio procesadora | 198.334 | € | Depreciación efectiva | 178.501 | € | Coste fijo horario | 49,32 | €/hora |
| Periodo de amortización | 7 | año | Coste amortización anual | 25.500 | €/año | Coste variable horario | 20,87 | €/hora |
| Horas anuales amortización | 1.800 | h/año | Interés anual medio | 7.140 | €/año | Coste horario procesadora | 70,19 | €/hora |
| Valor residual | 10 | % | Cálculo valor del seguro | 0,6 | % | | | |
| Interés préstamo amortización | 7 | % | Seguro | 1.190 | €/año | | | |
| Horas efectivas de trabajo | 1.327 | hte | Incremento anual seguros | 1,00 | % | | | |
| Jornada diaria | 8 | h/día | Seguro medio anual | 1.409 | €/año | | | |
| | | | Salario maquinista | 20,92 | €/hora | | | |
| | | | Dieta maquinista | 56,50 | €/día | | | |
| | | | Vehículo maquinista | 19,36 | €/día | | | |
| | | | Coste maquinista | 54.725 | €/año | | | |
| | | | Mantenimiento | 3.701 | €/año | | | |
| | | | Incremento anual mantenimiento | 10 | % | | | |
| | | | Mantenimiento medio anual | 6.047 | €/año | | | |
| | | | Reparaciones | 6.828 | €/año | | | |
| | | | Incremento anual reparaciones | 10 | % | | | |
| | | | Reparaciones medio anual | 11.155 | €/año | | | |
| | | | Neumáticos | 1.200 | €/año | | | |
| | | | Precio neumático | 8 | € | | | |
| | | | Número de ruedas | 2.500 | ruedas | | | |
| | | | Durabilidad neumáticos | 5.097 | h | | | |
| | | | Combustible | 10 | €/año | | | |
| | | | Precio gasoil | 1,00 | €/l | | | |
| | | | Consumo | 13.273 | l/hte | | | |
| | | | Consumo lubricante | 15 | % | | | |
| | | | Lubricante | 1.991 | €/año | | | |