

COSTOS OCULTOS DE NUTRIENTES EN DENDROENERGÍA. EL CASO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE COSECHA DE *Pinus taeda* L.

ZAYAZ, V.¹; FERNANDEZ, R.¹⁻²; LUPI, A.^{3*}; WON WALLIS, A.¹⁻²; PAHR, N.²⁻¹; FRIEDL, A.¹

RESUMEN

El presente trabajo analiza la rentabilidad esperable producto de la extracción de residuos de la tala rasa de plantaciones de *Pinus taeda* cuando el costo de reposición de nutrientes exportados es incorporado al análisis económico convencional. Se compararon dos sistemas de cosecha: extracción de fuste entero (FE) y extracción del árbol entero (AE). Luego de la cosecha se cuantificó los residuos y su contenido de nutrientes. La biomasa remanente en los dos sistemas de cosecha fue de 73,9 Mg/ha y 52,6 Mg/ha para FE y AE, respectivamente. El total de nutrientes exportados por cosecha presentó diferencias significativas entre tratamientos, con menor impacto en la cosecha del FE. La extracción de residuos de cosecha con fines energéticos representó la pérdida de 84; 4,2 y 18,5 Kg/ha de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente. El ingreso generado por la venta de biomasa de residuos (AE) fue de 894,6 \$/ha, mientras que el costo de reposición de los tres nutrientes evaluados resultó en 3132 \$/ha, resultando el costo de reposición 3,5 veces superior al ingreso por venta de dicha biomasa.

Palabras clave: Beneficios económicos, biomasa forestal, reposición de nutrientes.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que hay acuerdo en que los sistemas forestales sustentables deben mantener constante el capital natural, la selección de las diferentes tecnologías se sigue haciendo mediante un análisis costo-beneficio simplificado, que tiende a sobreestimar la rentabilidad y pueden incentivar la degradación del ambiente porque no incluyen los costos ecológicos generados por la actividad productiva (Flores y Sarandón, 2003). La cantidad de nutrientes exportados en la cosecha dependen del tipo de producto cosechado. La cosecha exclusiva de fuste es una modalidad de menor impacto en comparación a sistemas que también exportan la biomasa de la copa con destino a bioenergía (Schumacher *et al.*, 2011; Fernández *et al.*, 2014). Los sistemas de cosecha de árbol entero (AE) ponen en debate el balance entre los impactos positivos y negativos del uso de la bioenergía, en términos de agotamiento de los nutrientes del suelo, erosión, consumo de agua, pérdida de biodiversidad, contaminación del aire y pérdida de productividad (FAO, 2008; McBride *et al.*, 2011). Dado que la mayor concentración de nutrientes se encuentra en la copa, la utilización de la biomasa total del vuelo con fines energéticos hace necesario estudiar los posibles impactos sobre el balance de nutrientes del sistema forestal, analizando si el ingreso económico extra generado en la cosecha del árbol entero compensa los costos de reposición de nutrientes, también llamados costos ocultos (Zazo *et al.*, 2011). Este trabajo tiene como objetivo evaluar el resultado económico del aprovechamiento de residuos de tala rasa de *P. taeda* en el norte de Misiones, cuando se incorpora en el análisis el costo de reposición de nutrientes exportados en la cosecha del árbol entero.

¹ Facultad de Ciencias Forestales (UNaM). Eldorado, Misiones, Argentina.

² EEA Montecarlo (INTA). Montecarlo, Misiones, Argentina

³ Instituto de Suelos, Centro Investigaciones en Recursos Naturales (INTA). Hurlingham, Pcia de Bs As, Argentina E.mail: lupi.ana@inta.gob.ar. Tel: 11 46212096.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló tomando como referencia una plantación de *P. taeda* de 20 años de edad, localizada en el NO de Misiones, Argentina. Para el relevamiento, el rodal se dividió en dos “fajas” en las que se aplicaron dos sistemas de cosecha (tratamientos): árbol entero (AE) y fuste entero (FE), que consistieron en: fuste entero (FE): apeo, desrame y despunte del fuste en el sitio, extracción del fuste comercial (fuste con corteza) hasta playa de acopio, trozado del fuste, carga y transporte de las trozas. Árbol entero (AE): apeo, extracción del árbol completo hasta playa de acopio, desrame y trozado del fuste, carga y transporte de las trozas. En FE los residuos quedan distribuidos en el área de apeo de los árboles y en el segundo caso (AE) los residuos se acumulan mayormente en las playas de acopio para su posterior recolección con fines energéticos.

Luego de la cosecha se cuantificó la biomasa residual y su contenido de nutrientes. Se muestrearon 15 parcelas por faja/tratamiento, pareadas, de 100 m². En cada una de ellas se cuantificó la biomasa residual en 10 sub-parcelas de 0,5 m². El material recolectado en cada sub-parcela se separó en: ramas >5 cm, ramas entre 1 y 5 cm, ramas <1 cm, acículas, conos. Se estimó el peso seco y se determinó la concentración de N, P y K.

La determinación del ingreso por venta de astillas para combustible provenientes de residuos de tala rasa de AE se estimó a partir de la cantidad de biomasa extra que se extrajo en la modalidad AE. Se calculó en base al precio actual de venta del producto elaborado a partir de los residuos (chip leña). Los precios fueron tomados de los boletines del Colegio de Ingenieros Forestales de Misiones (COIFORM). Los costos de elaboración y flete de los residuos fueron determinados según FAO/ECE/KWF (Malinovsky, 1983) y fueron descontados de este ingreso. Para el cálculo del costo de transporte se estimó una distancia de 50 km y no se tuvo en cuenta el viaje vacío luego de la descarga. Los costos fueron calculados para las maquinas: astilladora Peterson Pacific 4710B, skidder John Deere 548, cargadora frontal CAT 320D, camión Mercedes Benz 6X4.

La estimación del costo de reposición de nutrientes por la exportación adicional que genera AE se calculó en base a la diferencias en las mineralomasas de N, P y K correspondientes a FE y AE. Para estimar el costo de la reposición de nutrientes se utilizó la metodología de Flores y Sarandon, (2003) con valores de mercado a mayo de 2016; siendo 555 U\$/Mg para Urea, 595 U\$/Mg para superfosfato triple de calcio y 835 U\$/Mg para cloruro de potasio. Se consideró la concentración de cada nutriente en el respectivo fertilizante y el costo de aplicación (jornales por hectárea). El rendimiento considerado para la aplicación manual de fertilizantes fue de 4,8 hs/ha (Colcombet, 2008). Se asumió que la eficiencia de aplicación fue del 100 % (o sea, sin pérdidas por lixiviación, fijación, escurrimiento y volatilización). Finalmente, se evaluó si el ingreso económico generado por la extracción de residuos de cosecha compensa el costo de reposición de nutrientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La extracción exclusiva de los fustes (FE) permitió dejar mayor cantidad de residuos remanentes en el sitio (Tabla 1), coincidiendo con lo detectado por Aparicio (2011) para *P. elliotii*. Solo las categorías “ramas > 5 cm” y “ramas 1-5 cm” fueron diferentes entre sistemas de cosecha y puede deberse al quiebre del material vegetal durante el arrastre de los árboles apeados hasta las canchas (Fernandez *et al*, 2014). En estas categorías la diferencia de biomasa entre sistemas de cosecha fue de 9 Mg/ha y 9,34 Mg/ha, representando el 81% y 35 % del total de cada categoría respectivamente. Para los demás compartimientos el porcentaje de extracción fue inferior a 10%. La diferencia entre los dos sistemas de cosecha aplicados fue de 21,3 Mg/ha, representando un 14,4% más de extracción en la cosecha de AE. Estos valores son comparables con las determinaciones realizadas por Maestropaolo *et al*. (2012) donde

estiman operacionalmente que la biomasa de copas al borde de camino es aproximadamente el 65-70% en peso de la biomasa total aprovechable.

Tabla 1. Biomasa residuos remanente luego de la cosecha, según método empleado (Mg/ha).

Modalidad	Ramas > 5cm	Ramas 1-5 cm	Ramas < 1cm	Acículas	Conos	Total
FE	11,1a	26,6a	12,7 ^a	20,1a	3,4a	73,9a
AE	2,1b	17,3b	11,5 ^a	18,4a	3,3a	52,6b

Ref.: AE: árbol entero; FE: Fuste entero. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5%.

El contenido de nutrientes remanentes en el sitio (Tabla 2) fue mayor en la modalidad FE. En la categorías "ramas >5 cm" y "ramas 1-5 cm" la cantidad de nutrientes remanentes fue significativamente menor en AE. Se observa que la exportación de la copa con fines energéticos en AE representó la pérdida adicional de 84; 4,2 y 18,5 Kg/ha de N, P y K, respectivamente (diferencia AE-FE).

Tabla 2. Contenidos de N, P, K en los residuos remanentes según modalidad de cosecha y compartimiento (Kg/ha).

Modalidad	Nutriente	Ramas > 5 cm	Ramas 1-5 cm	Ramas < 1 cm	Acículas	Conos	Total
FE	N	30,1a	102,4a	65,1a	210,8 ^a	14,2a	422,7a
AE		5,7b	66,5b	59,1a	193,8 ^a	13,7a	338,7b
FE	P	1,1a	4,0a	5,4a	16,7 ^a	0,68a	27,8a
AE		0,2b	2,6b	4,8a	15,4 ^a	0,56a	23,6b
FE	K	5,8a	17,3a	26,7a	63,1 ^a	4,8a	117,7a
AE		1,1b	11,2b	24,2a	58,0a	4,6a	99,2b

Ref.: AE: árbol entero; FE: Fuste entero. Letras diferentes indican diferencias significativas entre AE y FE a nivel de significación de 5%.

Los costos por hora de las operaciones involucradas en la recolección, carga, trituración y transporte de la biomasa destinada a bioenergía calculados para los equipos y camiones, con sus respectivos operadores, se presentan en la Tabla 3. Se observa que el mayor costo horario corresponde a la máquina trituradora.

Tabla 3. Costo horario para los equipos de elaboración y flete.

Costo operacional	\$/hora	U\$/hora
Skidder John Deere 548	1348,3	93,0
Astilladora Peterson Pacif 4710B	2590,4	178,7
Cargadora CAT 320D	1206,6	83,2
Camión Mercedes Benz 6X4	1027,7	70,9
Total	6173,0	425,7

Por su lado, la Tabla 4 muestra el costo de producción por unidad de biomasa correspondiente a los equipos y vehículos involucrados en la elaboración del chip leña. Se destaca al elevado costo de flete, que si bien no es el mayor, es una parte importante del costo total.

Tabla 4. Costos por tonelada para los equipos de elaboración y transporte de biomasa.

Equipo	\$/Mg	U\$/Mg	Participación (%)
Skidder John Deere 548	33,7	2,3	26,4
Astilladora Peterson Pacific 4710B	40,3	2,8	31,4
Cargadora CAT 320D	18,6	1,3	4,5
Camión Mercedes Benz 6X4	35,4	2,4	27,7
Total	128,0	8,8	100

Por otro lado, de la Tabla 4 surge que el costo total por unidad de chip producido es de 128\$/Mg. De acuerdo a valores de mercado, el chip leña en la zona de Eldorado, Misiones, rondó los 170\$/Mg (boletín de precios del COIFORM) en marzo de 2016, lo cual representa una ganancia de 42 \$/Mg de biomasa elaborada y transportada a un rango no mayor a los 50 km, y considerando una extracción de biomasa de 21,3 Mg/ha (Tabla 1) el ingreso obtenido equivale a 894,6 \$/ha.

Para calcular el costo de reposición de nutrientes se utilizaron cantidades equivalentes (kg nutriente/kg fertilizante) de cada fertilizante (Tabla 5). Fernández *et al.*, (2016) obtuvieron resultados del mismo orden. El costo de aplicación manual y de administración resultó en 1019 \$/ha, lo cual en conjunto con los 2113 \$/ha correspondientes a la compra de fertilizantes, determinan que el costo total de reposición ascienda a 3132 \$/ha.

Tabla 5. Costo de reposición del nitrógeno, fósforo y potasio en base a la extracción adicional por cosecha del árbol entero.

	Cantidad extraída (Kg/ha)		Cantidad equivalente	Kg a aplicar	\$/Kg	\$/ha	U\$/ha
N	84,0	UREA	0,45	186,5	8,2	1501	103,5
P	4,2	SFT	0,20	21	8,6	181	12,4
K	18,5	KCl	0,52	35,6	12,1	431	29,7
Subtotal						2113	146,0

Urea: fuente de N; SFT: Superfosfato triple de calcio: fuente de P; KCl: cloruro de potasio: fuente de K.

Los resultados indican que el costo de reposición de los tres nutrientes resulta 3,5 veces superior al ingreso por venta de biomasa de residuos de cosecha, calculado bajo los supuestos y consideraciones del trabajo. Por otro lado se advierte como los costos de reposición están en directa relación con el sistema de cosecha utilizado. Es oportuno mencionar que en este trabajo fue considerado solo la reposición de N, P y K y en consecuencia la cuantificación es subestimada ya que otros nutrientes también son exportados directamente por cosecha e indirectamente (sotobosque + piso forestal) durante las operaciones de cosecha. La remoción del piso forestal y sotobosque por la cosecha y arrastre de los árboles con su respectivo contenido de nutrientes, es un aspecto totalmente inadvertido en los análisis actuales de las plantaciones. Estos costos de reposición considerados representan una pequeña parte del capital nutritivo a reponer si tenemos como objetivo el mantenimiento de la productividad del sitio a largo plazo.

CONCLUSIONES

La extracción del árbol entero con fines del aprovechamiento de residuos significó una exportación adicional de biomasa de 21,3 Mg/ha respecto de la modalidad solo fuste. La biomasa de residuos remanentes en AE fue menor en todos los compartimientos analizados pero especialmente en las categorías "ramas >5 cm" y "ramas 1-5 cm". La pérdida de nutrientes por recolección de residuos de cosecha fue de 83,9 Kg/ha de N, 4,2 Kg/ha de P y 18,5 Kg/ha de K. El costo total de elaboración y flete

por tonelada de chip producido fue de 128\$/Mg. El ingreso por venta de biomasa de residuos de cosecha (AE) fue de 894,6 \$/ha, mientras que el costo de reposición de N, P y K resultó en 3132\$/ha. El costo de reposición de los nutrientes adicionalmente extraídos por cosecha de residuos resultó 3,5 veces superior al ingreso adicional por la venta de chip leña.

AGRADECIMIENTOS

A las empresas PINDO SA y LIPSIA SA, por disponer sus plantaciones, posibilitar el desarrollo del proyecto y particularmente por el aporte de inquietudes e ideas. Al Proyecto Manejo Sustentable de Recursos Naturales BIRF 7520 AR, Componente 2 Plantaciones Forestales Sustentables por financiación parcial de las actividades del PIA 12051.

BIBLIOGRAFÍA

- APARICIO, J. 2011. Efectos del manejo de residuos de cosecha de *P. elliotii* en el costo oculto de nutrientes y en el crecimiento de Pino Híbrido en un suelo arenoso de Corrientes. XXV Jornadas Forestales De Entre Ríos. Concordia Entre Ríos. Octubre de 2011.
- BALBOA, M.; ÁLVAREZ, J. G.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; MERINO, A. 2003. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte II: Cuantificación e Implicaciones ambientales. Revista Cis-Madera, nº 10, pp. 27-37.
- COLCOMBET, L. 2008. Coeficientes técnicos para lograr plantaciones y podas forestales en Misiones y noreste de Corrientes. 13as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM – EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina.
- COIFORM. 2017. Boletín del Colegio de Ingenieros Forestales de Misiones. Disponible en: http://www.coiform.com.ar/coiform_precios.php
- FAO. 2008. Bosques y energía. Cuestiones claves. FAO Montes 154. Roma. 69p.
- FERNÁNDEZ, R. A.; VON WALLIS, A.; PAHR, N.; FRIEDL, A.; MARTIARENA, R.; LUPI, A. 2014. Implicancias de la modalidad de cosecha forestal sobre el contenido de nutrientes. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Mayo de 2014.
- FERNANDEZ, R; VON WALLIS, A; PAHR, N; FRIEDL, A, MARTIARENA, R; LUPI, A. 2016. Export of Forest Harvesting Residues to Energy. Nutrient Loss and Replacement Cost". Actas 2nd RCN Conference on Pan American Biofuels & Bioenergy Sustainability. AIChE. Buenos Aires. Setiembre de 2016.
- FLORES, C. C.; SARANDÓN, S. J. 2003. ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo oculto de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de Agriculturización en la Región Pampeana Argentina. Rev. Fac. Agron. 105(1): 52-67
- MCBRIDE, A, C; DALE, D; BASKARAN, L; DOWNING, M; EATON, L; EFROYMSON, R; GARTEN, C; KLINE, K; JAGER, H; MULHOLLAND, P; PARISH, E; SCHWEIZER, P; STOREY, J. 2011. Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems. Ecological Indicators, 11:1277–1289.
- MAESTROPAOLO, J; GIELHARD, O; BONKIEVICZ, S. 2012. Aprovechamiento de residuos de cosecha para la producción de energía. 15as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina
- MALINOVSKI, J. Metodologia do custo-hora para máquinas florestais. Curso de atualização sobre sistemas de exploração e transporte florestal, 4. 1983. Curitiba. IV Curso de atualização sobre sistemas de exploração e transporte florestal. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1983.
- SCHUMACHER, M.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F.; LOPES, V, VIERA; M. 2011. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em quedas do Igaçu, PR. Ciência Florestal, 21 (1):53-62.

Zazo, F; Flores, C; Sarandon, S. 2011. El "costo oculto" del deterioro del suelo durante el proceso de "sojización" en el Partido de Arrecifes, Argentina. Revista Brasileira de Agroecología 6(3): 3-20 ISSN: 1980-9735.