



Foto: Cecilia Rachid

Plantación de pino, departamento de Tacuarembó.

EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE LA MADERA DE PINO PARA ABASTECER UNA BIORREFINERÍA

BQ. Dr. Leonidas Carrasco-Letelier¹
 Ing. Agr. Dr. Fernando Resquín²
 Ing. Agr. Dr. Cecilia Rachid-Casnati²

¹Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental

²Programa de Investigación en Producción Forestal

Desde hace 10 años INIA viene evaluando potenciales biomásas para el desarrollo de bioenergía y/o biocombustibles no vinculados a cultivos para alimentación humana y/o animal o que usen suelos aptos para la agricultura. Siguiendo esta línea de trabajo, el presente artículo analiza el rendimiento energético y huella de carbono de madera no comercial de *Pinus taeda* para su uso en biorrefinerías.

En el desarrollo de biocombustibles se asume con frecuencia que estos pueden ser sostenibles en sí mismos; pero sin comprobación esto podría ser falso. Las dimensiones ambientales que se deben considerar para lograr la sostenibilidad son múltiples (Rockström *et al.*, 2009) y las cadenas de producción de biomasa y/o biocombustibles no escapan a este requisito. Requieren demostrar una rentabilidad energética (EROI)* mínima (Carrasco-Letelier *et al.*, 2013) y una huella de carbono (HdeC) aceptable. Es decir, lograr una razón entre

la energía producida y la energía fósil consumida superior a 2. De lo contrario, será más eficiente el uso del combustible fósil que un biocombustible/biomasa. Además, la cadena de producción de biocombustibles debe lograr una HdeC inferior al 60 % de su combustible fósil de referencia, criterio de sostenibilidad dado por la Unión Europea (Howes, 2010).

Por lo antes mencionado, desde el 2011, INIA viene relevando diferentes biomásas con potencialidad

*EROI: energy return on investment (tasa de retorno energético).

Cuadro 1 - Volúmenes de madera considerados para el cálculo de la HdeC de rolos de *Pinus taeda*.

	Año	Árboles/ha	Árboles cosechados	Rolos (m ³ /ha)	Residuos (m ³ /ha)
Plantación inicial	0	1200	300		
Raleo precomercial	3	1100	300	2,5	6,8
1 ^{er} raleo comercial	12	800	300	6,2	86,1
2 ^{do} raleo comercial	17	500	200	82,0	93,8
Tala final	25	300	300	322	92,7

para el desarrollo de bioenergía y/o biocombustibles y, en particular, aquellas no vinculadas a cultivos para alimentación humana o animal ni que usen suelos aptos para la agricultura. En esta línea de investigación, se estudió la posibilidad de usar plantaciones de *Pinus taeda* de los departamentos de Tacuarembó y Rivera, con una densidad inicial de 1200 árboles por hectárea, con tres raleos (años 3, 12 y 17) y una cosecha final en el año 25 (Cuadro 1). Asumiendo los rendimientos descritos por los modelos desarrollados por INIA (Rachid-Casnati *et al.*, 2019) para estimar el volumen de las trozas y de los residuos forestales (madera del fuste sin corteza entre 23 y 6 cm de diámetro) (Cuadro 2).

La estimación de la HdeC usó, como unidad funcional para expresar los resultados, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) expresadas en kilos de dióxido de carbono equivalente por metro cúbico de madera producida –cosechada y raleada– por el cultivo (kg CO_{2-eq} por metro cúbico por año). La estimación incluyó los insumos (fertilizantes, pesticidas, combustible, etc.) y las maquinarias usadas hasta la entrega de la madera en la puerta de una planta de procesamiento (biorrefinería) a 50 km del sitio de cosecha.

El inventario de ciclo de vida se realizó mediante entrevistas a empresas forestales locales y se completó con información publicada (estadísticas nacionales y/o en revistas internacionales). Esta información fue transferida al software OpenLCA, se modeló empleando la base de datos gratuita Agrybalyse y su evaluación de impacto usó los coeficientes de impacto de calentamiento global potencial del IPCC para un período de 100 años. Las emisiones de NOx

y el secuestro potencial de carbono por las raíces no se consideraron, porque no existe un modelo de estimación calibrado y validado para Uruguay.

Para la estimación de la rentabilidad energética (EROI) se consideró el mismo listado de insumos y productos de la estimación de la HdeC. La energía producida e invertida fue expresada en mejajoules. Para la estimación de la energía potencial producida se consideró una densidad de la madera de 400 kg/m³ y un poder calorífico de 21,3 MJ por kilo de madera (PROBIO, 2015) usando la información del Cuadro 1.



Foto: Jorge Basso

Figura 1 - *Pinus taeda* apeado para muestreo de biomasa.

Cuadro 2 - Operaciones forestales consideradas en el inventario de ciclo de vida de rolos de *Pinus taeda*.

Silvicultura	Cosechas	Transporte	Operaciones de mantención
Preparación de campo	Raleo pre-comercial	En camión por rutas nacionales	Producción de plantines
Siembra	1 ^{er} raleo comercial		Traslado de plantines a campo*
Fertilización	2 ^{do} raleo comercial		Construcción de caminos forestales*
Control de hormigas	Cosecha		Movimiento de maquinaria entre sitios *
Control de malezas			Transporte del personal *

* operaciones no consideradas en este inventario

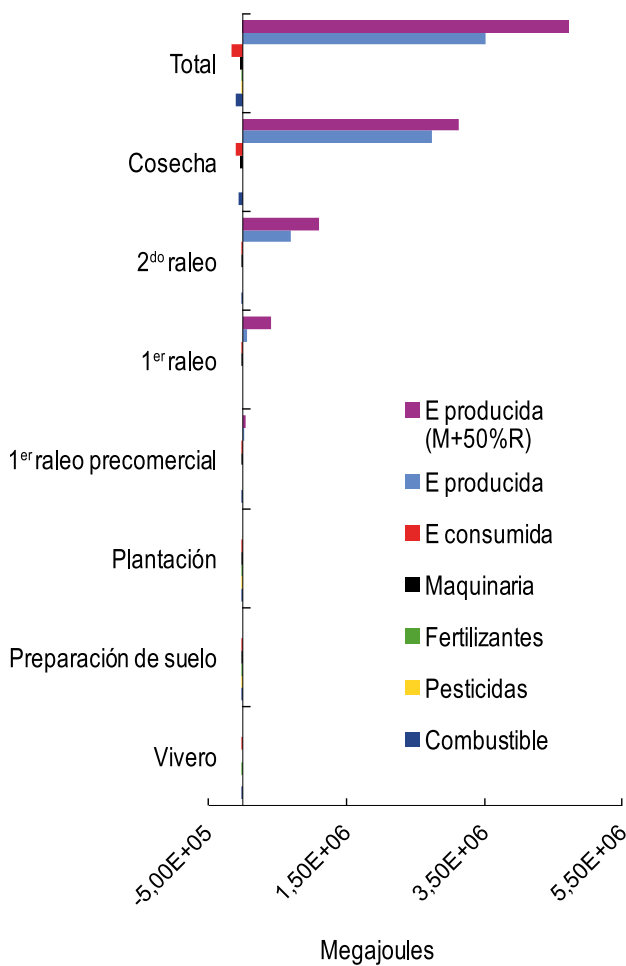


Figura 2 - Energía consumida y producida por la cosecha de madera (M) y de la mitad de los residuos (50%R).

RESULTADOS

El desarrollo del inventario de ciclo de vida (Cuadro 2) indica que las etapas productivas con un déficit

de información fueron: el vivero forestal; el raleo pre-comercial; el primer raleo comercial; la preparación del suelo y la plantación, donde un 100, 75, 34, 29 y 23 % de la información local no está disponible para estas operaciones.

Se encontró que la HdeC sería de 0,69 kg CO_{2-eq} por metro cúbico de madera por año, para el cultivo de 25 años de *Pinus taeda*, en un marco de 100 años y cosechando 413 m³ de madera en rolos, donde el 95,1 % de los aportes de GEI serían producidos por: la cosecha forestal, el segundo raleo y la preparación del suelo, aportando el 52,7 %, 26,3 % y 16,1 % de la huella, respectivamente (Cuadro 3). Si se cosecharan 413 m³ de rolos de madera y 140 m³ de residuos forestales, la HdeC descendería a 0,51 kg CO_{2-eq} por metro cúbico de madera por año, sin cambio en los aporte de las diferentes fases del cultivo (Cuadro 3).

La rentabilidad energética del sistema forestal estudiado fue de 22,5 MJ/MJ (0,9 MJ/MJ.año) para la cosecha de 413 m³ de madera, valor que se incrementa a 30,1 MJ/MJ (1,2 MJ/MJ.año) si se agrega el 50 % de los residuos forestales. El 90 % del consumo de energía se debe a las etapas de: cosecha, segundo raleo y plantación, que explican el 63 %, 15 % y 12 % de los consumos, respectivamente, donde el uso de combustible y pesticidas representa más del 90 % (preparación de suelos, plantación y raleo pre-comercial); y/o la maquinaria en primer y segundo raleo comercial y cosecha (Figura 2).

La cosecha de 413 m³ de rolos de madera y 140 m³ de residuos forestales produciría una HdeC de 0,51 kg CO_{2-eq} por metro cúbico de madera por año.

Cuadro 3 - Calentamiento global potencial a 100 años expresado en kilogramos de CO₂ equivalente por metro cúbico de madera producida por año. Considerando la cosecha de 413 m³ de madera en un cultivo de 25 años de *Pinus taeda*.

Procesos	413 m ³ de madera		413 m ³ de madera y 140 m ³ de residuos	
	kg CO _{2-eq} /m ³ /a	%	52,68	%
Madera solida pino	0,69		26,31	
Cosecha forestal	0,36	52,68	16,12	52,68
2 ^{do} raleo	0,18	26,32	2,42	26,31
Preparación del suelo	0,11	16,12	1,52	16,12
Raleo pre-comercial	0,016	2,41	0,82	2,42
1 ^{er} raleo comercial	0,010	1,52	0,13	1,52
Vivero forestal	0,006	0,82	0,004	0,82
Plantación	0,0091	0,13	0,0007	0,13

* Los valores del inventario fueron tomados de Heller *et al.* (2003) por la ausencia de datos nacionales publicados.

Cuadro 4 - Valores de huellas de carbono publicadas para maderas de pino y los resultados de este trabajo.

Especie	kg CO ₂ eq/m ³ .yr	IMA m ³ /ha	País	Referencia
<i>Pinus taeda</i>	0.69	19 mediana 26 máximo	Uruguay	Este trabajo
<i>Eucalyptus</i>	1,22	28	Uruguay	(Rachid-Casnati <i>et al.</i> , 2021)
Scots pine	2,8 – 3,5	6,2	Suecia	(Berg, 1997)
Scots pine	4,2 – 4,4	6,2	Suecia	(Berg, 1997)
Scots pine	4,15 – 5,14	6,2	Suecia	(Berg, 1997)
Scots pine	10,6		Suecia	(Berg and Karjalainen, 2003)
Scots pine	7 - 10		Suecia	(Berg and Lindholm, 2005)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Aunque el inventario de la cadena de producción presentó carencias importantes de información local en las fases de vivero y raleo pre-comercial, estas no parecen relevantes, dado que no aportarían más del 3 % de la HdeC total (Cuadro 3) y menos del 2 % de la energía consumida (Figura 2). Por lo que, se puede asumir que las carencias de datos no afectaron significativamente las estimaciones.

El valor tan bajo del HdeC –en relación a valores publicados (Cuadro 4) para otras maderas de pino–, resalta la ventaja de uso de esta madera para productos forestales con huellas de carbono elevadas debido a su fase de conversión industrial, como las maderas procesadas de abedul (7 a 2 kg CO₂eq kg producto, Liao *et al.*, 2020), MDF de *Eucalyptus* y pino (188 kg CO₂ eq/ m³; Garcia and Freire, 2014) y bioetanol (83 kg CO₂eq GJ-1, Howes, 2010).

Lamentablemente, la ventaja comparativa encontrada para la HdeC (para la madera de pino proveniente del esquema de manejo estudiado) no se logró para el EROI. El EROI del sistema evaluado no es próximo a 2. Para resolver esta limitación se debería considerar: el desarrollo de un cultivo alternativo de pino (especie, edad, densidad de plantación) para lograr un EROI mayor; reducir las operaciones forestales (ej. raleo) para disminuir el consumo de energía y/o elevar el porcentaje de uso de los residuos.



Figura 3 - Hojas (A) y ramas (B) de *Pinus taeda* cosechadas para determinación de biomasa.

La rentabilidad energética requiere ser mejorada para abastecer a una biorrefinería, tal vez reduciendo operaciones forestales. Por otro lado, la huella de carbono de esta madera presenta ventajas comparativas –a nivel internacional– para su transformación en productos de mayor valor agregado.

REFERENCIAS

- Carrasco-Letelier *et al.*, 2013. Revista INIA 46–40.
- García, R., Freire, F., 2014. Journal of Cleaner Production 66, 199–209.
- Howes, T., 2010. Clim. Dipl. 15,3.
- Liao *et al.*, 2020. Science 367, 1385–1390.
- PROBIO 2015, MVOTMA, INIA: Tacuarembó, Uruguay, p. 34.
- Rachid-Casnati *et al.*, 2021. Forests 12, 1609.
- Rockström *et al.*, 2009. Nature 461, 472–475.