

CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES: UN ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LAS TENDENCIAS MUNDIALES

Ricardo Telles-Antonio¹, Javier Jiménez-Pérez^{2*}, Eduardo Alanís-Rodríguez²,
Oscar Alberto Aguirre-Calderón², Eduardo Javier Treviño-Garza²

¹Universidad Mexiquense del Bicentenario, Unidad de Estudios Superiores Amatepec, Libramiento Luis Donaldo Colosio, Col. Deportiva, Amatepec, Estado de México 51530.

²Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ciencias Forestales, Carretera Nacional a Cd. Victoria km 145. Linares, Nuevo León México, 67700.

*Corresponding author: jjimenez20@gmail.com

RESUMEN

El crecimiento de los árboles es variable ya que depende del patrimonio genético del individuo, su entorno, de la etapa de desarrollo y la acción del hombre. El objetivo del presente ensayo es presentar una revisión actualizada e integral del estado del arte sobre crecimiento y rendimiento de las plantaciones forestales, con el cual se identifican las investigaciones realizadas y aspectos que faltan por conocer. La superficie forestal plantada a nivel mundial se incrementó considerablemente entre 1990 y 2015 de 167.5 a 277.9 M ha, en el año 2012 a nivel mundial 46.3% de la madera en rollo industrial procedió de plantaciones forestales. En años recientes ha aumentado el interés por conocer los efectos del ambiente sobre las propiedades de la madera; la productividad de las plantaciones forestales está en función del suministro, captura y eficiencia en el uso de los recursos; varios rasgos diferentes pueden modificarse a través del mejoramiento genético, como un crecimiento más vigoroso, resistencia a plagas o enfermedades o la calidad del producto. Resulta indispensable conocer la biología de las especies a establecer en plantaciones y las características agroecológicas del área a plantar, además de definir los objetivos de destino de la producción. Las investigaciones deben proporcionar una comprensión más completa sobre los procesos fisiológicos, la eficiencia del uso de recursos que controlan el desarrollo de la madera y sobre mejoramiento genético.

Palabras clave: beneficios ambientales y económicos, madera, mitigación del calentamiento global, modelos alométricos, productividad, silvicultura.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los árboles es una actividad biológica compleja en la que intervienen diferentes factores como la actividad de las yemas (desarrollo primario o aumento de la longitud de los ejes) y del cambium (desarrollo secundario o aumento del espesor de los ejes) (Pretzsch, 2009). Esta evolución de los árboles es variable, depende de la información genética del individuo, de la etapa de desarrollo (edad fisiológica de los tejidos) y de las condiciones ambientales de su entorno incluida la acción del hombre por la modificación del ambiente como respuesta a ciertas actividades como las entresacas o las podas (Picard *et al.*, 2012).

Dentro del rodal se suele distinguir al árbol de su conjunto. Esta distinción permite dissociar los diferentes factores que intervienen en el crecimiento de los árboles: fertilidad del lugar, competencia entre los árboles y clasificación sociológica. La fertilidad del lugar en su sentido amplio comprende la capacidad del suelo de sustentar a los árboles de nutrientes y

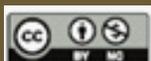
Citation: Telles-Antonio R, Jiménez-Pérez J, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón OA, Treviño-Garza EJ. 2022. Crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales: un análisis del estado actual de las tendencias mundiales. Agricultura, Sociedad y Desarrollo <https://doi.org/10.22231/asyd.v19i2.987>

Editor in Chief:
Dr. Benito Ramírez Valverde

Received: June 08, 2019.
Approved: November 20, 2020.

Estimated publication date:
October 17, 2022.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International license.



agua, así como el clima general de la zona incluido el fotoperiodo, temperatura y precipitación, la intensidad de heladas o sequías, etc. La competencia entre los árboles dentro del rodal se mide con diferentes índices de densidad. Por último, la clase sociológica de cada individuo define su capacidad de movilizar los recursos en su entorno próximo (Picard *et al.*, 2012). Conocer cómo estos factores afectan el crecimiento de los árboles es fundamental para entender cómo varía la estructura y composición espacial y temporal.

El crecimiento puede ser medido a diferentes niveles con base en la estructura del arbolado mediante variables dendrométricas como diámetro, área basal, altura, volumen y biomasa (Salas *et al.*, 2016). Existe una tendencia mundial a establecer plantaciones para satisfacer la demanda de madera, además, las plantaciones se están cultivando para proporcionar beneficios ambientales, sociales y económicos (West, 2014). Las plantaciones son bosques establecidos por el ser humano generalmente en un espacio regular. Aunque la mayoría son de una sola especie para un mayor rendimiento y productividad, existen plantaciones donde se mezclan especies para la diversificación de productos. Un objetivo de cultivar bosques de mayor producción en áreas limitadas, es la producción de materia prima para la industria forestal. Para ello es importante considerar la silvicultura de las plantaciones, el aprovechamiento de los árboles para lograr los objetivos establecidos (West, 2014).

Las plantaciones forestales son más productivas que los bosques desde el punto de vista del volumen de madera, y si se manejan bien, podrían disminuir la presión sobre los bosques naturales. Sin embargo, no pueden proporcionar todos los servicios que los bosques otorgan, especialmente cuando se trata de plantaciones monoespecíficas, constituidas por masas coetáneas de especies que son manejadas de forma intensiva (Cordero, 2011).

Los bosques naturales y las plantaciones forestales, proporcionan múltiples beneficios de forma directa o indirecta (De Groot y Van der Meer, 2010). Los beneficios directos incluyen bienes como madera, fibra, alimentos, forraje, recursos ornamentales, medicinales y oportunidades para la recreación. Los indirectos incluyen servicios como la conservación del suelo y agua, el hábitat de las especies polinizadoras, y vida silvestre (Campos *et al.*, 2005), conectividad de los mosaicos del paisaje para la conservación de la biodiversidad (Kanninen, 2010), y desempeñan un papel clave en la mitigación del calentamiento global, mediante la captura de carbono (Paquette y Messier, 2010). Las plantaciones forestales diseñadas para proporcionar múltiples servicios ecosistémicos pueden reducir la presión sobre los bosques naturales, e incluso recuperar ciertos servicios ecológicos.

Acorde a lo antes mencionado el objetivo del presente documento es presentar una revisión actualizada e integral del estado del arte sobre crecimiento y rendimiento de las plantaciones forestales, con el cual se identifican las investigaciones realizadas y aspectos que faltan por conocer.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información de esta investigación proviene principalmente de la revisión de datos secundarios (derivados de bases de datos), y se complementó con una extensa revisión de material bibliográfico para respaldar la información recopilada sobre crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales (FAO, 2012; Jürgensen *et al.*, 2014; West, 2014; Payn *et*

al., 2015); silvicultura y calidad de madera (Briggs, 2010; Muñoz *et al.*, 2010; Watt *et al.*, 2011; Gagné *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2012; Campoe *et al.*, 2014); manejo de nutrientes (Richards *et al.*, 2010; Khouri *et al.*, 2010; Faustino *et al.*, 2011; Murillo *et al.*, 2014; Balám *et al.*, 2015; Oliva *et al.*, 2016; Tchichelle *et al.*, 2017); mejoramiento genético (Bradbury *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2011; Raymond, 2011; Apiolaza, 2012; Aparicio, 2012; Vargas *et al.*, 2012; Mora *et al.*, 2013; Ávila-Arias *et al.*, 2015a; Ávila-Arias *et al.*, 2015b).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Plantaciones forestales

La Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) define plantaciones forestales como bosques compuestos predominantemente de árboles establecidos mediante plantación o siembra, en la que se espera que los árboles plantados/ sembrados constituyan más de 50% del material en pie en la madurez (FAO, 2012); por su parte la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) especifica que una plantación forestal comercial es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos de uso agropecuario o terrenos que han perdido su vegetación forestal natural (CONAFOR, 2017). Desde 1980 la FAO a través de las Evaluaciones de los Recursos Forestales (ERF), ha recopilado datos sobre las zonas forestales para dos categorías principales de bosques: bosques naturales y plantaciones forestales (Evans, 2009).

La superficie forestal plantada a nivel mundial se incrementó considerablemente entre 1990 y 2015 pasando de 167.5 a 277.9 M ha. El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) y el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA) han sugerido que una tasa de incremento de 2.4% es necesario para satisfacer la demanda futura y suministrar madera y fibra, para compensar los impactos de la deforestación (WWF y IIASA, 2012). Mientras que las tasas anuales de superficie plantada fueron mayores en los períodos de 1990-2000 (2%) y en 2000-2005 (2.7%); para 2005-2010 fue de 1.9% y 2010-2015 fue de 1.2% con base en lo anterior Payn *et al.* (2015) mencionan que existen factores por los cuales ocurre ésta disminución, entre los que destacan las prácticas de manejo y las tendencias de cambio climático. De los 277.9 M ha de plantaciones forestales, 56% se encuentran en la región templada, 15% en la zona boreal, 20% tropical y 9% en regiones tropicales y subtropicales. La región de mayor aumento de superficie es la templada (93.4-154.4 M ha) seguida por regiones tropicales, boreales y subtropicales. El este de Asia y Europa tienen el área más grande de plantación, seguidos por el norte y sur de América y del Sudeste de Asia (Payn *et al.*, 2015).

Las plantaciones forestales representan un papel en la compensación de la presión y los impactos negativos de los recursos naturales; la disminución de la superficie forestal natural se ve compensada por el aumento de la superficie forestal plantada, sin embargo, los objetivos son distintos. Éstas aumentaron de 4.1 a 7% de la superficie forestal total durante el período 1990-2015, o de 1.29 a 2.14% de la superficie terrestre total. Entre 18 y 19% de las superficies plantadas incluyen especies introducidas, es decir no nativas (*Eucalyptus*, *Pinus patula*, *Tectona grandis*). En la Figura 1 se muestra la superficie de plantaciones con especies introducidas en diferentes regiones (Payn *et*

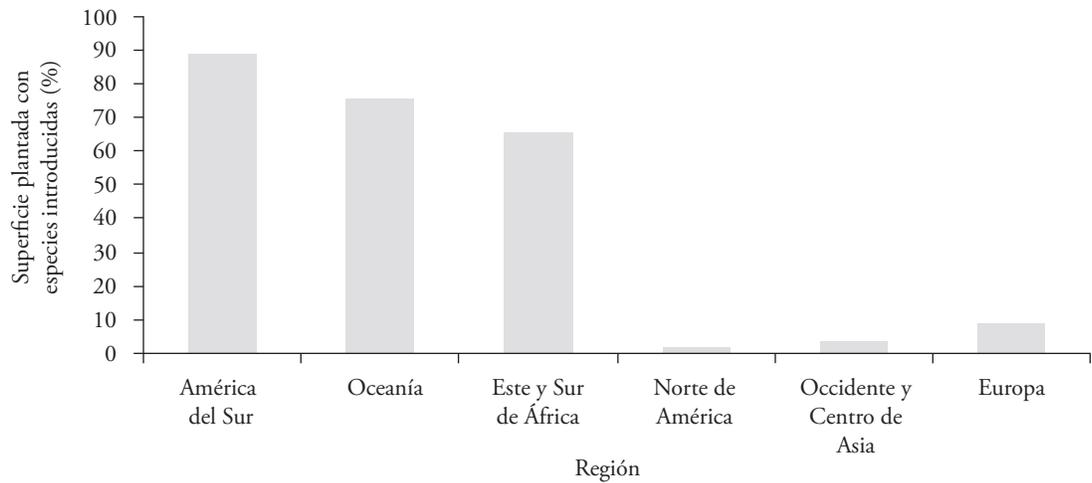


Figura 1. Superficie de plantaciones con especies introducidas en diferentes regiones del mundo (Payn *et al.*, 2015).

al., 2015), destacan por su alta superficie plantada con especies introducidas América del Sur, Oceanía y Este y Sur de África, las cuales promedian 76%.

Tendencias a nivel mundial

De la superficie mundial de plantaciones forestales con especies introducidas 85% se distribuyen en Asia, América, el Caribe, y el centro, este y sur de África. En la Figura 2 se observa que China tiene el área de plantaciones forestales más extensa del mundo con una superficie de 91.8 Mha, seguida por EE.UU. con 26.4 Mha de, 19.8 Mha de Rusia y 15.8 Mha de Canadá para el período 2010-2015.

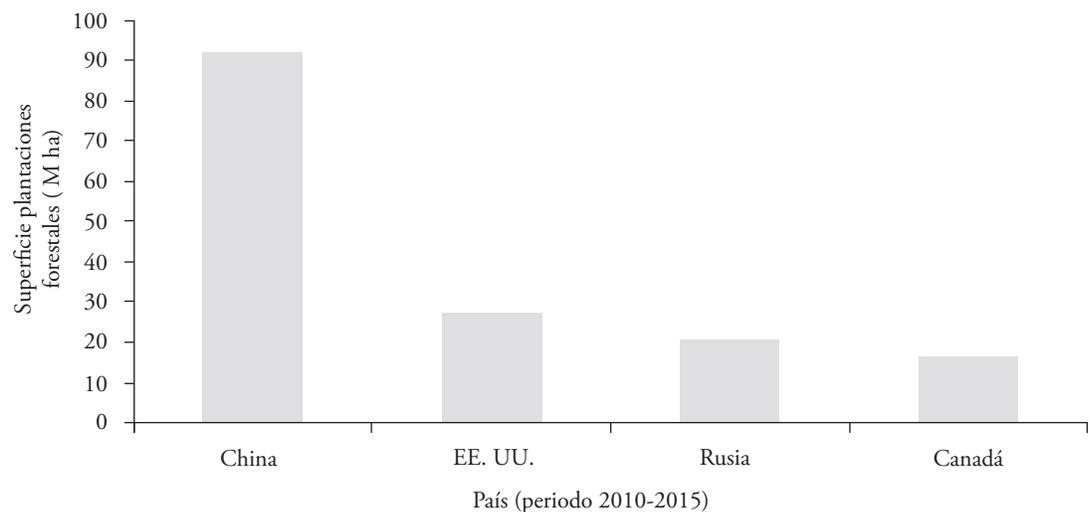


Figura 2. Superficie con plantaciones forestales (Payn *et al.*, 2015).

China registró el mayor aumento de la superficie seguido de Canadá, EE. UU. y Rusia. El siguiente nivel de aumento de superficie lo presentaron India y Suecia, Brasil y Finlandia en el período 2010-2015 (Figura 3).

En general, la tasa mayor de áreas plantadas fue en el período 2000-2005 con 2.7%, ésta disminuyó para 2005-2010 a 1.9%. La disminución de la tasa de plantación fue común en la mayoría de los países en sólo tres de los 20 países productores de madera en rollo (Chile, Sudán y Ucrania) durante el periodo 2010-2015 (Payn *et al.*, 2015).

Rendimiento de las plantaciones forestales

Las diferentes especies establecidas en plantaciones forestales a nivel mundial que muestran mayores niveles de productividad, menor tiempo de rotación, mayor superficie estimada y los principales países productores, se resumen en el Cuadro 1. Las plantaciones forestales de rápido crecimiento se definen en términos generales como aquellas que tienen tasas de crecimiento promedio que van desde ≤ 10 hasta ≤ 40 m³/ha/año, con rotaciones más cortas desde ≤ 6 años hasta alrededor de 35 o 40 años.

Tendencias de producción de madera (abastecimiento de madera en rollo)

El abasto de madera en rollo industrial es la principal variable de producción. A nivel mundial, en el año 2012, 46.3% de la madera en rollo (m³/rollo) se originó de plantaciones forestales (Cuadro 2), de los cuales 65% fue de plantaciones tropicales y subtropicales, 45% de plantaciones templadas y sólo 14% de la zona boreal (Jürgensen *et al.*, 2014). Los valores menores para las zonas boreales y templadas podrían ser porque las plantaciones forestales en estas áreas son jóvenes para producir madera. Sin embargo, dadas las grandes áreas de plantaciones forestales, especialmente en la zona templada (25.78% de la superficie forestal total), se tiene un potencial para una producción mayor en el futuro a partir de éstas. El aumento de la superficie plantada en las regiones debe ocasionar un incremento importante de la producción de madera en las próximas

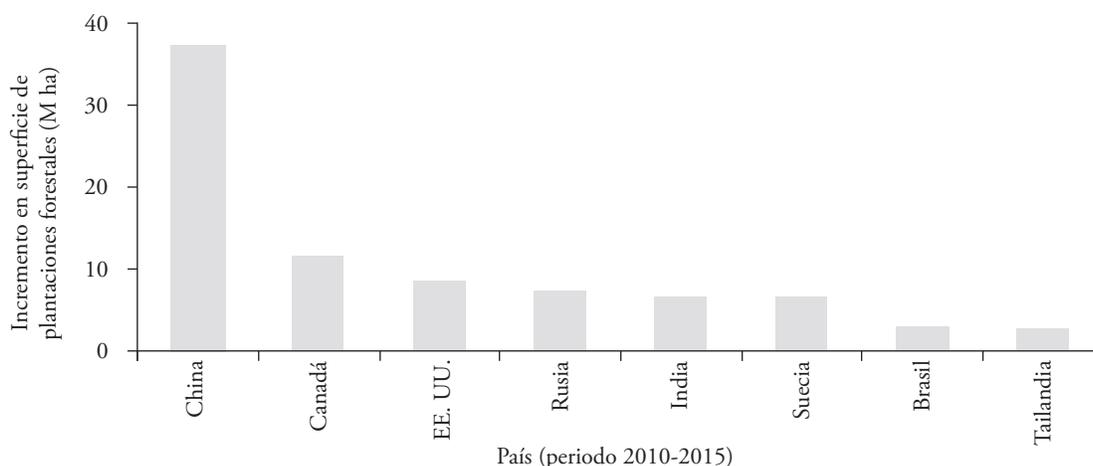


Figura 3. Incremento en la superficie de plantaciones forestales (Payn *et al.*, 2015).

Cuadro 1. Rendimiento maderable de plantaciones forestales*.

Especies	IMA* (m ³ /ha/año)	Tiempo de rotación (años)	Extensión estimada (1000 ha)	Principales países (en orden decreciente de importancia)
<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden, e híbridos	15-40	5-15	±3,700	Brasil, Sudáfrica, Uruguay, India Congo, Zimbabwe
<i>Eucalyptus</i> spp	10-20	5-10	±1,550	China, India, Tailandia, Vietnam, Madagascar, Myanmar
<i>Eucalyptus</i> zonas templadas	5-18	10-15	±1,900	Chile, Portugal, España, Argentina, Uruguay, Sudáfrica, Australia
<i>Acacias</i>	15-30	7-10	±1,400	Indonesia, China, Malasia, Vietnam, Filipinas, Tailandia
<i>Pinus</i>	8-35	10-18	±300	Venezuela, Argentina, Chile, Nueva Zelanda, Suazilandia
<i>Gmelina arborea</i> Roxb	12-35	12-20	±100	Costa Rica, Malasia, Islas Salomón
<i>Paraserianthes falcataria</i> (L.) I.C.Nielsen	15-35	12-20	±200	Indonesia, Malasia, Filipinas
<i>Populus</i>	11-30	7-15	±900	China, India, Estados Unidos, Europa, Turquía
Plantaciones extensivas (Especies nativas)				
Regeneración convencional de coníferas tras el aclareo	2-6			Canadá
Silvicultura intensiva	2-7			Escandinavia
Bosques Naturales				Norteamérica, Europa, China, Rusia
Manejo extensivamente	1-3			
Bosques Certificados	<1			Mundial

*IMA= Incremento Medio Anual.

Fuente: elaborado con información obtenida de Park *et al.* (2012).

décadas. Lo anterior indica que en el futuro la madera provendrá más aún de plantaciones forestales (Payn *et al.*, 2015).

La producción de madera en rollo de las plantaciones forestales en el año 2012 fue aproximadamente de poco más de 770,200 M m³, en América del Sur de 193 M m³, Asia 165,300 M m³, y América del Norte y Central 171,700 M m³. El Caribe y África septentrional produjeron considerablemente menos, entre 300 y 400 M m³. Las regiones de Oceanía, África y Asia albergan países con plantaciones forestales intensivas altamente desarrolladas usando especies exóticas de rápido crecimiento (Payn *et al.*, 2015).

En 2012, países como China, Estados Unidos, Rusia Canadá, Suiza, India, Japón, Brasil, Finlandia, Sudán, Alemania, Indonesia, Ucrania, Tailandia, Vietnam, Turquía, Chile, España, Nueva Zelanda y Australia produjeron en conjunto 87% de la producción industrial mundial de madera en rollo a partir de plantaciones forestales, con un total de 675 M m³; lo que refleja las oportunidades de grandes aumentos de la producción en países como China, donde la superficie es elevada y la producción es actualmente relativamente baja porque muchas de las plantaciones son todavía jóvenes (Payn *et al.*, 2015).

La necesidad global de producción de madera ha llevado a la plantación de especies seleccionadas sobre la base de su capacidad de adaptación a las condiciones locales y a su rápido crecimiento (Dodet y Collet, 2012). Para evaluar las tasas de crecimiento, el propietario de

Cuadro 2. Superficie y producción de madera en rollo de plantaciones forestales por región y tipo climático.

	Superficie forestal total 2015 (Mha)	Superficie forestal plantada 2015 (Mha)	Variación porcentual anual de la superficie forestal plantada 1990-2015	Madera en rollo de plantaciones forestales 2012 (1000 m ³)	Madera industrial en rollo (%)
Mundial	3,999.1	277.9	2.0	770,200	46.3
Tropical	1,770.1	56.8	2.5	255,300	63.7
Subtropical	320.0	24.7	1.2	69,600	64.7
Templado	1,031.0	154.4	2.0	410,100	45.2
Boreal	877.3	41.9	2.0	35,200	13.9
América del Sur	842.0	15.0	2.5	193,000	89.8
Oceanía	173.5	4.3	1.9	47,500	84.0
África oriental y meridional	274.8	4.6	1.2	20,700	64.7
Caribe	7.1	0.7	2.4	300	24.7
Asia Oriental	257.0	91.8	2.2	78,700	46.9
América central	86.2	0.4	0.6	1600	18.0
África occidental y central	313.0	3.2	3.2	5100	14.1
Asia meridional y sudoriental	292.8	29.9	3.4	82,700	52.0
África septentrional	36.2	8.4	0.9	400	15.7
Europa	1,015.4	70.4	1.3	166,200	33.4
Asia occidental y central	43.5	6.7	2.1	3900	19.1
Norteamérica	657.1	42.1	2.5	170,100	36.0

Fuente: elaborado con información obtenida de Jürgensen *et al.* (2014).

una plantación necesitará alguna forma de medir y mostrar los resultados de la evaluación (West, 2014).

La estimación de producción en silvicultura comprende el volumen fustal en pie, y la biomasa que muere o es removida por aclareos. Estos datos de producción tal como figuran en los modelos de producción o los modelos de crecimiento con bases dendrométricas no incluyen la hojarasca (hojas, ramas, corteza) ni el reciclaje de las raíces. En cambio, los modelos con bases eco fisiológica o en balances de carbono y elementos minerales en los rodales, la producción incluye esta renovación de los órganos (Picard *et al.*, 2012).

Una medida de la capacidad productiva que se ha utilizado, es conocida como índice del sitio, que se define como la altura dominante (que es el promedio altura de los árboles más altos de un rodal) a una edad determinada (Yuancai y Parresol, 2001). Las investigaciones realizadas en diversos tipos de bosques han demostrado que ésta medida se correlaciona estrechamente con la producción de biomasa. La altura de los árboles dominantes (H_0) constituye el principal motor de la mayoría de los modelos de crecimiento con bases dendrométricas (García, 2011). Una segunda medida, es el incremento medio anual (IMA) de madera del rodal observado en un sitio (West, 2014). Los modelos de crecimiento y producción permiten predecir el desarrollo de los árboles o masas forestales a los silvicultores y gestores forestales (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). A través de la información de crecimiento se estima la edad de rotación

óptima para cosecha y se decide cuándo y con qué intensidad aplicar tratamientos silvícolas como aclareos y podas (De Groot y Van der Meer, 2010).

Los modelos matemáticos de crecimiento forestal basados en procesos, son aquellos que involucran procesos fisiológicos que ocurren en las plantas y cómo estos son afectados por las condiciones ambientales en las que las plantas están creciendo (West, 2014), los cuales incluyen:

1. La forma en que sus hojas están dispuestas en el dosel para interceptar la luz solar.
2. La eficiencia química de su sistema fotosintético.
3. La forma en que sus procesos metabólicos se ven afectados por la temperatura del aire.
4. Su capacidad para mantener sus estomas abiertos a medida que disminuye la disponibilidad de agua en el suelo.
5. El tamaño y distribución de sus raíces finas en el suelo y su eficiencia en la toma de agua y nutrientes.

Silvicultura y calidad de madera

A medida que los mercados se han preocupado cada vez más por la calidad de la madera suministrada por las plantaciones, ha aumentado el interés por los efectos sobre las propiedades de la madera del ambiente en el que se cultivan las plantaciones (Briggs, 2010), se incluyen factores del sitio, como fertilidad del suelo y el clima, así como los efectos de las prácticas silvícolas que se aplican para promover el crecimiento de las plantaciones. Se ha prestado especial atención a los efectos sobre la densidad básica de la madera y dureza, ya que ésta última está mayormente correlacionada con la densidad (Watt *et al.*, 2010).

Las condiciones ambientales que aceleran el crecimiento del fuste de los árboles, ya sea debido a las características del sitio o prácticas silvícolas, conducen a menudo a la producción de madera con una dureza reducida de acuerdo con Watt *et al.* (2011); sin embargo, el efecto no siempre ocurre y el aclareo no tiene ninguna consecuencia sobre la dureza de la madera como lo exponen Gagné *et al.* (2012) sobre plantaciones de *Picea glauca*, donde ésta práctica silvícola no tuvo efectos sobre la dureza de la madera.

La aceleración de la tasa de crecimiento del diámetro del fuste a menudo conduce también a una reducción de densidad básica de la madera como lo indican Park *et al.* (2012) en una plantación clonal de *Picea glauca*. Aunque no siempre, como lo señalan Muñoz *et al.* (2010) en plantaciones de *Eucalyptus nitens*, evidenciaron que ocho años después del aclareo, éste no tuvo efecto significativo. Con base en lo anterior West (2014) indica que existe poca evidencia que los tratamientos silviculturales por sí mismos conduzcan a efectos en las propiedades de la madera.

Por otra parte, la silvicultura intensiva por ejemplo manejando fertilización o control de malezas en comparación con la silvicultura tradicional, reduce el estrés ambiental durante los primeros años de la plantación, lo que da lugar a un aumento significativo del crecimiento y la capacidad de adaptación y supervivencia de los árboles, tal es el caso de *Eucalyptus* (Villalba *et al.*, 2010; Campoe *et al.*, 2014).

Manejo de nutrientes

La productividad de las plantaciones forestales está en función del suministro, captura y eficiencia en el uso de los recursos (Richards *et al.*, 2010); de acuerdo a lo antes mencionado Fisher y Binkley (2000) señalan que para mantener la productividad forestal es esencial conservar los nutrientes del suelo, los cuales dependen del balance positivo entre las entradas y salidas de estos nutrientes en el sistema. West (2014) menciona que los primeros años de crecimiento de una plantación son particularmente cruciales para el suministro de nutrientes, cualquier escasez que ocurra en el suministro de nutrientes puede ser compensada por la fertilización. Sin embargo, la fertilización es costosa y sólo debe utilizarse si el aumento de la producción resultante puede justificarse económicamente, además, es importante que sea del tipo correcto y que se aplique en la etapa y cantidad adecuada para compensar las necesidades de los árboles en crecimiento; resulta indiscutible la necesidad de una fertilización proporcionada como lo demuestran Khouri *et al.* (2010) para conservar el equilibrio nutricional en el crecimiento de los árboles en las plantaciones forestales. Faustino *et al.* (2011) demuestran que la aplicación preparada de P y N sobre suelo pedregoso puede tener efectos negativos en el crecimiento de *Pinus taeda* establecido en plantaciones fundamentalmente producto de la acción depresiva del N; en plantaciones de *Tectona grandis*, Balám *et al.* (2015) determinaron que la aplicación alta de K puede afectar la absorción de otros nutrientes.

Con mejoramiento genético se puede evitar contratiempo en el desarrollo que involucra fertilizar con urea en el establecimiento, factor que provee el uso de esta práctica silvícola para recuperar o mantener la dotación de N de los sitios que están sujetos a repetidos ciclos de plantación y cosecha (Faustino *et al.*, 2012). Por su parte Calixto *et al.* (2015) manifiestan el potencial de la fertilización como método de control de la incidencia de *Hypsipyla grandella* en plantaciones de *Cedrela odorata*. La concentración foliar de nutrimentos, permite relacionar las variables de crecimiento con la nutrición de las plantaciones; además Murillo *et al.* (2014) mencionan que los nutrientes foliares varían con la edad, las concentraciones foliares de Ca, Mg, Mn, Fe y Al, muestran una tendencia a aumentar con la edad, mientras que las de N, K y Zn tienden a disminuir.

Correndo y García (2012) consideran que el análisis foliar es muy útil para relacionar al suelo con el estado nutricional del arbolado; este análisis foliar puede suministrar información directa sobre el estado nutricional de una masa forestal e información indirecta sobre el contenido de nutrientes del suelo, como lo realizado por Fraga *et al.* (2012) con el uso de funciones para modelar las concentraciones y contenidos de macro y micronutrientes en acículas de *Pinus pinaster* establecido en plantaciones como una función de la edad, donde destacan una buena relación entre el índice de sitio y la concentración de nutrientes; en plantaciones de *Tectona grandis*, Salcedo *et al.* (2014) determinaron que el contenido foliar de K no limita el crecimiento, las mayores concentraciones de N, P y K se presentan en hojas jóvenes, y destacan que de entre las variables edáficas, el contenido de arcilla presenta correlación positiva con el desarrollo del diámetro, donde los suelos con mayor proporción de arcilla y materia orgánica (MO) registran mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC), que favorece el crecimiento.

Fernández *et al.* (2010) indican que los incrementos en productividad representan un elevado potencial de exportación de nutrientes lo cual aumenta la importancia de aplicar técnicas como el mantenimiento de los residuos de cosecha; por su parte Martiarena *et al.* (2011) calcularon el efecto de la intensidad de aclareo sobre la conservación y estabilidad de N, K, Ca, y Mg en distintos estratos de una plantación de *Pinus taeda* con densidades remanentes de 711, 364 y 122 árboles/ha, observaron que el contenido de N, K, Ca y Mg en el sistema se redujo en la medida que se incrementó la intensidad de aclareo, igual proporción mostraron las exportaciones de nutrientes del fuste y del árbol completo; concluyen que el índice de nutrientes remanentes (INR) muestra la conveniencia de aplicar una cosecha de fustes y conservar los residuos de la cosecha. En plantaciones de *Pinus patula*, Oliva *et al.* (2016) reportan una ligera reducción de pH (4.50) comparado con áreas sin pino (4.83), y la materia orgánica se incrementa; con relación al K las áreas con pino exhibieron cantidades menores (109.50 ppm) y las áreas sin pino (135.73 ppm), esto mismo ocurre con el contenido de P. La baja disponibilidad de fósforo en suelos andosoles y el exceso de aluminio activo limitan el desarrollo y la producción de las plantaciones forestales (Álvarez *et al.*, 2013).

Con respecto a las concentraciones de nutrientes disponibles en la capa superior del suelo Lutter *et al.* (2015) concluyeron que las concentraciones de N y P disponible se habían mantenido al mismo nivel, caso contrario al K y pH_{KCl} los cuales disminuyeron de forma significativa durante los 13 años transcurridos entre los dos monitoreos de una plantación de *Betula pendula*, por lo tanto el horizonte A de antiguos suelos agrícolas proporciona suficientes nutrientes para asegurar una alta productividad de los árboles. Por su parte Tchichelle *et al.* (2017) mencionan que el establecimiento de plantaciones de eucalipto en suelos arenosos pobres conduce a una alta pérdida de nutrientes, incluido el N después de la cosecha de madera; concluyen que los árboles de eucalipto se benefician del aumento de la disponibilidad de N en el suelo en rodales de especies mixtas.

Mejoramiento genético

Varios rasgos diferentes pueden modificarse a través del mejoramiento genético, como un crecimiento más vigoroso, resistencia a plagas o enfermedades o la calidad del producto (madera en árboles). La mayoría de los principales programas de plantaciones forestales de todo el mundo tienen un programa de mejoramiento asociado a ellos. Entre otros, los rasgos cuantitativos incluyen la tasa de crecimiento de los árboles, densidad de la madera del fuste o la resistencia al ataque de algunas plagas y enfermedades (West, 2014). En los programas de mejoramiento, siempre se debe tener en cuenta que los efectos ambientales modificarán el grado en que un árbol individual muestra cualquier rasgo, es por eso que se han examinado las interacciones genotipo \times medio ambiente en las propiedades de supervivencia, crecimiento y forma en plantaciones de *Acacia melanoxylon* (Bradbury *et al.*, 2010; Bradbury *et al.*, 2011); sobre plantaciones de *Pinus radiata* se examinaron las interacciones genotipo \times medio ambiente en la tasa de crecimiento del árbol, forma del fuste, forma de la rama, y densidad básica de la madera (Raymond, 2011; Apiolaza, 2012); y otras características sobre plantaciones clonales de *Populus* (Senisterra *et al.*, 2011); 80%

de árboles clonales de *Eucalyptus grandis* mostraron buena rectitud de fuste, mientras que el material de semilla sólo 21% de los árboles presentaron buena rectitud de fuste (Aparicio, 2012).

Con modelos de interacción clon-ambiente (análisis Bayesiano de parámetros genéticos del crecimiento) sobre una plantación clonal de *Eucalyptus globulus* Mora *et al.* (2013) se determinaron valores de heredabilidad bajo condiciones ambientales contrastantes ($H_2 = 0.41, 0.36$ y 0.39 para altura, diámetro y área basal). Sobre clones de dos procedencias de *Gmelina arborea* plantados en sitios planos, las variables dasométricas evaluadas no mostraron diferencias significativas como lo señalan Ávila-Arias *et al.* (2015a), Ávila-Arias *et al.* (2015b). A su vez Vargas *et al.* (2012) sugieren un alto potencial de mejoramiento al nivel de familia en crecimiento y productividad de plantaciones de *Acacia mangium*. Morales *et al.* (2013) emplearon 84 familias de medios hermanos de *Pinus patula*, para evaluar el incremento en volumen y adaptabilidad a diferentes altitudes, encontraron diferencias significativas en el crecimiento, determinaron que la mejor respuesta se presentó en sitios de menor altitud. En 13 familias de medios hermanos de *Pinus pseudostrubus* se observó plasticidad fenotípica en la cual algunas familias fueron competentes de modificar atributos en la producción y distribución de biomasa en respuesta a los niveles de competencia formados mediante densidades de plantación, y se identificaron diferentes estrategias de crecimiento en las familias evaluadas entre cada categoría de competencia (Cambrón *et al.*, 2013).

La ganancia genética lograda en plantaciones de *Eucalyptus* cultivados en rotaciones de 10 años para producción de madera para pulpa; el aumento del volumen de madera del fuste en pie promedió 8% a los 5 años de edad, se utilizaron semillas de una y dos generaciones de un programa de mejoramiento; las ganancias fueron mayores en los sitios con mayor productividad que en los menos productivos de acuerdo con Du Tiot *et al.* (2010). Dos generaciones de reproducción de álamos híbridos (*Populus tremula* × *Populus tremuloides*) aumentaron la producción de madera de fuste en un período de rotación de 25 años en un 25%; los híbridos entre varias especies de *Populus* han encontrado uso en Norteamérica y Europa debido a sus altas tasas de crecimiento (Tullus *et al.*, 2012). Ensayos de progenie de *Acacia mangium* con respecto a la ganancia genética esperada, registraron valores de heredabilidad media (40% y 50%), con base en lo anterior Pavlotzky y Murillo (2012) concluyen que, si seleccionaran los dos mejores individuos dentro de las mejores doce familias, se obtendrá una ganancia genética de 40.85% en volumen comercial/ha, a una tasa de 22.9 m³/ha/año. Investigaciones en plantaciones de *Populus* incluyen la ingeniería genética para que el metabolismo hormonal modificado afecte la tasa de crecimiento y las características de la madera (Han *et al.*, 2011); en plantaciones de *Eucalyptus globulus* se incluye la ingeniería genética para la tolerancia a la alta salinidad del suelo (Matsunaga *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES

Aunque los estudios sobre crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales comerciales son una actividad importante de investigación a nivel mundial, la mayoría de éstas actividades se limitan a ciertas regiones, tipos de plantaciones y especies. Se necesita realizar

más investigación para cubrir regiones poco representadas, tipos de plantaciones, formas particulares de crecimiento y clases de árboles.

Las investigaciones sobre crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales comerciales se encuentran focalizadas sobre unas cuantas especies; sin embargo, existe una amplia diversidad de especies tanto nativas como exóticas con alto potencial de aprovechamiento maderable, sobre las cuales se deben dirigir para generar éste conocimiento, el cuál puede ser considerado como una opción tanto para poseedores, manejadores e inversionistas.

Resulta indispensable que las investigaciones proporcionen una comprensión completa sobre la biología y procesos fisiológicos, la eficiencia del uso de recursos que controlan el desarrollo de la madera y sobre mejoramiento genético de las especies de interés para establecer en plantaciones, las características agroecológicas del área a plantar y definir los objetivos sobre el destino de la producción, para que sea encaminada hacia la sustentabilidad; además se deben tomar en cuenta las tendencias sobre cambio climático.

Conflicto de interés: los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Álvarez-Sánchez ME, Hernández-Acosta E, Maldonado-Torres R, Rivera-González M. 2013. Enclado y micorriza para corregir deficiencia de fósforo en un Andisol cultivado con *Pinus halepensis*. *Madera y Bosques*. 19(1): 7-16.
- Aparicio JL. 2012. Comportamiento de clones de *Eucalyptus grandis* en relación a un material de semilla en un suelo arenoso de Corrientes. *In: XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos*. Octubre de 2012. Argentina. http://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2012/trab_res_pos/526.1.R.Aparicio.pdf (Consulta: 16/04/2018).
- Apiolaza LA. 2012. Basic density of *Pinus radiata* in New Zealand: genetic and environmental factors. *Tree Genetics & Genomes*. 8: 87-96.
- Ávila-Arias C, Murillo-Cruz R, Murillo-Gamboa O, Sandoval-Sandoval C. 2015a. Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 12(28): 23-35.
- Ávila-Arias C, Murillo-Cruz R, Murillo-Gamboa O, Sandoval-Sandoval C. 2015b. Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 12(29): 02-14.
- Balám-Che M, Gómez-Guerrero A, Vargas-Hernández JJ, Aldrete A, Obrador-Olán JJ. 2015. Fertilización inicial de plantaciones comerciales de teca (*Tectona grandis* Linn F.) en el sureste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 38(2): 205-212.
- Bradbury GJ, Potts BM, Beadle CL. 2011. Genetic and environmental variation in wood properties of *Acacia melanoxylon*. *Annals of Forest Science*. 68(8): 1363-1373.
- Bradbury GJ, Beadle CL, Potts BM. 2010. Genetic control in the survival, growth and form of *Acacia melanoxylon*. *New forests*. 39(2): 139-156.
- Briggs D. 2010. Enhancing forest value productivity through fiber quality. *Journal of Forestry*. 108(4): 174-182. doi: 10.1093/jof/108.4.174
- Calixto CG, López MA, Equihua A, Lira DE, Cetina VM. 2015. Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandella* en respuesta al manejo nutricional. *Bosque*. 36(2): 265-273.
- Cambrón Sandoval VH, Suzán Azpiri H, Vargas Hernández JJ, Sánchez Vargas NM, & Sáenz-Romero, C. 2013. Estrategias de crecimiento y distribución de biomasa en *Pinus pseudostrobus* bajo diferentes condiciones de competencia. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36(1): 71-79.
- Campoe OC, Iannelli C, Stape JL, Cook RL, Mendes JCT, Vivian R. 2014. Atlantic forest tree species responses to silvicultural practices in a degraded pasture restoration plantation: From leaf physiology to survival and initial growth. *Forest Ecology and Management*. 313: 233-242. doi: 10.1016/j.foreco.2013.11.016
- Campos JJ, Alpizar F, Louman B, Parrotta JA. 2005. An integrated approach to forest ecosystem services. *In:*

- Mery, G., Alfaro, R., Kanninen, M. and Lovobikov, M.(eds) "Forests in the Global Balance–Changing Paradigms". International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). World Series Volume 17. pp: 97-116. Vienna, Austria. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/47887> (Consulta: 12/04/2018).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2017. Definición de plantación forestal comercial. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/plantaciones-forestales-comerciales-27940> (Consulta: 09/04/2018).
- Cordero A. 2011. Cuando los árboles no dejan ver el bosque: efectos de los monocultivos forestales en la conservación de la biodiversidad. *Acta Biológica Colombiana*. 16(2). <http://www.redalyc.org/html/3190/319028008018/> (Consulta: 12/04/2018).
- Correndo A, García F. 2012. Alternativas de diagnóstico para el manejo nutricional en cultivos extensivos. In: VI Congreso Boliviano de la Ciencia del suelo. 8 al 10 de noviembre de 2012. 412 p. [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/203773C7E19A701285257AB70039B4BE/\\$FILE/CORRENDO%20Y%20GARCIA%20-%20VI%20CBCS.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/203773C7E19A701285257AB70039B4BE/$FILE/CORRENDO%20Y%20GARCIA%20-%20VI%20CBCS.pdf) (Consulta: 16/04/2018).
- De Groot RS, Van der Meer PJ. 2010. Quantifying and valuing goods and services provided by plantation forests. In: J. Bausch, P. J. Van der Meer and M. Kanninen (eds). *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*. Washington DC, USA: Earthscan. https://s3.amazonaws.com/academia.edu/documents/41535905/Ecosystem_Goods_and_Services_from_Plantation_Forests_2010.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1541308683&Signature=%2B0%2FTud0H4azBc8NL%2B73ado22uA%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DEcosystem_Goods_and_Services_from_Planta.pdf#page=34 (Consulta: 13/04/2018). pp: 16-42.
- Diéguez-Aranda U, Alboreca AR, Castedo-Dorado F, González JÁ, Barrio-Anta M, Crecente-Campo F, Balboa-Murias MA. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Forestry*. 82: 1-16.
- Dodet M, Collet C. 2012. When should exotic forest plantation tree species be considered as an invasive threat and how should we treat them?. *Biological Invasions*. 14(9): 1765-1778. doi: 10.1007/s10530-012-0202-4
- Du Toit B, CW, Smith KM, Little G, Boreham RN, Pallett. 2010. Intensive, site-specific silviculture: Manipulating resource availability at establishment for improved stand productivity. A review of South African research. *Forest Ecology and Management*, 259 (9), 1836-1845.
- Evans J. 2009. *Planted forests: uses, impacts and sustainability*. Rome: CAB International and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Wallingford, U. K. 213 p. doi: 10.1079/9781845935641.0000
- Faustino L, Bulfe N, Pinazo M, Goya J, Martiarena R, Knebel O, Graciano C. 2011. Crecimiento inicial de *Pinus taeda* L. en suelo pedregoso de la provincia de Misiones, en respuesta a la fertilización con P y N. *Revista Forestal Yvyretá*. 18: 52-57.
- Faustino L, Bulfe N, Pinazo M, Graciano C. 2012. Crecimiento de cuatro familias de *Pinus taeda* en respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en el establecimiento de la plantación. *Revista de la Facultad de Agronomía La Plata*. 111(2): 54-63.
- Fernández RA, Martiarena R, Lupi AM, Von Wallis A, Pahr N. 2010. Crecimiento del *Pinus taeda* a los 12 años y condición química del suelo en el ne de argentina: efectos del manejo de residuos de cosecha en el establecimiento. Reunión Dinámica de las propiedades del suelo en diferentes usos y manejos. Soc. Uruguaya de Ciencia del Suelo. Internacional Society Tillage Reserch Organization. Colonia, Uruguay.
- Fisher RF, Binkley D. 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons. Inc. New York, USA.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2012. *Terms and Definitions. Forest Resources Assessment. Working Paper 180*. Rome, Italy. p. 31. <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf> (Consulta: 13/04/2018).
- Fraga CE, Rodríguez FS, Rodríguez-Soalleiro R. 2012. Macro y micronutrientes en acículas de *Pinus pinaster* de diferentes clases de edad y relación con el índice de sitio de las plantaciones. *Revista Real Academia Galega de Ciencias*. 31: 137-162.
- Gagné L, Lavoie L, Binot JM. 2012. Croissance et propriétés mécaniques du bois après éclaircie commerciale dans une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca*) âgée de 32 ans. *Canadian Journal of Forest Research*. 42(2): 291-302. doi: 10.1139/x11-181
- García O. 2011. Dynamical implications of the variability representation in site-index modelling. *European Journal of Forest Research*. 130(4): 671–675. doi: 10.1007/s10342-010-0458-0

- Han KM, Dharmawardhana P, Arias RS, Ma C, Busov V, Strauss SH. 2011. Gibberellin-associated cisgenes modify growth, stature and wood properties in *Populus*. *Plant Biotechnology Journal*. 9(2): 162-178.
- Jürgensen C, Kollert W, Lebedys A. 2014. Assessment of industrial roundwood production from planted forests. *Planted Forests and Trees Working Papers Series No. 48. Working Paper FP/48/E*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i3384e.pdf> (Consulta: 14/04/2018).
- Kanninen M. 2010. Plantation forests: global perspectives. *In: Bauhus, J. van der Meer, P., and Kanninen, M. (eds). Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*. Washington DC, USA: Earthscan. https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41535905/Ecosystem_Goods_and_Services_from_Plantation_Forests_2010.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1541308683&Signature=%2B0%2FXtUd0H4azBc8NL%2B73ado22uA%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DEcosystem_Goods_and_Services_from_Planta.pdf#page=34 (Consulta: 13/04/2018). pp: 1-15.
- Khouri EA, Canga Libano E, Oliveira Prendes JA, Gorgoso Varela JJ, Cámara Obregón MA. 2010. Crecimiento en volumen y estado nutricional de *Eucalyptus globulus* Labill y *Pinus radiata* D. Don en Asturias, España. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 1(1): 47-54.
- Lutter R, Tullus A, Kanal A, Tullus T, Vares A, Tullus H. 2015. Growth development and plant-soil relations in midterm silver birch (*Betula pendula* Roth) plantations on previous agricultural lands in hemiboreal Estonia. *European Journal of Forest Research*. 134(4): 653-667.
- Martirena RA, Pinazo MA, Von Wallis A, Knebel O, Pahr NM. 2011. Alternativas de manejo silvícola para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Ciencia del suelo*. 29(1): 39-48.
- Matsunaga E, Nanto K, Oishi M, Ebinuma H, Morishita Y, Sakurai N, Shimada T. 2012. Agrobacterium-mediated transformation of *Eucalyptus globulus* using explants with shoot apex with introduction of bacterial choline oxidase gene to enhance salt tolerance. *Plant Cell Reports*. 31(1): 225-235.
- Mora F, Rubilar R, Emhart VI, Saavedra J. 2013. Predicción bayesiana de parámetros genéticos en clones de *Eucalyptus globulus* bajo condiciones de suplemento hídrico. *Ciência Florestal*. 23(2): 529-536.
- Morales González E, López Upton J, Vargas Hernández JJ, Ramírez Herrera C, Gil Muñoz A. 2013. Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 36(2): 155-162.
- Muñoz F, Neira A, Cancino J. 2010. Efecto del raleo en la densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Interciencia*. 35(8).
- Murillo R, Alvarado A, Verjans JM. 2014. Concentración foliar de nutrimentos en plantaciones de teca en la cuenca del Canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*. 38(1).
- Oliva M, Silva RC, Espinoza TAE. 2016. Efecto de las plantaciones de *Pinus patula* sobre las características físicoquímicas de los suelos en áreas altoandinas de la región Amazonas. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*. 2(1): 28-36.
- Paquette A, Messier C. 2010. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 8(1): 27-34. doi: 10.1890/080116
- Park YS, Weng Y, Mansfield SD. 2012. Genetic effects on wood quality traits of plantation-grown white spruce (*Picea glauca*) and their relationships with growth. *Tree Genetics & Genomes*. 8(2). 303-311. doi: 10.1007/s11295-011-0441-z
- Pavlotzky-Blank B, Murillo-Gamboa O. 2012. Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en Los Chiles, zona norte de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 23(1): 93-106.
- Payn T, Carnus JM, Freer-Smith P, Kimberley M, Kollert W, Liu S, Wingfield MJ. 2015. Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management*. 352: 57-67. doi: 10.1016/j.foreco.2015.06.021
- Picard N, Saint-André L, Henry M. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Roma, Italia: FAO, CIRAD. <http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf> (Consulta: 14/04/2018). 213 p.
- Pretzsch H. 2009. Forest dynamics, growth, and yield. *In: Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer, Berlín, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-88307-4. pp: 1-39.
- Raymond CA. 2011. Genotype by environment interactions for *Pinus radiata* in New South Wales, Australia. *Tree Genetics & Genomes*. 7: 819-833.
- Richards AE, Forrester DI, Bauhus J, Scherer-Lorenzen M. 2010. The influence of mixed tree plantations on

- the nutrition of individual species: a review. *Tree Physiology*. 30(9): 1192-1208.
- Salas C, Gregoire TG, Craven DJ, Gilbert H. 2016. Modelación del crecimiento de bosques: estado del arte. *Bosque*. 37(1): 03-12. doi: 10.4067/S0717-92002016000100001
- Salcedo Pérez E, Pinedo Y, Luisa A, González Cruz R, Zamora Nátera JF, Rodríguez Macías R, Sánchez Hernández R. 2014. Efecto de las propiedades edáficas y el contenido nutrimental foliar sobre el crecimiento de teca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5(24): 80-91.
- Senisterra GE, Ducid MG, Gaspari FJ, Delgado MI. 2011. Evaluación de clones de *Populus spp.*, a los dos años de edad, en dos micrositios de la región pampeana, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*. 43(2): 133-144.
- Tchichelle SV, Epron D, Mialoundama F, Koutika LS, Harmand JM, Bouillet JP, Mareschal L. 2017. Differences in nitrogen cycling and soil mineralisation between a eucalypt plantation and a mixed eucalypt and *Acacia mangium* plantation on a sandy tropical soil. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*. 79(1): 1-8.
- Tullus A, Rytter L, Tullus T, Weih M, Tullus H. 2012. Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 27(1): 10-29.
- Vargas IJP, Camacho ME, Gamboa OM. 2012. Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *Acta Agronómica*. 61(2): 143-150.
- Villalba J, Montouto C, Cazaban J, Caraballo P, Bentancur O. 2010. Efecto del laboreo sobre la eficacia de herbicidas y el crecimiento de *Eucalyptus spp.* *Agrociencia Uruguay*. 14(2): 45-54. <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v14n2/v14n2a06.pdf> (Consulta: 15/04/2018).
- Watt MS, Zoric B, Kimberley MO, Harrington J. 2011. Influence of stocking on radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial. *Canadian Journal of Forest Research*. 41(7): 1422-1431.
- Watt MS, Palmer DJ, Kimberley MO, Höck BK, Payn TW, Lowe DJ. 2010. Development of models to predict *Pinus radiata* productivity throughout New Zealand. *Canadian Journal of Forest Research*. 40(3): 488-499. doi: 10.1139/X09-207
- West PW. 2014. *Growing Plantation Forests*. Lismore NSW, Australia: Springer. 332 p. doi: 10.1007/978-3-319-01827-0.
- WWF (World Wildlife Fund) and IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis). 2012. Chapter 3: Forests & Climate. In: G. Lyons and B. Jeffries (eds). *Living Forests Report*. Gland, Switzerland. http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/living_forests_chapter_3_spanish.pdf (Consulta: 15/04/2018). pp: 1-34.
- Yuancai L, Parresol BR. 2001. Remarks on height-diameter modeling (Vol. 10). US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. Asheville, NC. https://books.google.com.mx/books?id=7KC9Q4G-ruIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Consulta: 15/04/2018). 5 p.