

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO FORESTAL CON INFORMACIÓN
ESPACIALMENTE EXPLÍCITA DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL
COMERCIAL EN MÉXICO**

POR:

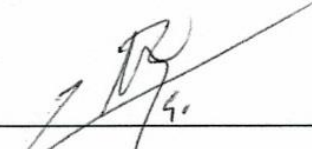
RICARDO TELLES ANTONIO

**Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

Agosto, 2019

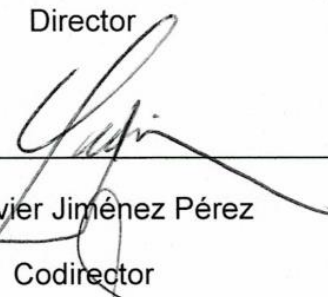
**ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO FORESTAL CON INFORMACIÓN
ESPACIALMENTE EXPLÍCITA DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL
COMERCIAL EN MÉXICO**

Aprobación de Tesis



Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Director



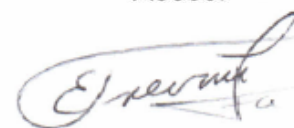
Dr. Javier Jiménez Pérez

Codirector



Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

Asesor



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Asesor



Dr. Héctor Manuel De Los Santos Posadas

Asesor

Agosto, 2019

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para los estudios de Posgrado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León.

A la Facultad de Ciencias Forestales por aceptarme como alumno del programa de Posgrado de Doctorado en Ciencias con Orientación en Manejo de Recursos Naturales.

Al Comité de Tesis conformado por Dr. Eduardo Alanís Rodríguez, Dr. Javier Jiménez Pérez, Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, Dr. Eduardo Javier Treviño Garza, Dr. Héctor Manuel De los Santos Posadas.

Al Profesor Eugenio Pérez Olascoaga propietario de la plantación forestal comercial de *Gmelina arborea* por permitir el acceso para la colecta de datos.

DEDICATORIA

A mi familia por estar siempre presente, especialmente a mi Madre.

A mis compañeros de Generación y de Posgrado.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
HIPÓTESIS	8
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS PARTICULARES	8
CAPÍTULO 1. CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES: UN ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LAS TENDENCIAS MUNDIALES	9
Resumen	9
Palabras clave	9
Abstract	10
Key words.....	10
Introducción	11
Materiales y Métodos.....	12
Resultados.....	13
Plantaciones forestales.....	13
Tendencias a nivel mundial	15
Rendimiento de las plantaciones forestales	16
Tendencias de producción de madera (abastecimiento de madera en rollo)	18
Silvicultura y calidad de madera	22
Manejo de nutrientes	23
Mejoramiento genético	26
Conclusiones	28
Bibliografía.....	28
CAPÍTULO 2. ESTIMACIÓN DE CARBONO ACUMULADO CON ECUACIONES ALOMÉTRICAS EN <i>Gmelina arborea</i> Roxb. ESTABLECIDA EN TLATLAYA, ESTADO DE MÉXICO	38
Resumen	38
Palabras clave	38
Abstract	39
Key words.....	39

Introducción	40
Objetivo	41
Materiales y Métodos.....	41
Área de estudio	41
Datos dasométricos.....	42
Estimación de biomasa aérea (fuste, ramas y follaje) y carbono acumulado	43
Análisis estadístico	44
Resultados.....	44
Discusión	48
Conclusiones	51
Bibliografía.....	52
CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE SITIO Y RENDIMIENTO DE	
<i>Gmelina arborea</i> ROXB. EN TLATLAYA, ESTADO DE MÉXICO	57
Resumen	57
Palabras clave	57
Abstract	58
Key words.....	58
Introducción	59
Objetivos.....	60
Materiales y Métodos.....	60
Área de estudio	60
Determinación de Índice de Sitio	61
Modelación del Rendimiento de la Plantación	63
Resultados.....	64
Determinación de Índice de Sitio	64
Modelación del Rendimiento de la Plantación	68
Discusión	71
Índice de Sitio	71
Rendimiento de la plantación	73
Conclusiones	74
Bibliografía.....	75

CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS EDÁFICAS Y TOPOGRÁFICAS ASOCIADAS CON EL CRECIMIENTO EN VOLUMEN DE <i>Gmelina arborea</i> ROXB. EN TLATLAYA, ESTADO DE MÉXICO	79
Resumen	79
Palabras clave	79
Abstract	80
Key words.....	80
Introducción	81
Objetivos.....	82
Materiales y Métodos.....	82
Área de estudio	82
Datos edáficos y topográficos.....	83
Análisis estadístico	84
Resultados y Discusión	85
Conclusiones	101
Bibliografía.....	102
CONCLUSIONES GENERALES	106

Índice de Tablas

Tabla	Pág.
Capítulo 1. Crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales: un análisis del estado actual de las tendencias mundiales	
1.1 Rendimiento maderable de plantaciones forestales	17
1.2 Superficie y producción de madera en rollo de plantaciones forestales por región y tipo climático	19
Capítulo 2. Estimación de carbono acumulado a partir de ecuaciones alométricas en una plantación de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. en Tlatlaya, Estado de México	
2.1 Comparación de medias, variables dasométricas de <i>G. arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	45
2.2 Comparación de medias, biomasa de fuste, ramas, raíz y total de <i>G. arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	46
2.3 Comparación de medias, carbono en fuste, ramas, raíz y total de <i>G. arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	47
Capítulo 3. Determinación de índice de sitio y rendimiento de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. en Tlatlaya, Estado de México	
3.1 Modelos utilizados para determinar el índice de sitio en la plantación de <i>Gmelina arborea</i> en Tlatlaya, Estado de México	62
3.2 Resumen del análisis de varianza para las ecuaciones de crecimiento en altura dominante de <i>Gmelina arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	65
3.3 Valores de estadísticos de bondad de ajuste del modelo de Schumacher de dos parámetros	68
3.4 Producción de <i>Gmelina</i> para ÍS 11 m, edad base 10 años y 1040 árboles/ha	69
3.5 Producción de <i>Gmelina</i> para ÍS 13 m, edad base 10 años y 1040 árboles/ha	70
3.6 Producción de <i>Gmelina</i> para ÍS 15 m, edad base 10 años y 1040 árboles/ha	70
Capítulo 4. Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. en Tlatlaya, Estado de México	
4.1 Características edáficas físicas analizadas en las parcelas de <i>G. arborea</i>	86
4.2 Características edáficas químicas analizadas en las parcelas de estudio	90
4.3 Características topográficas analizadas en los sitios de estudio	91
4.4 Crecimiento inicial y final promedio a diferentes mediciones de <i>Gmelina arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	92
4.5 Autovalores y porcentajes de varianza de los tres primeros componentes principales de las variables edáficas físicas analizadas	93
4.6 Coeficientes para las funciones de los tres componentes principales para las variables edáficas físicas	93
4.7 Autovalores y porcentaje de varianza para los 6 primeros	94

	componentes principales para las variables edáficas químicas estudiadas	
4.8	Coeficientes para las funciones de los seis componentes principales de las variables edáficas químicas	95
4.9	Autovalores y porcentaje de varianza para los 3 primeros componentes principales para las variables topográficas estudiadas	97
4.10	Coeficientes para las funciones de los tres componentes principales para las variables topográficas	97
4.11	Coeficientes de correlación entre volumen y las 11 variables independientes seleccionadas del ACP mediante el coeficiente de correlación de Pearson	99
4.12	Valores de los estadísticos de bondad de ajuste del modelo evaluado	100
4.13	Resultados de las pruebas los supuestos de la regresión	100

Índice de Figuras

Figura	Pág.
Capítulo 1. Crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales: un análisis del estado actual de las tendencias mundiales	
1.1 Superficie de plantaciones con especies introducidas en diferentes regiones del mundo	15
1.2 Superficie con plantaciones forestales (2015)	15
1.3 Incremento en la superficie de plantaciones forestales (2015)	16
Capítulo 2. Estimación de carbono acumulado a partir de ecuaciones alométricas en una plantación de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. en Tlatlaya, Estado de México	
2.1 Ubicación del área de estudio en el municipio de Tlatlaya, Estado de México	42
2.2 Distribución de los componentes de la biomasa total de árboles de <i>G. arborea</i>	46
2.3 Distribución de los componentes de carbono total acumulado en árboles de <i>G. arborea</i>	48
Capítulo 3. Determinación de índice de sitio y rendimiento de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. en Tlatlaya, Estado de México	
3.1 Ubicación del área de estudio en el municipio de Tlatlaya, Estado de México	61
3.2 Representación de los valores de edad-altura de la plantación de <i>Gmelina arborea</i> en Tlatlaya, Estado de México	64
3.3 Modelo de Schumacher y Korsun ajustados para las variables edad-altura para <i>Gmelina arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	66
3.4 Crecimiento en altura dominante para <i>Gmelina arborea</i> en una plantación en Tlatlaya, Estado de México	66
3.5 Familia de curvas anamórficas de Índice de Sitio para <i>Gmelina arborea</i> a una edad base de 10 años en Tlatlaya, Estado de México	67
3.6 Curvas de ICA e IMA de altura (H0), diámetro normal (DN), área basal (G), volumen (V), biomasa (B) y carbono (C) en la plantación de <i>Gmelina arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	71
Capítulo 4. Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. en Tlatlaya, Estado de México	
4.1 Ubicación de la plantación de <i>Gmelina arborea</i> establecida en Tlatlaya, Estado de México	87
4.2 Variabilidad explicada por los grupos de componentes principales de las características edáficas físicas	93
4.3 Correlación de los componentes principales 1 y 2 de las variables edáficas físicas	94
4.4 Variabilidad explicada por los grupos de componentes principales de las características edáficas químicas	95
4.5 Correlación de los componentes principales de las variables	96

	edáficas químicas	
4.6	Variabilidad explicada por los grupos de componentes principales de las características topográficas	97
4.7	Correlación de los componentes principales 1 y 2 de las variables topográficas	98
4.8	Porcentajes acumuladas de los residuales frente a la distribución normal para el modelo ajustado	100
4.9	Distribución de residuos del modelo ajustado de volumen fustal para <i>Gmelina arborea</i>	101

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue la estimación de la productividad de la plantación forestal comercial de *Gmelina arborea* Roxb en Tlatlaya Estado de México. Para evaluar la plantación se usó una muestra de 207 árboles y se ajustaron ecuaciones de biomasa, relación biomasa radical-biomasa total y el factor de conversión (FC), la aplicación de las ecuaciones alométricas sugieren que la plantación de *G. arborea* acumula 8.31 ton ha^{-1} de carbono a los tres años de edad.

Para evaluar la productividad y producción de manera dinámica se determinó el índice de sitio y el rendimiento; se ajustaron los modelos de crecimiento de Schumacher, Cuadrático, Von Bertalanffy y Korsun para generar curvas anamórficas, con base en datos de edad-altura dominante colectados de parcelas de muestreo con remediciones y se empleó el método de la curva guía. Con base en la bondad de ajuste, el cuadrado medio del error y la significancia de los parámetros, se eligió el modelo de Schumacher por mostrar tendencias deseables. Se establecieron tres curvas de índice de sitio con una edad base de 10 años, éstas se clasificaron en bajo (11 m), medio (13 m) y alto (15 m). Las tablas de producción se generaron para una densidad de 1040 árboles ha. Se espera que a los 10 años el IMA ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$) en volumen esperado varíe de 8.35, 10.92 y $13.30 \text{ m}^3/\text{ha}$ en función del índice de sitio

Finalmente para evaluar la influencia de las características edáficas y topográficas sobre el crecimiento en volumen, se realizó un análisis de componentes principales a partir de muestras edáficas analizadas con base en la NOM-021-RECNAT-2000. El modelo que considera apropiado para estimar con mayor precisión del volumen fustal en función de las variables Conductividad Hidráulica, Nitratos de Nitrógeno y la relación Ca/Mg, explica el 71.6 % de la variabilidad observada en el volumen.

ABSTRACT

The objective of the research was to estimate the productivity of the commercial forest plantation of *Gmelina arborea* Roxb in Tlatlaya, State of Mexico. To evaluate the plantation a sample of 207 trees was used and adjusted equations of biomass, ratio radical biomass to total biomass and conversion factor (FC), the application of allometric equations suggest that the plantation of *G. arborea* accumulates 8.31 ton ha⁻¹ of carbon at three years of age.

To dynamically evaluate productivity and production, site index and yield were determined; Schumacher, Cuadratic, Von Bertalanffy, and Korsun growth models were adjusted to generate anamorphic curves, based on age-dominant height data collected from remediated sample plots, and the guide curve method was used. Based on the goodness-of-fit, the mean square of the error and the significance of the parameters, the Schumacher model was chosen to show desirable trends. Three site index curves with a base age of 10 years were established, classified as low (11 m), medium (13 m) and high (15 m). Production tables were generated for a density of 1040 ha. It is expected that at 10 years the IMA (m³/ha/year) in expected volume will vary from 8.35, 10.92 and 13.30 m³/ha depending on the site index.

Finally, in order to evaluate the influence of soil and topographic characteristics on volume growth, an analysis of main components was made from soil samples analyzed based on NOM-021-RECNAT-2000. The model it considers appropriate to estimate with greater precision the stem volume as a function of the variables Hydraulic Conductivity, Nitrogen Nitrates and the Ca/Mg ratio, explains 71.6 % of the variability observed in the volume.

INTRODUCCIÓN

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 una plantación necesitará alguna forma de medir y expresarlos (West, 2014).

El desarrollo de las plantaciones forestales forma parte de un complejo enfoque evolutivo de adaptación para satisfacer las futuras demandas de productos maderables y no maderables y de una gama de servicios ambientales y sociales que las plantaciones pueden ofrecer (FAO, 2015).

Se espera que la producción de madera en rollo industrial procedente de plantaciones se duplique para el año 2030, pasando de los 400 millones de m³ actuales a 800 millones aproximadamente. Por tanto, el aumento de la oferta procedente de plantaciones satisfará gran parte del crecimiento de la demanda de madera durante este período.

Durante el periodo 2006-2015 la producción forestal maderable ha fluctuado, iniciando con 6.5 millones de metros cúbicos rollo (m³r) en 2006 y finalizando con 6.1 millones de (m³r) en 2015. El consumo aparente estimado de México en productos maderables y derivados de la madera en el año 2015 asciende a los 19,143 millones de metros³. De esta cantidad, 70% se importa principalmente de Chile, Canadá, Brasil y Estados Unidos (SEMARNAT, 2016).

Existen del orden de 14 millones de hectáreas de clima templado y tropical, aptas para desarrollar plantaciones forestales comerciales, de las cuales el 80% se ubica en regiones tropicales y sub-tropicales del país, con tipos de suelos y climas favorables para lograr crecimientos rápidos, disponibilidad de mano de obra y un mercado interno que demanda más materias primas forestales cada día (CONAFOR, 2014).

La productividad de las plantaciones forestales está en función del suministro, captura y eficiencia en el uso de los recursos (Richards *et al.*, 2010).

La estimación de producción en silvicultura comprende el volumen (o la biomasa) en pie, la que muere y/o removida por aclareo. Estos datos de producción tal como figura en los modelos de producción o los modelos de crecimiento con base dendrométrica no incluyen la hojarasca (hojas, ramas, corteza) ni el reciclaje de las raíces. En cambio, los modelos con base ecofisiológica 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 base dendrométrica (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 y/o masas forestales a los silvicultores y gestores forestales (Diéguez *et al.*, 2009). A través de la información de crecimiento se estima la edad de rotación óptima para cosecha y decidir cuándo y con qué intensidad aplicar tratamientos silvícolas como aclareos y podas (de Groot y van der Meer, 2010).

JUSTIFICACIÓN

Gmelina arborea es una especie forestal de rápido crecimiento y fácil adaptación a diversidad de condiciones de sitio, uso común en plantaciones por su valor comercial así como gran variedad de usos para su madera (Rojas *et al.*, 2004, Indira 2006, Moya *et al.*, 2010) además de ofrecer a los productores e inversionistas un rápido retorno de su capital invertido (Wee *et al.*, 2012) por ser de fácil trabajabilidad (González y Serrano, 2004) y buen acabado; además de poder ser utilizada en una amplia variedad de productos como muebles de alta calidad (Sánchez y Romero, 2004) así como para construcción, tableros contrachapados, lápices, etc. Además, posee un alto potencial para la elaboración de otros productos como tableros de fibras, tableros de partículas y pulpa para papel. (González y Serrano, 2004). México cuenta con una superficie establecida de plantaciones forestales comerciales de 270 mil hectáreas de las principales especies maderables establecidas entre ellas *Gmelina arborea* con 24, 061 hectáreas (CONAFOR, 2014). El Estado de México cuenta con 25 hectáreas de superficie plantada de la especie *Gmelina arborea* (CONAFOR, 2014). No obstante, se manifiesta, de manera reiterada, que existe un potencial de producción forestal muy promisorio en el país, lo cual exige que las inversiones se sometan necesariamente a un riguroso análisis de viabilidad tanto técnica como financiera.

Nomenclatura de la especie (CONAFOR; Jiménez, 2016).

Nombre científico: *Gmelina arborea* Roxb

Familia: *Verbenaceae*

Sinónimos: *Gmelina arborea* Linn

Nombres comunes: En América tropical se la conoce como melina, en Indonesia se le conoce como yemaney en la India gamari o gumadi. Otros nombres son gemelina, gmelina, gumhar, kashmir, tree, malay beachwood, snapdragon, teca blanca.

Ecología y distribución de la especie

Originario del Asia, en especial de la India en el Sub Himalaya, esporádicamente encontrándose en el Oeste y Sur de la India, se ha difundido a países del cinturón tropical, es un árbol razonablemente fuerte para su peso.

Se cultiva en zonas de vida de bosque húmedo y muy húmedo de la región tropical; como también en bosque húmedo montano bajo de la región subtropical.

Distribución natural

En su área de distribución natural se desarrolla en hábitat que varían desde húmedos hasta secos. Se encuentra en forma natural principalmente en las selvas mixtas de Birmania, asociado a *Tectona grandis*, *Terminalia tomentosa*, varias especies de latifoliadas.

Su máximo desarrollo lo alcanza en los bosques más húmedos de Birmania, sobre todo en valles húmedos y fértiles, en estas condiciones puede crecer hasta los 1 200 m de altitud.

Introducción de melina en países tropicales

La especie ha sido introducida en muchos países tropicales incluyendo Filipinas, Malasia, Gambia, Costa Rica, Burkina Faso, Costa de Marfil, Nigeria y Malawi, África; también es común encontrarla en Cuba, Colombia, Ecuador, Brasil, Venezuela, Guatemala y en la zona tropical de México.

Descripción morfológica de la especie

Gmelina arborea es una especie de rápido crecimiento, oportunista en los bosques húmedos y se clasifica como una pionera de vida larga. Su capacidad de rebrote es excelente y los brotes presentan un crecimiento rápido y vigoroso. Es caducifolia, en las zonas secas, puede llegar a medir 30 m de altura y presentar más de 80 cm de diámetro. Crece usualmente con un fuste limpio de 6 hasta 9 m y con una copa cónica.

Copa: presenta una copa amplia en sitios abiertos, pero en plantación su copa es densa y compacta.

Corteza: lisa o escamosa, de color marrón pálida a grisácea, en árboles de 6 a 8 años de edad se exfolia en la parte engrosada de la base del tronco y aparece una nueva corteza, de color más pálido y lisa.

Raíz: presenta un sistema radical profundo, aunque puede ser superficial en suelos con capas endurecidas u otros limitantes de profundidad.

Fuste: tiene un fuste marcadamente cónico, por lo regular de 50-80 cm de diámetro, en ocasiones hasta de 143 cm, sin contrafuertes pero en ocasiones engrosado en la base.

Hojas: grandes (10-20 cm de largo), simples, opuestas, enteras, dentadas, usualmente más o menos acorazonadas, de 10-25 cm de largo y 5-18 cm de ancho, decoloradas, el haz verde y glabra, el envés verde pálido y aterciopelado, nerviación reticulada, con nervios secundarios entre 3 y 6 pares y estípulas ausentes. Usualmente la especie se defolia durante los meses de enero o febrero en casi todas las regiones donde se cultiva. Las hojas nuevas se producen en marzo o a principios de abril

Flores: numerosas, amarillo-anaranjadas, en racimos, monoicas perfectas, cuya inflorescencia es un racimo o panícula cimosa terminal, cáliz tubular, corola con 4-5 sépalos soldados a la base del ovario, de color amarillo brillante, cáliz de 2,5 cm de largo y 4 estambres.

Frutos: es un fruto carnoso tipo drupa, de forma ovoide u oblonga, carnoso, succulento, con el pericarpio coriáceo y endocarpio óseo, de color verde lustroso, tornándose amarillo brillante al madurar, momento en que caen al suelo, lo que facilita su recolección. Para producir un kg de semilla de melina se necesita aproximadamente 14 kg de frutos.

Semillas: las semillas de esta especie se encuentran formando parte del endocarpio del fruto, son de forma elipsoidal, comprimidas, de 7-9 mm de largo;

testa color café, lisa, opaca, membranosa, muy delgada; el embrión es recto, comprimido, de color amarillocrema y ocupa toda la cavidad de la semilla; los cotiledones son dos, grandes, planos, carnosos y elipsoidales; la radícula es inferior y corta.

Hay de una a cuatro semillas por fruto, con promedio de 2,2 semillas/fruto, aunque se ha demostrado que el número de semillas por fruto varía dependiendo del origen de la fuente semillera (Dvorak, 2003).

Sitios óptimos para el desarrollo de melina

Los sitios más óptimos para lograr un buen crecimiento de la especie son terrenos profundos de textura ligera, crecen mejor en zonas bajas en donde existe acumulación de nutrientes, suelos bien drenados, esta especie no desarrolla en suelos pobres, secos e inundados es decir que no soportante suelos extremos.

Factores limitantes para el desarrollo de la especie

No crece bien en suelos arcillosos, en pendientes superiores a 30% con problemas de baja fertilidad, bajo contenido de materia orgánica, poca profundidad del suelo, inundados, erosionados, compactados y secos.

El crecimiento también se ve afectado en suelos superficiales, con capas endurecidas, impermeables y pedregosas, así como en suelos ácidos muy lixiviados o arenas secas.

El viento es otro factor limitante para su normal crecimiento, por lo que es primordial evitar estos sitios de plantación y perfilarse por sitios con buenas características y por lo general de topografía plana.

Requerimientos edáficos

Tabla 1. Necesidades edáficas para el buen crecimiento de *Gmelina arborea*

Parámetro ambiental	Ámbito
Textura de suelos	Franca y franca arcillosa, no crece bien en suelos arcillosos
pH de suelos	5-6
Topografía del terreno	Terrenos planos ondulados
Pendientes del terreno	No superiores al 30%
Profundidad efectiva de suelos (cm)	Mínima de 60, óptima más de 100
Pedregosidad	Preferiblemente en terrenos sin pedregosidad
Fertilidad	Prefiere suelos fértiles
Resistencia a vientos	Es una especie intolerante a vientos fuertes
Humedad del suelo	No soporta suelos inundados, ni siquiera en forma temporal

Requerimientos climáticos

Tabla 2. Necesidades climáticas para el buen crecimiento de la especie *Gmelina arborea*

Parámetro ambiental	Ámbito (óptimos)
Distribución altitudinal	0-900 (0-600) (msnm)
Precipitación	1000-4000 (2000-2500) (mm)
Temperatura	18-38 (24-29) (°C)
Régimen de lluvia	8-9 meses de lluvia con 3-4 meses secos
Temperamento	Heliófila
Zonas de vida	Bosque seco tropical, bosque húmedo y muy húmedo tropical

HIPÓTESIS

El crecimiento y rendimiento en la plantación forestal de *Gmelina arborea* Roxb. está influenciado por las variables ambientales.

OBJETIVO GENERAL

Estimación de la productividad de la plantación forestal comercial de *Gmelina arborea* Roxb en Tlatlaya estado de México.

OBJETIVOS PARTICULARES

- 1.- Estado del Arte: Crecimiento y Rendimiento de plantaciones forestales: Un análisis del estado actual de las tendencias mundiales.
- 2.- Estimación de carbono acumulado con ecuaciones alométricas en *Gmelina arborea* Roxb. establecida en Tlatlaya, Estado de México
- 3.- Determinación de índice de sitio y rendimiento de *Gmelina arborea* Roxb. en Tlatlaya, Estado de México
- 4.- Analizar las características edáficas (físicas y químicas), y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de *Gmelina arborea* Roxb. en Tlatlaya, Estado de México.

CAPÍTULO 1. CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES: UN ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LAS TENDENCIAS MUNDIALES

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 Mha, a nivel mundial, el 46.3 % de la madera en rollo industrial en 2012, procedió de plantaciones forestales. Ha aumentado el interés por los efectos sobre las propiedades de la madera del ambiente en las que se cultivan; 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, 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.

Manuscrito sometido a Agricultura, Sociedad y Desarrollo, Junio de 2019.

Abstract

The growth of trees is variable because it depends on the genetic heritage of the individual, his environment, the stage of development and the action of man. The objective of this paper is to present an updated and comprehensive review of the state of the art on growth and yield of forest plantations, which identifies the research conducted and aspects that remain to be known. The forest area planted worldwide increased considerably between 1990 and 2015 from 167.5 to 277.9 Mha, worldwide, 46.3 % of industrial roundwood in 2012 came from forest plantations. Interest in the effects on the properties of wood in the environment in which it is grown has increased; the productivity of forest plantations is a function of supply, capture and resource use efficiency; several different traits can be modified through improvement, such as more vigorous growth, resistance to pests or diseases, or product quality. It is essential to know the biology of the species to be established in plantations and the agro-ecological characteristics of the area to be planted, as well as to define the objectives for the destination of the production. Research should provide a more complete understanding of the physiological processes, the efficiency of the use of resources that control the development of the wood, and genetic improvement.

Key words: Environmental and economic benefits, Wood, Mitigation of global warming, Allometric models, Productivity, Forestry.

Introducción

El crecimiento de los árboles es un fenómeno biológico complejo en el 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 constitución 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 o del propio árbol con 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 disociar 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 alimentar a los árboles de nutrientes y agua así como el clima general de la zona incluido el fotoperiodo, temperatura y precipitación, la intensidad de heladas o sequías, entre otros etc. La competencia entre los árboles dentro del rodal se mide con diferentes índices de densidad. Por último, la clasificación silvícola 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 establecer plantaciones para producir una gran proporción de la demanda mundial 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. Las plantaciones forestales tienen como objetivo

cultivar bosques de mayor producción en áreas limitadas, entre otros, como la producción de materia prima para la industria forestal. Para ello es importante considerar la silvicultura de las plantaciones, es decir, el manejo 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, leña, alimentos, forraje, recursos ornamentales, medicinales y oportunidades para la recreación. Los indirectos incluyen servicios como la regulación 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 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.

Materiales y Métodos

La información de esta investigación proviene principalmente de la revisión de datos (derivados de bases de datos), 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 *et al.*, 2014; Ávila *et al.*, 2015).

Resultados

Plantaciones forestales

La Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación define plantaciones forestales como bosques compuestos predominantemente de árboles establecidos mediante plantación y/o siembra, en la que se espera que los árboles plantados/sembrados constituyan más del 50 % del material en pie en la madurez (FAO, 2012); por su parte la Comisión Nacional Forestal 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.

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 de 167.5 a 277.9 Mha. 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 del 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 Mha de plantaciones forestales, el 56 % se encuentran en la región templada, 15 % en la zona boreal, 20 % tropical y el 9 % en regiones tropicales y subtropicales. La región de mayor aumento de superficie es la templada (93.4-154.4 Mha) seguida por regiones tropicales, boreales y subtropicales. El este de Asia y Europa tienen las áreas más grandes de plantación, seguidos por el norte y sur de América y del Sudeste de Asia (Payn et al., 2015).

Las plantaciones forestales juegan 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. Las plantaciones forestales aumentaron de 4.1 al 7 % de la superficie forestal total durante el período (1990-2015), o de 1.29 al 2.14 % de la superficie terrestre total. Entre 18 y 19 % de las plantaciones forestales manejan 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 al., 2015).

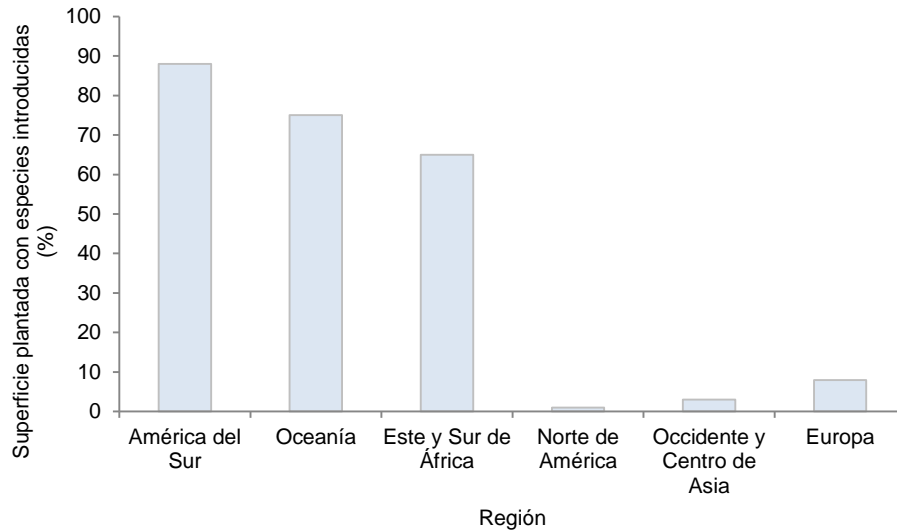


Figura 1. Superficie de plantaciones con especies introducidas en diferentes regiones del mundo.

Tendencias a nivel mundial

El 85 % de la superficie mundial de plantaciones forestales se distribuyen en América Central, el Caribe, y el centro, este y sur de África, en la Figura 2 se observa que China tenía las plantaciones forestales más grandes del mundo con una superficie de 91.8 Mha, seguidas de 26.4 de E.U.A., 19.8 de Rusia y 15.8 de Canadá para el año 2015.

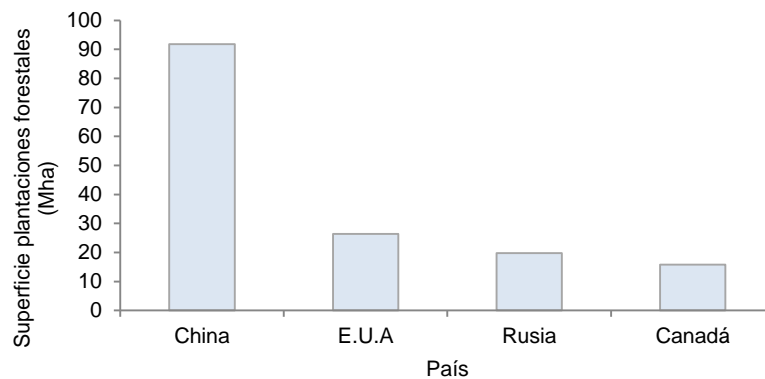


Figura 2. Superficie con plantaciones forestales (2015).

China registró el mayor aumento de la superficie seguido de Canadá, E.U.A y Rusia. El siguiente nivel de aumento de superficie lo presentaron India y Suecia, Brasil y Finlandia (Figura 3).

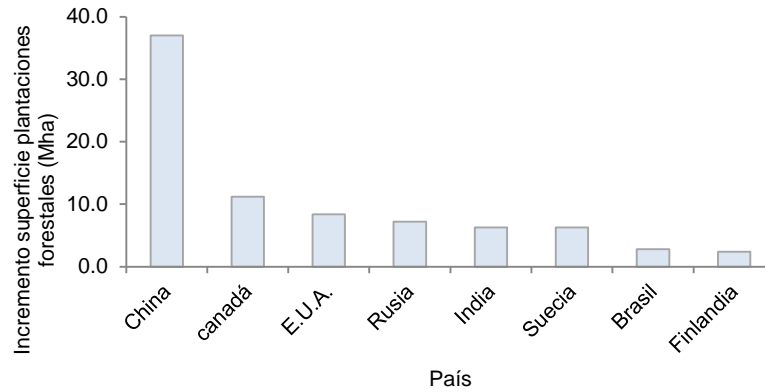


Figura 3. Incremento en la superficie de plantaciones forestales (2015).

En general, la tasa mayor de áreas plantadas fue en el período 2000-2005 con 2.7 %, ésta disminuyó para el 2005-2010 hasta 1.9 %. La disminución de la tasa de plantación fue común en la mayoría de los países con sólo tres de los 20 países productores de madera en rollo (Chile, Sudán y Ucrania) en los últimos 5 años (2010-2015) (Payn *et al.*, 2015).

Rendimiento de las plantaciones forestales

La Tabla 1 resume el rendimiento maderable de plantaciones forestales a nivel mundial.

Tabla 1. Rendimiento maderable de plantaciones forestales*. Adaptado de Park *et al.*, (2012).

Especies	IMA* (m ³ /ha/años)	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
Manejado extensivamente	1-3			
Bosques Certificados	<1			Mundial

*Las plantaciones forestales de rápido crecimiento se definen en términos generales como aquellos 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.

*IMA= Incremento Medio Anual.

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 2012, el 46.3 % de la madera en rollo (m^3 /rollo) se originó de plantaciones forestales (Tabla 2), de los cuales el 65 % fue de las plantaciones tropicales y subtropicales, el 45 % de plantaciones templadas y sólo el 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 más frías son demasiado 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 mucho mayor en el futuro a partir de éstas. Además, el aumento de la superficie plantada en todas las regiones debe producir un incremento correspondiente de la producción de madera en las próximas décadas. Lo anterior indica que en el futuro la madera provendrá más aún de plantaciones forestales (Payn *et al.*, 2015).

Tabla 2. Superficie y producción de madera en rollo de plantaciones forestales por región y tipo climático. (Adaptado de Jürgensen *et al.*, 2014).

	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

La producción de madera en rollo de las plantaciones forestales en el año 2012 fue aproximadamente de poco más de 200 Mm³, en América del Sur de 193 Mm³, Asia 165,300 Mm³, y América del Norte y Central 171,700 Mm³. El Caribe y África septentrional produjeron considerablemente menos, entre 300 y 47 Mm³. 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, 20 países (China, Estados Unidos, Rusia Canadá, Suiza, India, Japón, Brasil, Finlandia, Sudán, Alemania, Indonesia, Ucrania, Tailandia, Vietnam, Turquía, Chile, España, Nueva Zelanda, Australia) produjeron en conjunto el 87% de la producción industrial mundial de madera en rollo a partir de plantaciones forestales, con un total de 675 Mm³; 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 (Payn *et al.*, 2015).

Con base en la evaluación de los recursos forestales mundiales realizada en 2015, Payn *et al.* (2015) concluyen:

- 1.- La superficie forestal se redujo entre 1990 y 2015 de 4.12 Mha a 3.99 Mha. La región de los trópicos y subtropicos disminuyó en área de 1965.5 a 1770.2 y de 325.4 a 320.1 respectivamente, mientras que el boreal y el templado aumentaron de 1219.3 a 1224.5 y de 618.0 a 684.5 correspondientemente.
- 2.- Los cambios en la cubierta forestal variaron a nivel regional. Se restringió de 31.85 % a 30.85 % en Centroamérica, en el oriente y norte de África, Oceanía, América del Sur, Asia Meridional y Sudoriental, mientras que en el Caribe, el occidente, oriente y centro de Asia, Europa y América del Norte aumentó.
- 3.- Si bien la superficie forestal total acortó, la productividad forestal se incrementó entre 1990 a 2015 de un promedio de 4.10 m³ ha/año a 5.26 m³ ha/año con cambios que varían según la región geográfica.

4.- La productividad en la zona templada y la zona boreal fueron las que más se ampliaron ($1.91 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$).

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 una plantación necesitará alguna forma de medir y expresarlos (West, 2014).

La estimación de producción en silvicultura comprende el volumen (o la biomasa) en pie, la que muere y/o removida por aclareo. Estos datos de producción tal como figura en los modelos de producción o los modelos de crecimiento con base dendrométrica no incluyen la hojarasca (hojas, ramas, corteza) ni el reciclaje de las raíces. En cambio, los modelos con base ecofisiológica 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 base dendrométrica (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 y/o masas forestales a los silvicultores y gestores forestales (Diéguez *et al.*, 2009). A través de la información de crecimiento se estima la edad de rotación óptima para cosecha y decidir 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 circunstancias 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 las 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 la dureza de la madera 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 a 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* 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 el momento y en la cantidad justa para satisfacer las necesidades de los árboles en crecimiento; resulta evidente la necesidad de una fertilización equilibrada como lo indican Khouri et al. (2010) para mantener el proporción nutricional en el desarrollo del arbolado en las plantaciones forestales; Faustino et al. (2011) indican que la aplicación combinada 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. A través del mejoramiento genético se puede evitar la penalidad en crecimiento que implica fertilizar con urea en el establecimiento, factor que facilita la utilización 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 de acuerdo con 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 en el tallo, 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 orden mostraron las exportaciones en el fuste y sobre el árbol completo, el índice de nutrientes remanentes (INR) mostró la conveniencia de aplicar una cosecha de fustes y conservar los residuos de la cosecha. En plantaciones de *Pinus patula*, Oliva et al. (2016), con referencia al pH expresan una ligera reducción (4.50) respecto con áreas sin pino (4.83), 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 andisoles y el exceso de aluminio activo limitan el desarrollo y la producción de las plantaciones forestales según Álvarez et al. (2013).

Con respecto a las concentraciones de nutrientes disponibles en la capa superior del suelo Lutter et al. (2015) concluyen que las concentraciones de N y P disponible se habían mantenido al mismo nivel, caso contrario al K y pH_{KC} 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, 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. En los árboles, 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, ante ello 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); sobre plantaciones clonales de *Populus* (Senisterra *et al.*, 2011); el 80% de árboles clonales de *Eucalyptus grandis* mostraron buena rectitud de fuste, mientras que el material de semilla sólo el 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) determinaron valores de heredabilidad bajo condiciones ambientales contrastantes, obtuvieron ($H_2 = 0.41, 0.36$ 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 *et al.* (2014), Ávila *et al.* (2015). 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*, evaluaron 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 pseudostrobus* se observó plasticidad fenotípica en la cual algunas familias fueron capaces de modificar atributos en la producción y distribución de biomasa en respuesta a los niveles de competencia generados mediante densidades de plantación, y se identificaron diferentes estrategias de crecimiento en las familias evaluadas dentro de cada condición 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 a 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 del 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 importante actividad de investigación en México, la mayoría de éstas actividades se limitan a ciertas regiones, tipos de plantaciones y especies. Se necesita realizar más investigación para cubrir regiones que son subrepresentadas, 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 a establecer en plantaciones, las características agroecológicas del área a plantar y contar con los objetivos de destino de la producción, para que sea encaminada hacia la sustentabilidad; además se deben tomar en cuenta las tendencias sobre cambio climático.

Bibliografía

Álvarez-Sánchez, M. E., E. Hernández-Acosta, R. Maldonado-Torres y Rivera-González, M. (2013). Encalado y micorriza para corregir deficiencia de fósforo en un Andisol cultivado con *Pinus halepensis*. *Madera y Bosques*, 19(1), 7-16.

Aparicio, J. L. (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. Obtenido de http://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2012/trab_res_pos/526.1.R.Aparicio.pdf

Apiolaza, L. A. (2012). Basic density of *Pinus radiata* in New Zealand: genetic and environmental factors. *Tree Genet Genomes*, 8, 87–96.

Ávila-Arias, C., R. Murillo-Cruz, O. Murillo-Gamboa y C. Sandoval-Sandoval. (2014). 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., R. Murillo-Cruz, O. Murillo-Gamboa y C. Sandoval-Sandoval. (2015). 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., A. Gómez-Guerrero, J. J. Vargas-Hernández, A. Aldrete y J. J. Obrador-Olán. (2015). Fertilización inicial de plantaciones comerciales de teca (*Tectona grandis* L. F.) en el sureste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 205-212.

Bradbury, G. J., B. M. Potts and C. L. Beadle. (2011). Genetic and environmental variation in wood properties of *Acacia melanoxylon*. *Ann For Sci*, 68, 1363–1373.

Bradbury, G. J., C. L. Beadle and B. M. Potts. (2010). Genetic control in the survival, growth and form of *Acacia melanoxylon*. *New For*, 39, 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, C. G., M. A. López, A. Equihua, D. E. Lira y V. M. Cetina. (2015). Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandella* en respuesta al manejo nutrimental. *Bosque*, 36(2), 265-273.

Camacho-Linton, A., H. Ramírez-Maldonado, H. M. de los Santos-Posadas y F. J. Zamudio-Sánchez. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis*

L.) en el Estado de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 92-101.

Cambrón-Sandoval, V. H., H. Suzán-Azpiri, J. J. Vargas-Hernández, N. M. Sánchez-Vargas y C. Sáenz-Romero. (2013). Estrategias de crecimiento y distribución de biomasa en *Pinus pseudostrobus* bajo diferentes condiciones de competencia. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1). 71-79.

Campoe, O. C., C. Iannelli, J. L. Stape, R. L. Cook, J. C. T. Mendes and R. Vivian. (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, J. J., F. Alpízar, B. Louman and J. Parrotta. (2005). An integrated approach to forest ecosystem services. In G. Mery, R. Alfaro, M. Kanninen and M. Lobovikov (Eds). *Forest in the Global Balance—Changing Paradigms*. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) World Series. Vol 17, pp: 97–116. Vienna, Austria. Obtenido de <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/47887>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2017). Definición de plantación forestal comercial. Consultado 09-04-2018 en <https://www.gob.mx/conafor/documentos/plantaciones-forestales-comerciales-27940>

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). Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/3190/319028008018/>

Correndo, A. y F. García. (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. Obtenido de

[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)

Cossalter, C. and C. Pye-Smith. (2003). Fast-wood forestry: myths and realities. *Forest Perspectives*. Center for International Forestry Research (CIFOR). (Vol. 1). Bogor, Indonesia. Obtenido de <http://agritrop.cirad.fr/514676/1/ID514676.pdf>

de Groot, R. S., and P. J. van der Meer. (2010). Quantifying and valuing goods and services provided by plantation forests. In J. Bauhus, P. J. van der Meer and M. Kanninen (Eds). *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*. Washington DC, USA: Earthscan. pp. 16-42. Obtenido de 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

Diéguez-Aranda, U., A. R. Alboreca, F. Castedo, J. Á. González, M. Barrio-Anta, F. Crecente-Campo y M. A. Balboa-Murias. (2009). Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Forestry*, 82, 1-16.

Dodet, M., and C. Collet. (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 Tiot, B., C. W. Smith, K. M. Little, G. Boreham and R. N. 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. I., N. Bulfe, M. Pinazo, J. F. Goya, R. Martiarena, O. Knebel y C. Graciano. (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 Yvyrareta*, 18, 52-57.

Faustino, L., N. M. Bulfe, M. Pinazo, M y C. Graciano. (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*, 111.

Fernández, R. A., R. A. Martiarena, A. M. Lupi, A. Von Wallis y N. Pahr. (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. Uruguay de Ciencia del Suelo. ISTRO. Colonia, Uruguay.

Fisher, R. F. and D. Binkley. (2000). *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley and Sons. New York, USA.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2012). Terms and Definitions. Forest Resources Assessment. Working Paper 180. Rome, Italy. p. 31. Consultado 13-04-2018 en <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf>

Fraga, C. E., F. S. Rodríguez y R. Rodríguez-Soalleiro. (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., L. Lavoie and J. M. Binot. (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, K. M., P. Dharmawardhana, R. S. Arias, C. Ma, V. Busov and S. H. Strauss. (2011). Gibberellin-associated cisgenes modify growth, stature and wood properties in *Populus*. *Plant Biotechnol J*, 9, 162–178.

Jürgensen, C., W. Kollert and A. Lebedys. (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. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i3384e.pdf>

Kanninen, M. (2010). Plantation forests: global perspectives. In J. Bauhus, P. van der Meer, and M. Kanninen (Eds). *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*. Washington DC, USA: Earthscan. pp. 1-15. Obtenido de 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

Khouri, E. A., E. Canga-Líbano, J. A. Oliveira-Prendes, J. J. Gorgoso-Varela y M. A. Cámara-Obregón. (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., A. Tullus, A. Kanal, T. Tullus, A. Vares and H. Tullus. (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.

Martiarena, R. A., M. A. Pinazo, A. Von Wallis, O. Knebel y N. M. Pahr. (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., K. Nanto, M. Oishi, H. Ebinuma, Y. Morishita, N. Sakurai, H. Suzuki, D. Shibata, and T. Shimada. (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, 225–235.

Mora, F., R. Rubilar, V. I. Emhart y J. Saavedra. (2013). Predicción bayesiana de parámetros genéticos en clones de *Eucalyptus globulus* bajo condiciones de suplemento hídrico. *Ciência Florestal*, 23(2).

Morales-González, E., J. López-Upton, J. J. Vargas-Hernández, C. Ramírez-Herrera y A. Gil-Muñoz, A. (2013). Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnia mexicana*, 36(2), 155-162.

Muñoz, F., A. Neira y J. Cancino. (2010). Efecto del raleo en la densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden. *Interciencia*, 35(8).

Murillo, R., A. Alvarado y J. Mark Verjans. (2014). Concentración foliar de nutrimentos en plantaciones de teca en la cuenca del Canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 38(1).

Oliva, M., R. C. Silva y T. A. Espinoza. (2016). Efecto de las plantaciones de *Pinus patula* sobre las características fisicoquímicas de los suelos en áreas altoandinas de la región Amazonas. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 2(1), 28-36.

Paquette, A., and C. Messier. (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, Y. S., Y. Weng and S. D. Mansfield. (2012). Genetic effects on wood quality traits of plantation-grown white spruce (*Picea glauca*) and their relationships with growth. *Tree Genetics and Genomes*, 8(2), 303-311. doi: 10.1007/s11295-011-0441-z

Pavlotzky-Blank, B. y O. Murillo-Gamboa. (2012). Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en Los Chiles, Zona Norte de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 23(1).

Payn, T., J. M. Carnus, P. Freer-Smith, M. Kimberley, W. Kollert, S. Liu, C. Orazio, L. Rodriguez, L. N. Silva, and M. J. Wingfield. (2015). Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management*, 352, 57–67. doi: 10.1016/j.foreco.2015.06.021

Pérez-Cruzado, C., A. Blanco-Souto, C. A. López-Sánchez y C. Eimil-Fraga. (2013). Calidad de estación y productividad en plantaciones forestales de *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) en el noroeste de España. In 6° Congreso Forestal Español. España: Sociedad Española de Ciencias Forestales. p.13. Obtenido de http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/viewFile/14340/14183

Picard, N., L. Saint y M. Henry. (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. 213 p. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>

Pretzsch, H. (2009). Forest dynamics, growth, and yield. In *Forest Dynamics, Growth and Yield* (pp. 1-39). Springer, Berlín, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-88307-4

Raymond, C. A. (2011). Genotype by environment interactions for *Pinus radiata* in New South Wales, Australia. *Tree Genet Genomes*, 7, 819–833.

Richards, A. E., D. I. Forrester, J. Bauhus and M. Scherer-Lorenzen. (2010). The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. *Tree Physiology*, 30(9), 1192-1208.

Salas, C., T. G. Gregoire, D. J. Craven and H. Gilabert. (2016). Modelación del crecimiento de bosques: estado del arte. *Bosque*, 37(1), 03-12. doi: 10.4067/S0717-92002016000100001

Salcedo Pérez, E., Y. Pinedo, A. Luisa, R. González-Cruz, J. F. Zamora-Nátera, R. Rodríguez-Macías y R. Sánchez-Hernández. (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, G. E., M. G. Ducid, F. Julia-Gaspari y M. I. Delgado. (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*, 43(2), 133-144.

Tchichelle, S. V., D. Epron, F. Mialoundama, L. S. Koutika, J. M. Harmand, J. P. Bouillet and L. Mareschal. (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., L. Rytter, T. Tullus, M. Weih and H. Tullus. (2012). Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) in northern Europe. *Scand. J For. Res*, 27, 10–29.

Vargas, I. J. P., M. E. Camacho y O. M. Gamboa. (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *Acta Agronómica*, 61(2), 143-150.

Villalba, J., C. Montouto, J. Cazaban, P. Caraballo y O. Bentancur. (2010). Efecto del laboreo sobre la eficacia de herbicidas y el crecimiento de *Eucalyptus spp.* *Agrociencia*, 14(2), 45-54.

Watt, M. S., B. Zoric, M. O. Kimberley, and J. Harrington. (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. doi: 10.1139/x11-070

Watt, M. S., D. J. Palmer, M. O. Kimberley, B. K. Hock, T. W. Payn, D. J. Lowe. (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, P. (2014). *Growing Plantation Forests*. Lismore NSW, Australia: Springer. 332 p. doi: 10.1007/978-3-319-01827-0

World Wildlife Fund (WWF) and International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). (2012). Chapter 3: Forests & Climate. In G. Lyons and B. Jeffries (Eds). *Living Forests Report*. pp 1-34. Gland, Switzerland. Consultado 15-04-2018 en http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/living_forests_chapter_3_spanish.pdf

Yuancai, L., & Parresol, B. R. (2001). Remarks on height-diameter modeling (Vol. 10). US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. Asheville, NC. 5 p. Obtenido de https://books.google.com.mx/books?id=7KC9Q4G-rulC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

CAPÍTULO 2. ESTIMACIÓN DE CARBONO ACUMULADO CON ECUACIONES ALOMÉTRICAS EN *Gmelina arborea* Roxb. ESTABLECIDA EN TLATLAYA, ESTADO DE MÉXICO

Resumen

Las plantaciones forestales ofrecen la oportunidad de almacenar carbono. El objetivo fue estimar el carbono acumulado a partir de variables dasométricas y ecuaciones alométricas en una plantación de *Gmelina arborea* en Tlatlaya, Estado de México a diferentes edades. La plantación presenta una densidad de arbolado 1 040 árboles ha⁻¹ ubicada a 694 m con una pendiente de 40 %. Se realizó un análisis de varianza y se comparó con la prueba de medias Tukey ($p < 0.05$) con el programa estadístico Statistica para estimar el carbono acumulado. El incremento del dap fue de 0.75 cm y la altura de 0.54 m en el periodo de medición (seis meses), la biomasa se encuentra distribuida en los componentes fuste (72.54 %), ramas (18.37 %) y raíz (9.09 %) del arbolado. El carbono acumulado varía en los componentes del árbol y mostró diferencias estadísticas significativas en las edades evaluadas. A los tres años de edad el carbono acumulado en el fuste fue de 6.07 ton ha⁻¹, ramas 1.49 ton ha⁻¹, raíz 0.76 ton ha⁻¹ y el carbono total acumulado de 8.31 ton ha⁻¹. Los valores manejados de las variables predictoras en la ecuación ajustada para estimar el carbono acumulado en la plantación de *G. arborea* pueden variar por factores extrínsecos e intrínsecos (edad, condiciones edafoclimáticas, prácticas silvícolas y densidad de arbolado).

Palabras clave: Biomasa, Manejo forestal, Modelo matemático, Plantación forestal, Secuestro de carbono, Servicios ambientales.

Manuscrito sometido Revista Mexicana de Ciencias Forestales, sometido Junio de 2019, aceptado Agosto de 2019.

Abstract

Forest plantations offer the opportunity to store carbon. The objective was to estimate the carbon accumulated from dasometric variables and allometric equations in a *Gmelina arborea* plantation in Tlatlaya, State of Mexico at different ages. The plantation has a density of 1 040 trees ha⁻¹ located at 694 m with a slope of 40 %. An analysis of variance was performed and compared with the Tukey mean test ($p < 0.05$) with the Statistica statistical program to estimate the accumulated carbon. The increase of the diameter was 0.75 cm and the height of 0.54 m in the measurement period (six months), the biomass is distributed in the components shaft (72.54 %), branches (18.37 %) and root (9.09 %) of the tree. The accumulated carbon varied in the components of the tree and showed statistically significant differences in the ages evaluated. At three years of age the accumulated carbon in the stem was 6.07 ton ha⁻¹, branches 1.49 ton ha⁻¹, root 0.76 ton ha⁻¹ and total accumulated carbon of 8.31 ton ha⁻¹. The managed values of the predictor variables in the equation adjusted to estimate the accumulated carbon in the plantation of *G. arborea* can vary by extrinsic and intrinsic factors (age, edaphoclimatic conditions, silvicultural practices and density of trees).

Key words: Biomass, Carbon sequestration, Environmental services, Forest management, Forest plantation, Mathematical model.

Introducción

Una de las opciones para prevenir el cambio climático es la captura y almacenamiento de Carbono; es un método con un alto potencial para reducir los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera (Benea, 2017). El carbono es absorbido por la vegetación a través de la de fotosíntesis y el suelo de los ecosistemas por medio de la dinámica del carbono que consta de los aportes de material vegetal muerto, su pérdida por mineralización y su acumulación por humificación, siendo los suelos los que almacenan mayor cantidad (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2015).

La importancia del rol de la biomasa de las especies arbóreas en el almacenamiento de carbono ha sido reconocida desde hace tiempo (Bohre et al., 2013). Las plantaciones forestales ofrecen la oportunidad de almacenar carbono (Rasineni et al., 2011), por lo que plantar especies de rápido crecimiento para capturar dióxido de carbono atmosférico es una de las ideas de las plantaciones (Norby et al., 2005).

Existe un potencial de absorción de carbono en la biomasa, que podría almacenar el carbono durante decenios en productos de la madera. Además la utilización de la biomasa con fines energéticos, en base a los subproductos de desecho de la madera o de las cosechas, o de árboles/cultivos destinados expresamente a ese fin, podría originar una reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero si reemplazara a los combustibles de origen fósil (IPCC, 2015). México cuenta con una superficie establecida de plantaciones forestales comerciales de 270 mil hectáreas de las principales especies maderables establecidas entre ellas *Gmelina arborea* Roxb. con 24 061 ha⁻¹ (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2014).

A nivel internacional se han desarrollado diversos estudios tendientes a estimar el carbono almacenado en plantaciones de *G. arborea* con el uso de ecuaciones alométricas. En la India, Bohre et al. (2013) estimaron el carbono acumulado en plantaciones de *G. arborea*, emplearon como variables

predictoras el diámetro normal (1.30 m) y altura total. En Colombia, Melo (2015) con modelos basados en procesos (radiación fotosintéticamente activa, temperatura, disponibilidad de agua en el suelo, etc.) estimó el carbono almacenado en una plantación forestal de *G. arborea*. En Colombia, Forero et al. (2018) estimaron el carbono almacenado en función del diámetro normal (1.30 m) en una plantación de *G. arborea* de cinco años de edad. En México, Cámara et al. (2013) determinaron el carbono almacenado en plantaciones de *G. arborea* de cuatro años de edad establecidas en Tabasco. Si bien se han desarrollado investigaciones que evalúan el carbono acumulado de *G. arborea* para algunas regiones, aún falta evaluar el potencial de almacenamiento que representan las plantaciones establecidas en el Estado de México con ésta especie.

Objetivo

Estimar el carbono acumulado a partir de variables dasométricas y ecuaciones alométricas en una plantación de gmelina (*Gmelina arborea* Roxb.) a diferentes edades establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en la plantación forestal comercial de *G. arborea* ubicada en el predio “Las Piñas”, municipio de Tlatlaya, Estado de México (Figura 1). La región forma parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur y subprovincia Depresión del Balsas (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI], 2009). La delimitación geográfica de la PFC está comprendida entre las coordenadas geográficas de latitud N 18°22´ y longitud W 100°04´, a una altitud promedio de 694 m y presenta una pendiente de 40 %. Los árboles están plantados con un espaciamiento de 3.10 m x 3.10 m, que corresponde a una densidad de 1 040 árboles ha⁻¹ en una superficie de ocho hectáreas establecida en el año 2014. El suelo dominante es Phaeozem (37.34 %), Regosol (34.5 %), Leptosol (10.1 %), Luvisol (10.1 %), Cambisol (6.5 %), Vertisol (0.76 %) y Fluvisol (0.31 %) (INEGI, 2009). El clima es (Aw1) cálido

subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (70.88 %), (Aw2) cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (20.14 %), temperatura media anual de 18 °C a 28 °C y de precipitación anual 1 000 mm a 1500 mm (INEGI, 2009).

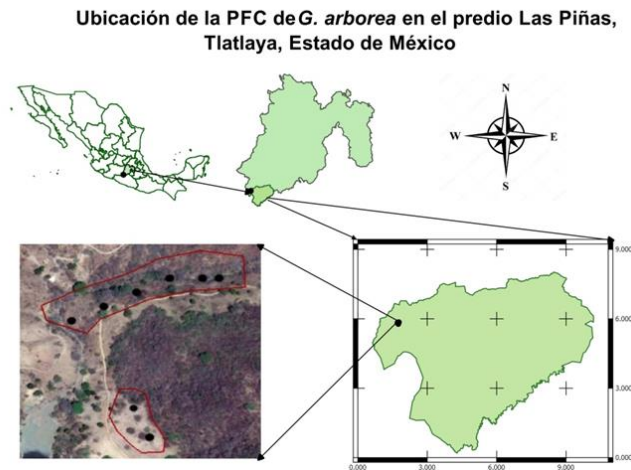


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el municipio de Tlatlaya, Estado de México.

Datos dasométricos

La toma de datos de campo se realizó en el año 2016 y 2017, a los 2.4, 2.6, 2.8 y 3.0 años de edad de la plantación. Se utilizó un muestreo sistemático, se establecieron ocho parcelas permanentes de muestreo circulares con un radio de 11.28 m (400 m^2) que en total forman un área inventariada de $3,200 \text{ m}^2$ que corresponden a una intensidad de muestreo del 4 %. En total se obtuvo un inventario de 207 árboles de la plantación, de los cuales se registraron datos de diámetro a la altura de 1.3 m ($d_{1.3}$) y altura total por medio de una Forcípula Haglof Sweden® y con el Hipsómetro Nikon Forestry Pro® respectivamente. Con las variables obtenidas en el inventario se generó información de área basal, volumen fustal con la ecuación de cubicación de Archila y González (2014) (Ecuación 1), biomasa de fuste, biomasa de ramas, biomasa de follaje, biomasa aérea total, carbono en fuste, carbono en ramas, carbono en follaje y carbono total del árbol, para estimar el carbono acumulado en la parte aérea de la plantación de las edades 2.4, 2.6, 2.8 y 3.0 años de edad.

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \cdot ff \quad (1)$$

Dónde:

V =Volumen m³

D =Diámetro en m

h =Altura en m

ff = Factor de forma (0.46)

Estimación de biomasa aérea (fuste y ramas) y carbono acumulado

Se cuantificó la biomasa con muestreo no destructivo en los componentes de cada árbol de gmelina que integran la plantación (fuste y ramas) (Ordoñez *et al.*, 2001; López-Reyes *et al.*, 2016). Para cuantificar la biomasa aérea en la plantación de *G. arborea* se emplearon las ecuaciones generadas por Arias *et al.* (2011) para plantaciones de la misma especie en Costa Rica (Ecuación 2 y 3):

$$B_{fuste} = 0.075 \cdot (d)^{2.4167} \quad (2)$$

$$B_{ramas} = 0.1001 \cdot (d)^{1.662} \quad (3)$$

Donde:

d = Diámetro normal (cm)

B_{fuste} = Biomasa de fuste (kg)

B_{ramas} = Biomasa de ramas (kg)

Relación biomasa radical/biomasa total (R/T)

MacDicken, (1997) recomienda utilizar un valor de 0.10, el cual fue empleado por Fonseca *et al.* (2009) para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en Costa Rica; se eligió utilizar el valor recomendado por MacDicken (1997) por ser un valor conservador.

Factor de conversión (FC)

Factor de conversión de tonelada de biomasa (materia seca) a tonelada de carbono (tC). Es el porcentaje de carbono en masa que tiene la madera;

carbono 50 %; oxígeno 41 %; hidrógeno 6 %; nitrógeno 1 % y cenizas 2 %, por lo que la cantidad de carbono por tonelada de biomasa (materia seca) se aproxima a 500 kg (50 %) (Norverto, 2006); Cubero y Rojas (1999), en plantaciones jóvenes de *G. arborea* (entre 4 y 15 años), reportan cifras entre 0.32 y 0.4; para el presente estudio se tomó el valor de 0.4.

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un análisis de varianza (Anova) y comparación de medias de Tukey (<0.05) con el programa estadístico Statistica para determinar la diferencia estadística en la plantación a diferentes edades.

Resultados

Con base en los inventarios forestales realizados en diciembre de 2016, febrero, abril y junio de 2017, la PFC se encuentra establecida en una superficie de 8 ha, se tiene que dicha plantación posee lo siguiente:

Variables dasométricas

El análisis de varianza mostró una alta diferencia significativa en las variables diámetro normal y altura total en las diferentes edades medidas de la plantación con una probabilidad ($p < 0.005$). La comparación de medias de Tukey muestra que el diámetro de la plantación en las diferentes edades es diferente estadísticamente (Tabla 1).

El incremento de diámetro normal en la plantación de la edad de 29 a 35 meses de edad fue de 0.75 cm el cual muestra diferencia estadística significativa (Tabla 1).

La altura total del arbolado mostró diferencias significativas en las diferentes edades de medición, presentó un incremento de 0.54 m (Tabla 1).

Con respecto al área basal, esta mostró diferencias significativas en las diferentes edades de medición en la PFC, manifestó un incremento de $1.03 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ de la edad de 2.4 a 3.0 años de edad de la plantación.

El volumen fustal del arbolado de la PFC de *G. arborea* en las diferentes edades de medición exhibió diferencias significativas ($p \leq 0.00$) con una probabilidad de ($p < 0.05$) en el análisis de varianza. En la prueba de comparación de medias de Tukey, se muestra diferencia estadística significativa en las diferentes edades de medición en la PFC, mostró un incremento de $4.55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Tabla 1. Comparación de medias, variables dasométricas de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Edad (años)	Diámetro normal (cm)	Altura (m)	Área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)	Volumen fustal ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)
2.4	7.89 a	5.68 a	5.43 a	15.09 a
2.6	8.12 b	5.80 b	5.74 b	16.31 b
2.8	8.33 c	5.92 c	6.04 c	17.54 c
3.0	8.64 d	6.22 d	6.46 d	19.63 d

*Letras diferentes en columna señalan diferencia significativa ($p < 0.05$).

Biomasa de fuste, ramas, raíz y total

La biomasa de fuste presentó diferencias significativas en las edades de medición, este componente representa 72.10 %, 72.41 %, 72.67 % y 73 % de la biomasa de las edades 2.4, 2.6, 2.8 y 3.0 años respectivamente, además se observa un incremento de 2.85 ton ha^{-1} (Tabla 2).

Con respecto a la biomasa de ramas esta presentó diferencias significativas en las distintas edades, este componente representa 18.81 %, 18.50 %, 18.24 % y 17.91 % de biomasa en las edades de 2.4, 2.6, 2.8 y 3.0 años correspondientemente (Tabla 2).

La biomasa de raíz presentó diferencias significativas, este componente representa el 9.09 % de la biomasa total del arbolado (Tabla 2).

En general los componentes de la biomasa total (fuste, ramas y raíz) muestran una distribución similar en las diferentes edades de medición del arbolado de *G. arborea* (Figura 2).

Tabla 2. Comparación de medias, biomasa de fuste, ramas, raíz y total de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Edad (años)	Biomasa fuste (ton ha ⁻¹)	Biomasa ramas (ton ha ⁻¹)	Biomasa aérea (ton ha ⁻¹)	Biomasa raíz (ton ha ⁻¹)	Biomasa total (ton ha ⁻¹)
2.4	12.32 a	3.21 a	15.53 a	1.55 a	17.09 a
2.6	13.19 b	3.37 b	16.56 b	1.66 b	18.21 a
2.8	14.00 c	3.51 c	17.51 c	1.75 c	19.27 c
3.0	15.17 d	3.72 d	18.89 d	1.89 d	20.78 d

*Letras diferentes en columna señalan diferencia significativa ($p < 0.05$).

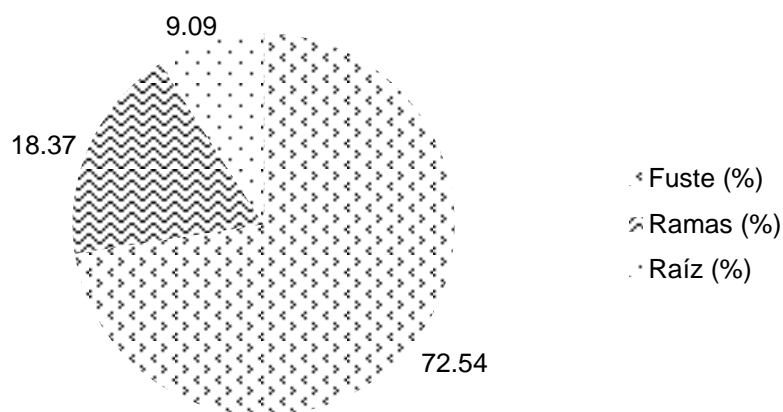


Figura 2. Distribución de los componentes de la biomasa total de árboles de *G. arborea* de la PFC establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Carbono de fuste, ramas, raíz y total

El resultado de la prueba de medias de Tukey para el carbono acumulado en los componentes del arbolado (fuste, ramas, aérea y total) en las cuatro edades

de medición presentó diferencias significativas a excepción del carbono acumulado en el componente raíz en las edades de 2.6 y 2.8 años no demostró diferencias significativas (Tabla 3), el componente fuste representa el 73.86 % de carbono acumulado presenta en las distintas edades, seguido del componente ramas con 18.71 % y el componente raíz que acumula carbono en menor proporción con 7.43 %, se observa que la acumulación de carbono en los componentes (fuste, ramas y raíz) presentan una distribución similar en las diferentes edades de medición del arbolado de *G. arborea* (Figura 3).

Tabla 3. Comparación de medias, carbono en fuste, ramas, raíz y total de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Edad (años)	Carbono fuste (ton ha ⁻¹) ¹⁾	Carbono ramas (ton ha ⁻¹) ¹⁾	Carbono aéreo (ton ha ⁻¹) ¹⁾	Carbono raíz (ton ha ⁻¹)	Carbono total (ton ha ⁻¹)
2.4	4.93 a	1.29 a	6.21 a	0.16 b	6.37 a
2.6	5.28 b	1.35 b	6.62 b	0.66 a	7.29 b
2.8	5.60 c	1.41 c	7.01 c	0.70 a	7.71 c
3.0	6.07 d	1.49 d	7.56 d	0.76 c	8.31 d

*Letras diferentes en columna señalan diferencia significativa (p < 0.05).

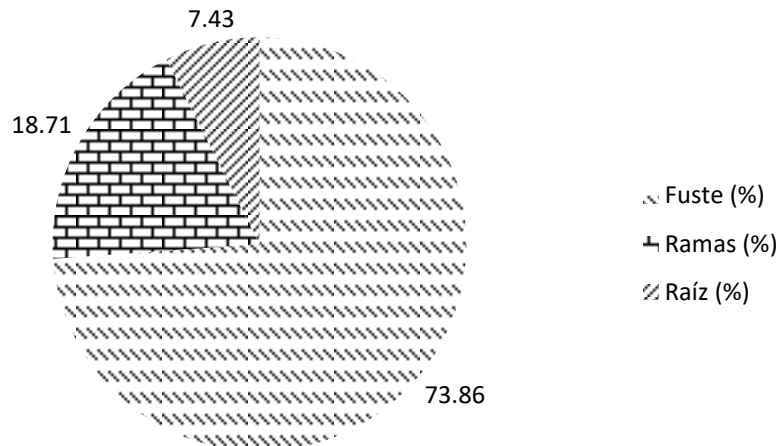


Figura 3. Distribución de los componentes de carbono total acumulado en árboles de *G. arborea* de la PFC establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Discusión

Con base en lo anterior se estimó que los árboles *Gmelina arborea* de la PFC presentaron un incremento en diámetro normal de 0.75 cm y un incremento en altura de 0.54 m, en un período de tiempo de seis meses, y mostró diferencias significativa; presenta una altura total de 6.22 m y un dap promedio de 8.64 cm a los 3.0 años de edad con una densidad de 1 040 árboles ha⁻¹; Cámara et al. (2013) reportan una altura total de 5.96 m y un dap promedio de 11.04 cm en una plantación de *G. arborea* de cuatro años de edad con una densidad de 906 árboles ha⁻¹ establecida a 20 m en Tabasco México, señalan que la altura total y el dap influyen en la cantidad de biomasa y de carbono acumulado en el arbolado, estos resultados son diferentes de los obtenidos en *G. arborea* la cual se encuentra establecida a 694 m; Jiménez (2016) recomienda realizar el primer aclareo en plantaciones de *G. arborea* bajo una intensidad de 50 al 25 % a los tres o cuatro años de edad e indica que el objetivo del aclareo es favorecer a los árboles más vigorosos, con buena forma, los cuales se dejarán para la cosecha final a la edad de 10 a 12 años con una densidad de 277 a 416 árboles ha⁻¹ respectivamente.

La biomasa del componente fuste fue de 72.54 %, ramas 18.37 % y raíz 9.09 % de forma general en la plantación en las diferentes edades evaluadas, estos resultados concuerdan con lo reportado por Emanuelli y Milla (2014) quienes indican que el componente fuste aporta entre 55-70 %, y el componente hojas entre 10-37 %, la distribución de biomasa por componentes en el arbolado de *G. arborea* coincide con López-Reyes et al (2016), estos autores obtuvieron un promedio de 70.20 % en el componente fuste y 29.83 % en el componente ramas y manifiestan que los resultados evidenciaron diferencias estadísticas significativas en plantaciones de *Hevea brasiliensis* Müell. Arg. de diferentes edades, establecidas en Tabasco, México.

El carbono acumulado en los componentes del arbolado de la plantación de *G. arborea* a los tres años de edad fue de 6.07 ton ha⁻¹ en el fuste, 1.49 ton ha⁻¹ en las ramas, 0.76 ton ha⁻¹ en las raíces y 8.31 ton ha⁻¹ de carbono total acumulado, este resultado es menor a lo reportado por Cámara et al. (2013) quienes determinaron que el carbono almacenado es de 15.54 ton ha⁻¹ en plantaciones de *G. arborea* de cuatro años de edad con una densidad de 906 árboles ha⁻¹ en Tabasco; así mismo difiere con lo reportado por Melo (2015) quien estimó con ecuaciones alométricas y modelos basados en procesos (radiación fotosintéticamente activa, temperatura, disponibilidad de agua en el suelo, etc.), que la plantación forestal de *G. arborea* con una densidad de arbolado de 1 100 árboles ha⁻¹ de seis años de edad establecida en Colombia a una altitud de 595 m almacena 24.39 ton ha⁻¹; Forero et al. (2018) estimaron la captura de carbono en la biomasa de *G. arborea* en una plantación establecida en Colombia a una altitud de 250 m con una densidad de 1 111 árboles ha⁻¹, emplearon como variable predictora el dap en el ajuste de ecuaciones alométricas y determinaron que a la edad de cinco años el carbono almacenado es de 41.6 ton ha⁻¹.

Se han realizado diversas investigaciones tendientes a estimar el carbono acumulado mediante el ajuste de ecuaciones alométricas para diferentes especies, de entre los que destacan lo realizado por Díaz et al. (2007) estos

autores ajustaron una ecuación de dos parámetros en la cual emplearon como variable predictora el diámetro normal para estimar carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham., concluyen que el carbono almacenado en los componentes del arbolado se encuentra distribuido en el fuste con 78.82 %, y en el componente ramas y follaje con 16.11 %, esta distribución de carbono almacenado en los componentes es similar a lo obtenido en la plantación de *G. arborea*, el fuste almacena el 73.86 % y el follaje el 18.71 %.

Cámara et al. (2013) emplearon ecuaciones para cuantificar el carbono almacenado en plantaciones establecidas en Tabasco de *Eucalyptus europhylla* S. T. Blake de cuatro años de edad con una densidad de 954 árboles ha⁻¹ y sabana de *Quercus oleoides* Schl. et Cham con una densidad de 258 árboles ha⁻¹, determinaron que el carbono almacenado es de 14.75 ton ha⁻¹ y 68.29 ton ha⁻¹ respectivamente, las condiciones edafoclimáticas del área de estudio de la plantación, son parte de factores que determinan la capacidad de almacenar carbono, *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México a una altitud de 694 m, con una pendiente de 40 %, y con una densidad de 1 040 árboles ha⁻¹ el suelo dominante es Phaeozem y la precipitación promedio de 1 000 mm; por su parte Douterlungne et al. (2013) determinaron que los mejores predictores son el dap y el diámetro de la base en el ajuste de ecuaciones para estimar biomasa y carbono en plantaciones con fines de restauración de *Guazuma ulmifolia* Lam., *Trichospermum mexicanum* (DC.) Baill., *Inga vera* Wild. y *Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lam) con densidades de 1 600 árboles ha⁻¹ establecidas en Chiapas, establecieron que las plantaciones de *T. mexicanum* y *G. ulmifolia* presentan más eficiencia como sumideros de carbono y concluyen que las tasas de acumulación no son extrapolables para cuantificar el carbono almacenado a largo plazo como lo indican Lugo et al. (2004) quienes mencionan que la tasa anual de acumulación de biomasa y carbono declina con la edad de la plantación al aumentar la competencia entre los árboles.

Por su parte Kongsager et al. (2013) estimaron el carbono almacenado en plantaciones de *Theobroma cacao* L. de 21 años de edad con una densidad de

1 097 árboles ha^{-1} , *Elaeis guineensis* Jacq de siete años de edad con una densidad de 144 árboles ha^{-1} , *H. brasiliensis* de 12 años de edad y *Citrus sinensis* L. de 25 años de edad con 266 árboles ha^{-1} establecidas en Ghana a una altitud de 114 m, utilizaron ecuaciones alométricas en la que el dap y el diámetro de la base fueron las variables predictoras y concluyen que la plantación de *H. brasiliensis* presenta el mayor potencial para almacenar carbono (214 ton ha^{-1}) seguido de *T. cacao* con 65 ton ha^{-1} de carbono, estos resultados son superiores a los obtenidos en *G. arborea* de tres años de edad establecida en Tlatlaya, Estado de México, representa un potencial para almacenar carbono con manejo y prácticas silvícolas adecuadas.

López-Reyes et al. (2016) determinaron el carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de *H. brasiliensis* establecidas en Tabasco de distintas edades con el ajuste de ecuaciones alométricas, determinaron que el carbono varía para cada edad, ante ello estimaron que en la plantación de cinco años de edad el carbono almacenado es de 26.28 ton ha^{-1} con una densidad de 491 árboles ha^{-1} , este resultado es diferente a lo obtenido para *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México la cual almacena 8.31 ton ha^{-1} a la edad de tres años.

Conclusiones

Se estimó que el carbono acumulado en la plantación de *G. arborea* a la edad de 3.0 años de edad es de 8.31 ton ha^{-1} , con una densidad de 1040 árboles ha^{-1} .

La distribución de biomasa y carbono acumulado en los componentes del arbolado de la plantación de *G. arborea* presentaron diferencia estadística significativa para las distintas edades de medición.

Los valores utilizados de las variables predictoras en la ecuación ajustada para estimar el carbono acumulado en la plantación de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México pueden variar por factores extrínsecos e intrínsecos (edad, condiciones edafoclimáticas, prácticas silvícolas y densidad de arbolado).

La acumulación de carbono en las plantaciones forestales conforma un servicio ambiental, es pertinente realizar muestreos directos para determinar el carbono almacenado, ante ello se debe tomar en consideración dos factores: tiempo y costo.

Bibliografía

Archila, L. G. R., and González, A. M. C. 2014. Carbon capture in three forest Species in Meta Department. Revista Científica Guarracuco, 18: 29. http://revistas.unimeta.edu.co/index.php/rc_es_guarracuco/article/view/67/277 (05 de marzo de 2019).

Arias, D., Calvo-Alvarado, J., Richter, B., and Dohrenbusch, A. 2011. Productivity, aboveground biomass, nutrient uptake and carbon content in fast-growing tree plantations of native and introduced species in the Southern Region of Costa Rica. Biomass and Bioenergy, 35(5): 1779-1788. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.009> (10 de febrero de 2019).

Benea, L. M. 2017. Capture and storage of Carbon dioxide: a method for countering climatic changes. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 163, No. 1, p. 012045). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/163/1/012045 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/163/1/012045/pdf> (20 de enero de 2019).

Bohre, P., Chaubey, O. P., and Singhal, P. K. 2013. Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in *Tectona grandis* Linn. f. and *Gmelina arborea* Roxb. International Journal of Bio-science and Bio-technology 5(3): 153-174. <https://www.earticle.net/Article/A207142> (05 de marzo de 2019).

Cámara, C. L. del C., C. Arias M., J. L. Martínez S. y O. Castillo A. 2013. Carbono almacenado en selva mediana de *Quercus oleoides* y plantaciones de *Eucalyptus urophylla* y *Gmelina arborea* en Huamanguillo, Tabasco. In: F. P. Pellat, W. G. Julio, B. Maira y V. Saynes (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013. Colegio de Posgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo, Instituto Tecnológico y de

Estudios Superiores de Monterrey. Texcoco, Estado de México. p. 702.
https://www.researchgate.net/profile/Xochitl_Cruz-Nunez2/publication/263043104_42_Incendios_forestales_carbono_negro_y_carbono_organico_en_Mexico_2000_-_2012/links/0f3175399dd7314471000000/42-Incendios-forestales-carbono-negro-y-carbono-organico-en-Mexico-2000-2012.pdf (10 de febrero de 2019).

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2014. Coordinación General de Producción y Productividad. Gerencia de desarrollo de plantaciones forestales comerciales. Principales especies maderables establecidas en PFC por entidad federativa en el periodo 2000-2014. México D. F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/43/6019Principales%20especies%20maderables%20establecidas%20en%20PFC%20por%20Entidad%20Federativa%20en%202000%20-%202014.pdf> (18 de enero de 2019).

Cubero, J. y Rojas, S. 1999 Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L. f.) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.
<http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:taRWtUkKV4QJ:cglobal.imn.ac.cr/Pdf/mitigacion/Estudio%2520sobre%2520Fijación%2520de%2520Crbono%2520en%2520%Plantaciones.pdf> (15 de enero de 2019).

Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., y Etchevers-Barra, J. D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. Madera y Bosques 13(1): 25-34.
<http://dx.doi.org/10.21829/myb.2007.1311233> (12 de febrero de 2019).

Douterlungne, D., Herrera-Gorocica, A. M., Ferguson, B. G., Siddique, I., y Soto-Pinto, L. 2013. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. Agrociencia 47(4): 385-397.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n4/v47n4a7.pdf> (12 de febrero de 2019).

Emanuelli, P., y Milla, F. 2014. Construcción de funciones de volumen. Volumen, Biomasa y Carbono Forestal 4: 56. http://www.reddccadgiz.org/monitoreoforestal/docs/mrv_2099067706.pdf (12 de febrero de 2019).

Fonseca, W., Alice, F., y Rey-Venayas, J. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. Bosque 30(1): 36-47. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006> (12 de febrero de 2019).

Forero, S. P., Santos, L. N. S., Andrade, H. J., y Madrigal, M. A. S. 2018. Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental 9: (2), 12. <https://doi.org/10.22490/21456453.2312> (12 de febrero de 2019).

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (IPCC). 2015. Cambio climático 2014 Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II Y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra Suiza: R. K. Pachauri y L. A. Meyers. <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sr1-sp.pdf> (15 de enero de 2019).

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (INEGI). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tlatlaya, Estado de México. Clave geoestadística 15105. In: Instituto Nacional de Geografía e Informática (p. 9). INEGI. http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15105.pdf (20 de enero de 2019).

Jiménez Pozo, L. P. 2016. El cultivo de la Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el trópico. 125 p Editorial Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sangolquí, Ecuador. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/11687> (12 de febrero de 2019).

Kongsager, R., Napier, J., & Mertz, O. 2013. The carbon sequestration potential of tree crop plantations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 18(8): 1197-1213. doi 10.1007/s11027-012-9417-z.

López, R. L. Y., M. Domínguez D., P. Martínez Z., J. Zavala C., A. Gómez G. y S. Posada. 2016. Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg) de diferentes edades. *Madera y Bosques* 22 (3): 49–60. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2016.2231456> (12 de febrero de 2019).

Lugo, A. E., Silver, W. L., & Colón, S. M. 2004. Biomass and nutrient dynamics of restored neotropical forests. In: *Biogeochemical Investigations of Terrestrial, Freshwater, and Wetland Ecosystems across the Globe*. pp. 731-746. Springer, Dordrecht. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-0952-2_50 (20 de febrero de 2019).

Mac Dicken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest carbon monitoring program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI). <http://www.winrock.org/REEP/PUBSS.html> (17 de enero de 2019).

Melo, C. A. O. 2015. Modelación del crecimiento, acumulación de biomasa y captura de carbono en árboles de *Gmelina arborea* Roxb., asociados a sistemas agroforestales y plantaciones homogéneas en Colombia. Tesis de Doctorado Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Medellín, Colombia. 166 pp. <http://www.bdigital.unal.edu.co/50068/> (25 de febrero de 2019).

Norby, R. J., DeLucia, E. H., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C. P., King, J. S., & De Angelis, P. 2005. Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102(50): 18052-18056. <https://doi.org/10.1073/pnas.0509478102> (25 de febrero de 2019).

Norverto, C. A. 2006. La fijación de CO₂ en plantaciones forestales y en

productos de madera en Argentina. 13 p. Editorial GRAM. Buenos Aires, Argentina.

Ordoñez, J. A., de Jong, B. H. J. y Masera, O. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7 (2), 27-47. <https://doi.org/10.21829/myb.2001.721310> (10 de febrero de 2019).

Rasineni, G. K., Guha, A., & Reddy, A. R. 2011. Responses of *Gmelina arborea*, a tropical deciduous tree species, to elevated atmospheric CO₂: Growth, biomass productivity and carbon sequestration efficacy. *Plant Science* 181(4): 428-438. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.07.005> (18 de enero de 2019).

CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE SITIO Y RENDIMIENTO DE *Gmelina arborea* ROXB. EN TLATLAYA, ESTADO DE MÉXICO

Resumen

El crecimiento y la productividad de una plantación son los mejores indicadores de la calidad de un sitio. El objetivo fue determinar un esquema de índice de sitio y generar tablas de producción para *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México. Se ajustaron los modelos de crecimiento de Schumacher, Cuadrático, Von Bertalanffy y Korsun para generar curvas anamórficas, con base en datos de edad-altura dominante colectados de mediciones y remediciones en parcelas de muestreo. Se empleó el método de la curva guía; se utilizó el paquete estadístico Statistica 6.0 mediante regresión no lineal. Con base en la bondad de ajuste, el cuadrado medio del error y la significancia de los parámetros, se eligió el modelo de Schumacher por mostrar tendencias deseables. Se establecieron tres curvas de índice de sitio con una edad base de 10 años, éstas se clasificaron en bajo (11 m), medio (13 m) y alto (15 m). Las tablas de producción se generaron para una densidad de 1040 árboles/ha. Se espera que a los 10 años el IMA ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$) en volumen esperado varíe de 11.04 m^3/ha , 15.70 m^3/ha y 20.32 m^3/ha en función del índice de sitio. La ecuación generada contribuye como una herramienta primordial en el manejo forestal de la zona de estudio.

Palabras clave: Modelos de Crecimiento, Plantación forestal comercial, Productividad, Silvicultura.

Abstract

The growth and productivity of a plantation are the best indicators of the quality of a site. The objective was to determine a site index scheme and generate production tables for *Gmelina arborea* established in Tlatlaya, State of Mexico. Schumacher, Cuadratic, Von Bertalanffy and Korsun growth models were adjusted to generate anamorphic curves, based on age-dominant height data collected from measurements and re-measurements in sample plots. The guide curve method was used; the statistical package Statistica 6.0 was used by means of nonlinear regression. Based on the goodness-of-fit, the mean square of the error and the significance of the parameters, the Schumacher model was chosen for showing desirable trends. Three site index curves were established with a base age of 10 years, these were classified as low (11 m), medium (13 m) and high (15 m). The production tables were generated for a density of 1040 trees/ha. It is expected that at 10 years the IMA ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{year}$) in expected volume will vary from 11.04 m^3/ha , 15.70 m^3/ha and 20.32 m^3/ha depending on the site index. The generated equation contributes as a primary tool in the forest management of the study area.

Key words: Commercial forest plantation, Forestry, Growth Models, Productivity.

Introducción

Las curvas de índice de sitio sirven para clasificar los terrenos en función de su capacidad productiva para una especie forestal (Jerez *et al.*, 2011). El análisis de crecimiento de una plantación a través del índice de sitio permite, modelar el crecimiento en función de la relación altura-edad. Este procedimiento que contribuye a darle valor agregado a los inventarios, permite identificar la respuesta del crecimiento de los árboles en relación con diferentes variables del sitio y con base en ello se pueden planificar y ejecutar programas de fertilización, manejo de plagas y enfermedades, y el monitoreo continuo del crecimiento de la plantación (Bedoya, 2014). A nivel internacional se han desarrollado diversos estudios referentes a construir esquemas de índice de sitio y productividad. En Colombia, Caguasango y Escobar (2012) determinaron la calidad del sitio con técnicas multivariadas que permiten destacar aquellos bioelementos que ejercen influencia sobre la productividad de plantaciones forestales de *Gmelina arborea*. Melo (2015) simuló el crecimiento y captura de CO₂ para *G. arborea* en sistemas agroforestales y plantaciones forestales establecidas en Colombia con el uso de la herramienta TARAM (Tool for Afforestation and Reforestation Approved Methodologies) y el modelo basado en procesos 3PG (Physiological Principles in Predicting Growth).

En México, Salazar *et al.* (2010) sobre diferentes plantaciones establecidas en Veracruz, de entre las que se encuentra *G. arborea* estimaron la calidad de sitio en etapa temprana de desarrollo, emplearon dos modelos; forma exponencial y de asociación exponencial, dado que en las primeras etapas de desarrollo de las especies forestales tropicales presentan un crecimiento exponencial vertical. Parra (2012) determinó el rendimiento maderable por tipo de suelo en plantaciones forestales comerciales de *G. arborea*, mediante el uso de herramientas estadísticas y de análisis de suelos establecidas en Campeche. Martínez *et al.* (2015) determinaron la capacidad productiva de los terrenos donde se han establecido plantaciones forestales comerciales de *G. arborea* en Tabasco, a través del método de índice de sitio estimado con la altura dominante a una edad base, mediante la comparación de modelos de

crecimiento. *G. arborea* es un árbol de hoja caduca, de rápido crecimiento, es razonablemente pesada por su densidad. Se utiliza en la construcción, muebles, instrumentos musicales, es una madera moderadamente resistente a la descomposición, y oscila entre muy resistente a moderadamente resistente a las termitas. Su madera es muy apreciada por los paneles de puertas y ventanas, carpintería y muebles por su ligereza, estabilidad y durabilidad (Ige *et al.*, 2013).

Objetivos

Determinar un esquema de índice de sitio y generar tablas de producción para *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Tlatlaya, Estado de México en una plantación forestal comercial de *Gmelina arborea*. La región forma parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur y subprovincia Depresión del Balsas (INEGI, 2009). Su delimitación geográfica está comprendida entre las coordenadas geográficas de latitud N 18°22' y longitud W 100°04', a una altitud promedio de 694 m y presenta una pendiente de 40 %. Los árboles están plantados con un espaciamiento de 3.10 m x 3.10 m, que corresponde a una densidad de 1040 árboles/ha. El suelo dominante es Phaeozem (37.34 %), Regosol (34.5 %), Leptosol (10.1 %), Luvisol (10.1 %), Cambisol (6.5 %), Vertisol (0.76 %) y Fluvisol (0.31 %) (INEGI, 2009). El clima es (Aw₁) cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (70.88 %), (Aw₂) cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (20.14 %), temperatura media anual de 18 °C a 28 °C y de precipitación anual 1000 mm a 1500 mm (INEGI, 2009).

Dentro del área de estudio se muestrearon 8 parcelas de *G. arborea* de las que se seleccionaron los individuos dominantes y codominantes de la población, con base en la metodología propuesta por Segura y Andrade (2008) quienes indican que los individuos seleccionados para medir deben ser “típicos” de la

especie y del sitio, describen que el término “típico” se refiere a que los individuos deben tener la forma y sanidad del fuste de la población muestreada, se colectaron datos de altura total (H) y edad (E) (Figura 1).

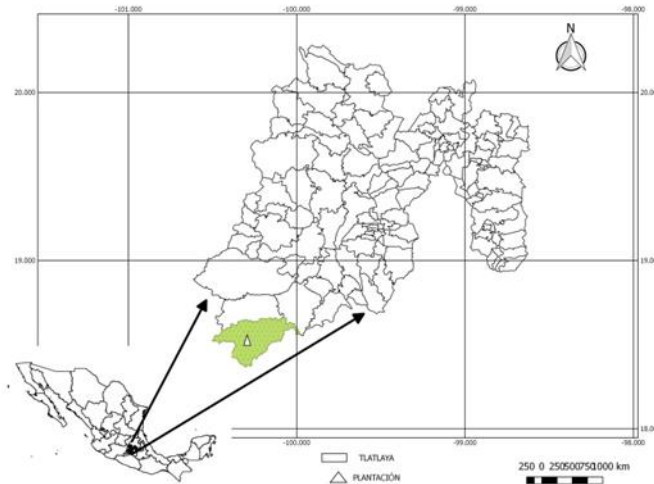


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el municipio de Tlatlaya, Estado de México.

Determinación de Índice de Sitio

El esquema de índice de sitio se hizo mediante el uso de la información relativa a datos de altura total (H) y edad (E) de 48 pares de datos de árboles dominantes y codominantes de la plantación de *G. arborea*. Los pares de datos (altura-edad) se graficaron, para determinar si representan todas las posibles calidades de sitio (Salazar *et al.*, 2010), condición que debe cumplirse para ajustar ecuaciones que no estén sesgadas al índice de sitio (Clutter *et al.*, 1992). Se tomaron únicamente los árboles más grandes de cada edad (Salazar *et al.*, 2010).

Para modelar la altura dominante en función de la edad, se probaron cuatro modelos para ajustar una ecuación guía, los cuales fueron seleccionados con base en estudios realizados con la especie en distintos sitios (Tabla 1). Los datos colectados se ordenaron cronológicamente por edad y se procesaron con el paquete estadístico Statistica 6.0 para ajustar los modelos de crecimiento para el cálculo de la altura dominante.

Con la finalidad de evaluar el ajuste del modelo a los datos, se tomó el valor del Cuadrado Medio del Error (CME), el valor del coeficiente de determinación ajustada ($R^2_{ajustada}$).

Tabla 1. Modelos utilizados para determinar el índice de sitio en la plantación de *Gmelina arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

Modelo	Expresión
Schumacher	$H_{dom} = B_0 \cdot e^{(-B_1 T^{-1})}$
Cuadrático	$H_{dom} = B_0 + (B_1 \cdot T) + (B_2 \cdot T^2)$
Von Bertalanffy	$H_{dom} = B_0 \cdot (1 - e^{(-B_1 \cdot T)})^3$
Korsun	$H_{dom} = e^{(B_0 + B_1 \cdot \log(T) + B_2 \cdot \log(T^2))}$

H_{dom} = Altura dominante (m). T = Edad de la plantación (años). e = Función exponencial. B_i = Parámetros de los modelos. Torres (2001); Camacho et al. (2013); Martínez et al. (2015).

Antes de generar la familia de curvas, la edad base se estableció en 10 años para *G. arborea*, esa edad es la indicada del turno de acuerdo con Martínez et al. (2015) la utilizan como base para esta especie.

Para generar la familia de curvas de crecimiento en altura, se utilizó la metodología de la curva guía (Jerez *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2012; Hernández *et al.*, 2014), el modelo de crecimiento se ajustó a la base de datos de edad-altura. Las curvas anamórficas de índice de sitio se construyen despejando los parámetros de escala o de forma de la ecuación generada, ya que estos definen el tipo al que corresponden (Hernández *et al.*, 2014).

Para obtener las curvas anamórficas, en la ecuación de índice de sitio se despejó el parámetro asintótico y su expresión se sustituyó en la ecuación original, con lo que el valor asintótico se consideró implícito y los parámetros de forma son comunes para todos los sitios. Se varió la edad y el índice de sitio deseado y se mantuvo constante la edad base, con lo cual se generó la familia de curvas anamórficas (Mares *et al.*, 2004; Barreto *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2014).

Modelación del Rendimiento de la Plantación

Con el objeto de generar las tablas de producción correspondientes, en un inicio se elaboró un esquema de índice de sitio para calificar la productividad de los terrenos en los que está establecida la plantación; se generaron ecuaciones de crecimiento en diámetro, altura y el volumen fustal se calculó por medio de la ecuación utilizada por Archila y González (2014) (Ecuación 1):

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \cdot ff \quad (1)$$

Dónde:

V =Volumen m³

D =Diámetro en m

h =Altura en m

ff = Factor de forma (0.46)

El esquema de índice de sitio se realizó mediante el modelo de Schumacher (Ecuación 2). La ecuación final de crecimiento de cada variable (V , H , G , B , y C) derivada de lo anterior, se presenta en el apartado de resultados.

$$H_{dom} = B_0 \cdot e^{(-B_1 T^{-1})} \quad (2)$$

Las ecuaciones se utilizaron para determinar el incremento medio anual (IMA) y el incremento corriente anual (ICA) para las variables analizadas (Ecuación 3).

$$IMA = V(IS, T)/T$$

$$ICA = V(IS, T) - V(IS, T - 1) \quad (3)$$

Dónde:

ICA = Incremento corriente anual (m³/ha/año)

IMA = Incremento medio anual (m³/ha/año)

$V(T)$ = Volumen predicho para un IS y una edad determinada

T = edad de la plantación (años)

Resultados

Determinación de Índice de Sitio

En la Figura 2 se muestran gráficamente los pares de datos de altura ordenados en función de la edad de 48 pares de datos de árboles dominantes y codominantes de *G. arborea* procedentes de la totalidad del área muestreada, de los cuales la altura máxima es de 9.30 m y la edad máxima registrada de 2.9 años. Los datos siguen una tendencia deseable y no se observan valores atípicos.

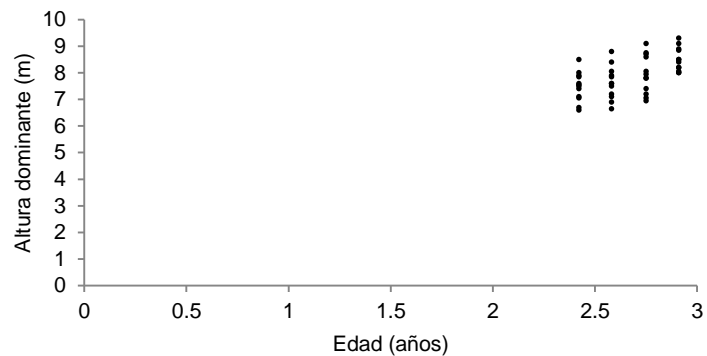


Figura 2. Representación de los valores de edad-altura de la plantación de *Gmelina arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

Los resultados del análisis de varianza de la regresión de los modelos ajustados, se ordenan en función de los estadísticos calculados y los parámetros estimados para los datos de edad-altura dominante de *G. arborea* en el Tabla 2.

Tabla 2. Resumen del análisis de varianza para las ecuaciones de crecimiento en altura dominante de *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Modelo	R ² _{adj}	CME	β _i	Valor estimado	Prob>T	Error estándar
Schumacher	0.54	1496.853	β ₀	15.74160	0.000000	2.474236
			β ₁	1.83555	0.000067	0.418654
Cuadrático	0.56	998.1110	β ₀	29.4535	0.200777	22.68507
			β ₁	-18.3401	0.288827	17.08640
			β ₂	3.8273	0.238599	3.20453
Von Bertalanffy	0.53	1496.814	β ₀	10.35376	0.000000	0.973492
			β ₁	0.92202	0.000000	0.125311
Korsun	0.54	2993.812	β ₀	1.382534	0.00	0.067292
			β ₁	-0.367353	0.00	0.000000
			β ₂	0.532260	0.00	0.000000

R²_{adj}= Coeficiente de determinación. CME= Cuadrado medio estimado. β= Parámetros estimados.

El coeficiente de determinación (R²ajustado) de los modelos ajustados para las variables edad-altura en *G. arborea* explican del 53 a 56 % la variabilidad de los datos (Tabla 2). El modelo cuadrático presento el valor más alto (R²ajustado= 0.56), sin embargo los valores de sus parámetros no son significativos; se puede observar que el modelo de Schumacher y el modelo de Korsun presentan el mismo valor de coeficiente de determinación (R²ajustado= 0.54) a diferencia del modelo de Korsun, Schumacher presenta una alta significancia en sus parámetros obtenidos y un menor valor de cuadrado medio del error.

En la Figura 3 se presenta el modelo de Schumacher y el modelo de Korsun ajustados a los datos de edad-altura para *G. arborea*, se observa que Schumacher mantiene una tendencia deseable, Korsun tiende a subestimar el crecimiento.

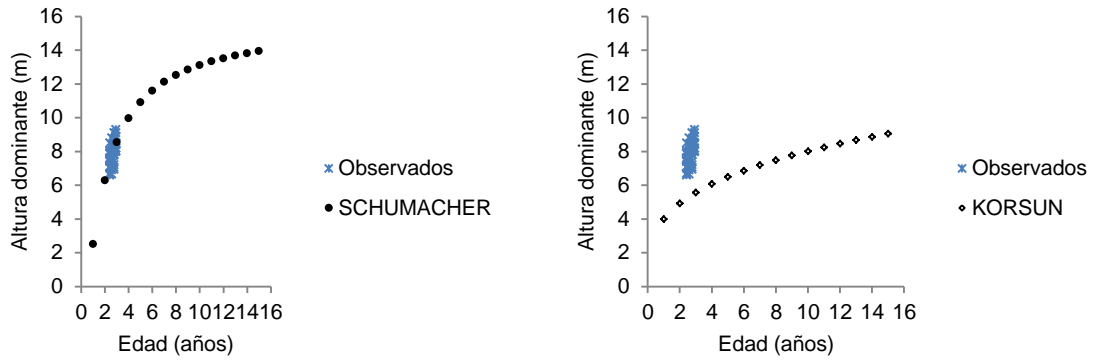


Figura 3. Modelo de Schumacher y Korsun ajustados para las variables edad-altura para *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Los estadísticos calculados se sustituyeron en el modelo de Schumacher, lo que dio lugar a la siguiente ecuación:

$$H_0 = 15.74160e^{-1.83555 \cdot E^{-1}}$$

A partir de la ecuación generada se determinó la altura dominante de los árboles de *G. arborea* en una plantación, en un intervalo de edades de uno a 15 años. Por ejemplo, para una edad de 10 años, este valor se sustituye en la ecuación y se obtiene una altura dominante de 13.10 m (Figura 4).

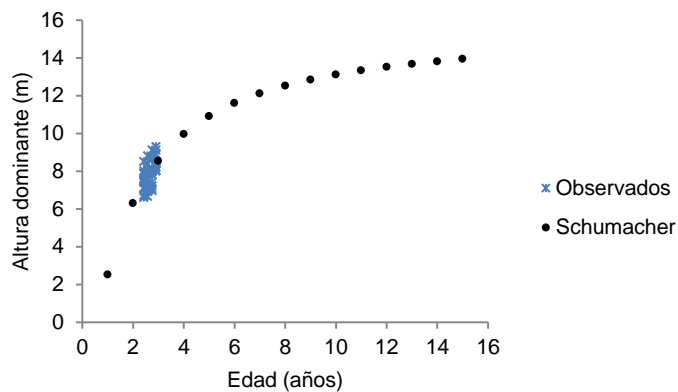


Figura 4. Crecimiento en altura dominante para *Gmelina arborea* en una plantación en Tlatlaya, Estado de México.

Un aspecto importante que se debe considerar antes de generar las familias de curvas es definir la edad base, la cual se estableció en 10 años para *G. arborea*, esa edad es la indicada del turno; así, por ejemplo, algunos autores como Martínez et al. (2015), la utilizan como base para esta especie.

Cuando la edad (E) se hace igual a la edad base ($E_0= 10$ años), entonces la altura dominante (H) será igual al índice de sitio (IS), tal como se muestra en la ecuación.

$$\hat{IS} = 15.74160e^{-1.83555 \cdot 10^{-1}}$$

Para la construcción de la familia de curvas anamórficas, se sustituyeron los valores en la ecuación en su forma respectiva, como se indica en la ecuación:

Forma anamórfica:

$$H = \hat{IS}e^{-1.83555(10E^{-1})}$$

Una vez definida la edad base y la tendencia de la altura dominante (Figura 4) con la ecuación anterior, se definieron tres clases de índice de sitio: bajo (<11 m), medio (13 m) y alto (>15 m). En la figura 5 se ilustra la familia de curvas de índice de sitio del tipo anamórfica, las cuales permiten clasificar la plantación de *G. arborea* de acuerdo a su potencial de productividad.

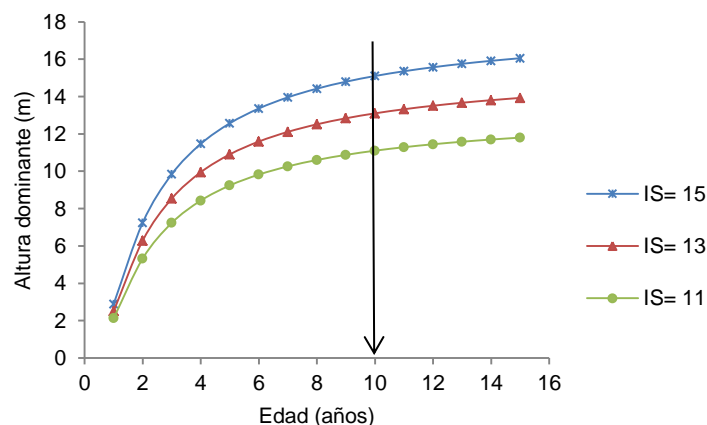


Figura 5. Familia de curvas anamórficas de Índice de Sitio para *Gmelina arborea* a una edad base de 10 años en Tlatlaya, Estado de México.

Modelación del Rendimiento de la Plantación

El ajuste del modelo de Schumacher de dos parámetros para las variables diámetro normal, altura total, volumen, área basal, biomasa y carbono se efectuó a través del paquete estadístico Statistica 6.0 los resultados se consignan en el Tabla 3.

Una vez realizados los ajustes y obtenidas las ecuaciones de crecimiento para DN (cm), Altura (m), V (m³), Área Basal (G), Biomasa (ton) y Carbono (ton) cada índice de sitio se determinó con la elaboración de las tablas de rendimiento, a partir de una densidad inicial de 1040 árboles/ha (distanciamiento de 3.10 X 3.10 m), para los índices de sitio 11, 13 y 15.

Tabla 3. Valores de estadísticos de bondad de ajuste del modelo de Schumacher de dos parámetros.

Variable	R ² _{adj}	CME	β_i	Valor estimado	Prob>T	Error estándar
Diámetro	0.62	6925.869	β_1	33.46881	0.000003	6.251102
			β_2	8.08521	0.000002	1.479757
Altura	0.54	1496.853	β_1	15.74160	0.000000	2.474236
			β_2	1.83555	0.000067	0.418654
Volumen	0.75	0.092150	β_1	1.06135	0.019420	0.438159
			β_2	25.55601	0.000000	3.374475
Área Basal	0.64	0.006524	β_1	0.09786	0.014649	0.038580
			β_2	16.92750	0.000003	3.174918
Biomasa	0.62	85353.75	β_1	495.1352	0.034851	227.7048
			β_2	19.6463	0.000003	3.7219
Carbono	0.64	0.008913	β_1	222.4397	0.034327	101.9859
			β_2	20.7001	0.000001	3.7173

R²_{adj}= Coeficiente de determinación. CME= Cuadrado medio estimado. β = Parámetros estimados.

Los valores de R²_{ajustada} en las ecuaciones reflejan una bondad de ajuste aceptable toda vez que los datos corresponden a diferentes niveles de productividad y, por lo tanto, poseen una variabilidad considerable.

Con estas funciones de crecimiento de diámetro normal, altura total, volumen fustal, área basal, biomasa, carbono (Ecuaciones 4, 5, 6, 7, 8 y 9

respectivamente) se crearon las tablas de rendimiento para los índices de sitio 11, 13 y 15.

$$\text{Altura} = 15.74160 \cdot e^{-1.83555 \cdot \text{Edad}^{-1}} \quad (4)$$

$$\text{Diámetro} = 33.46881 \cdot e^{-8.08521 \cdot \text{Edad}^{-1}} \quad (5)$$

$$\text{Volumen} = 1.06135 \cdot e^{-25.55601 \cdot \text{Edad}^{-1}} \quad (6)$$

$$\text{Área basal} = 0.09786 \cdot e^{-16.92750 \cdot \text{Edad}^{-1}} \quad (7)$$

$$\text{Biomasa} = 495.1352 \cdot e^{-19.6463 \cdot \text{Edad}^{-1}} \quad (8)$$

$$\text{Carbono} = 222.4397 \cdot e^{-20.7001 \cdot \text{Edad}^{-1}} \quad (9)$$

En las Tablas 4, 5 y 6 se presenta el rendimiento potencial para los índices de sitio 11, 13 y 15 m, respectivamente. En ellas se parte de un espaciamiento inicial de 3.10 x 3.10 m para una densidad de 1040 árboles/ha.

Tabla 4. Producción de *Gmelina* para ÍS 11 m, edad base 10 años y 1040 árboles/ha.

Edad (años)	AD (m)	DN (cm)	G (m ² /ha)	V/ha (m ³ /ha)	Biomasa (ton/ha)	C (t/ha)	IMAA (m/año)	IMAD (cm/año)	IMAG (m ² /ha/año)	IMAV (m ³ /ha/año)	IMABiom (ton/ha/año)	IMAC (ton/ha/año)
1	2.13	0.75	0.04	0.01	0.05	0.01	2.13	0.75	0.04	0.01	0.05	0.01
2	5.33	7.34	4.24	9.11	12.39	4.57	2.66	3.67	2.12	4.56	6.20	2.28
3	7.23	10.95	9.80	32.26	32.76	12.72	2.41	3.65	3.27	10.75	10.92	4.24
4	8.43	12.83	13.66	53.25	48.15	19.09	2.11	3.21	3.42	13.31	12.04	4.77
5	9.24	13.95	16.29	69.46	59.06	23.67	1.85	2.79	3.26	13.89	11.81	4.73
6	9.82	14.70	18.17	81.85	67.01	27.04	1.64	2.45	3.03	13.64	11.17	4.51
7	10.26	15.22	19.56	91.48	72.99	29.59	1.47	2.17	2.79	13.07	10.43	4.23
8	10.60	15.61	20.62	99.13	77.64	31.58	1.33	1.95	2.58	12.39	9.71	3.95
9	10.88	15.92	21.47	105.33	81.35	33.17	1.21	1.77	2.39	11.70	9.04	3.69
10	11.10	16.16	22.15	110.45	84.37	34.47	1.11	1.62	2.22	11.04	8.44	3.45
11	11.29	16.35	22.72	114.74	86.88	35.55	1.03	1.49	2.07	10.43	7.90	3.23
12	11.45	16.52	23.20	118.38	88.99	36.46	0.95	1.38	1.93	9.87	7.42	3.04

AD= Altura dominante (m); D= Diámetro normal (cm); V = Volumen fustal (m³); IMAA= Incremento Medio Anual en Altura (m/año⁻¹); IMAD= Incremento Medio Anual en Diámetro (m/año⁻¹); IMAV= Incremento Medio Anual en Volumen (m³ ha⁻¹/año⁻¹).

Tabla 5. Producción de *Gmelina* para ÍS 13 m, edad base 10 años y 1040 árboles/ha.

Edad (años)	AD (m)	DN (cm)	G (m ³ /ha)	V/ha (m ³ /ha)	Biomasa (ton/ha)	C (t/ha)	IMAA (m/año)	IMAD (cm/año)	IMAG (m ² /ha/año)	IMAV (m ³ /ha/año)	IMABiom (ton/ha/año)	IMAC (ton/ha/año)
1	2.51	1.34	0.12	0.04	0.20	0.06	2.51	1.34	0.12	0.04	0.20	0.06
2	6.29	9.25	6.89	18.95	21.76	8.27	3.14	4.63	3.45	9.48	10.88	4.13
3	8.54	12.98	14.01	55.32	49.58	19.69	2.85	4.33	4.67	18.44	16.53	6.56
4	9.95	14.85	18.57	84.58	68.72	27.77	2.49	3.71	4.64	21.14	17.18	6.94
5	10.90	15.95	21.55	105.95	81.71	33.33	2.18	3.19	4.31	21.19	16.34	6.67
6	11.59	16.66	23.63	121.76	90.93	37.30	1.93	2.78	3.94	20.29	15.16	6.22
7	12.11	17.17	25.16	133.80	97.77	40.26	1.73	2.45	3.59	19.11	13.97	5.75
8	12.51	17.54	26.32	143.22	103.02	42.54	1.56	2.19	3.29	17.90	12.88	5.32
9	12.84	17.83	27.23	150.77	107.17	44.35	1.43	1.98	3.03	16.75	11.91	4.93
10	13.10	18.06	27.96	156.95	110.53	45.82	1.31	1.81	2.80	15.70	11.05	4.58
11	13.32	18.24	28.57	162.10	113.31	47.03	1.21	1.66	2.60	14.74	10.30	4.28
12	13.51	18.40	29.07	166.45	115.64	48.05	1.13	1.53	2.42	13.87	9.64	4.00

AD= Altura dominante (m); D= Diámetro normal (cm); V = Volumen fustal (m³); IMAA= Incremento Medio Anual en Altura (m/año⁻¹); IMAD= Incremento Medio Anual en Diámetro (m/año⁻¹); IMAV= Incremento Medio Anual en Volumen (m³/ha⁻¹/año⁻¹).

Tabla 6. Producción de *Gmelina* para ÍS 15 m, edad base 10 años y 1040 árboles/ha.

Edad (años)	AD (m)	DN (cm)	G (m ³ /ha)	V/ha (m ³ /ha)	Biomasa (ton/ha)	C (t/ha)	IMAA (m/año)	IMAD (cm/año)	IMAG (m ² /ha/año)	IMAV (m ³ /ha/año)	IMABiom (ton/ha/año)	IMAC (ton/ha/año)
1	2.89	2.05	0.29	0.16	0.56	0.17	2.89	2.05	0.29	0.16	0.56	0.17
2	7.25	10.97	9.85	32.46	32.91	12.79	3.62	5.48	4.92	16.23	16.46	6.39
3	9.84	14.72	18.22	82.23	67.25	27.14	3.28	4.91	6.07	27.41	22.42	9.05
4	11.47	16.54	23.26	118.85	89.26	36.58	2.87	4.13	5.81	29.71	22.32	9.14
5	12.57	17.59	26.47	144.51	103.73	42.85	2.51	3.52	5.29	28.90	20.75	8.57
6	13.36	18.28	28.67	163.04	113.81	47.25	2.23	3.05	4.78	27.17	18.97	7.88
7	13.96	18.75	30.27	176.93	121.20	50.49	1.99	2.68	4.32	25.28	17.31	7.21
8	14.42	19.11	31.48	187.69	126.83	52.96	1.80	2.39	3.93	23.46	15.85	6.62
9	14.80	19.38	32.42	196.25	131.25	54.91	1.64	2.15	3.60	21.81	14.58	6.10
10	15.10	19.59	33.18	203.22	134.82	56.48	1.51	1.96	3.32	20.32	13.48	5.65
11	15.36	19.77	33.80	208.99	137.75	57.78	1.40	1.80	3.07	19.00	12.52	5.25
12	15.57	19.91	34.32	213.85	140.20	58.87	1.30	1.66	2.86	17.82	11.68	4.91

AD= Altura dominante (m); D= Diámetro normal (cm); V = Volumen fustal (m³); IMAA= Incremento Medio Anual en Altura (m/año⁻¹); IMAD= Incremento Medio Anual en Diámetro (m/año⁻¹); IMAV= Incremento Medio Anual en Volumen (m³/ha⁻¹/año⁻¹).

En la Figura 6 se observa que el máximo crecimiento corriente anual es elevado y se alcanzó más rápidamente que el crecimiento medio anual en las variables analizadas.

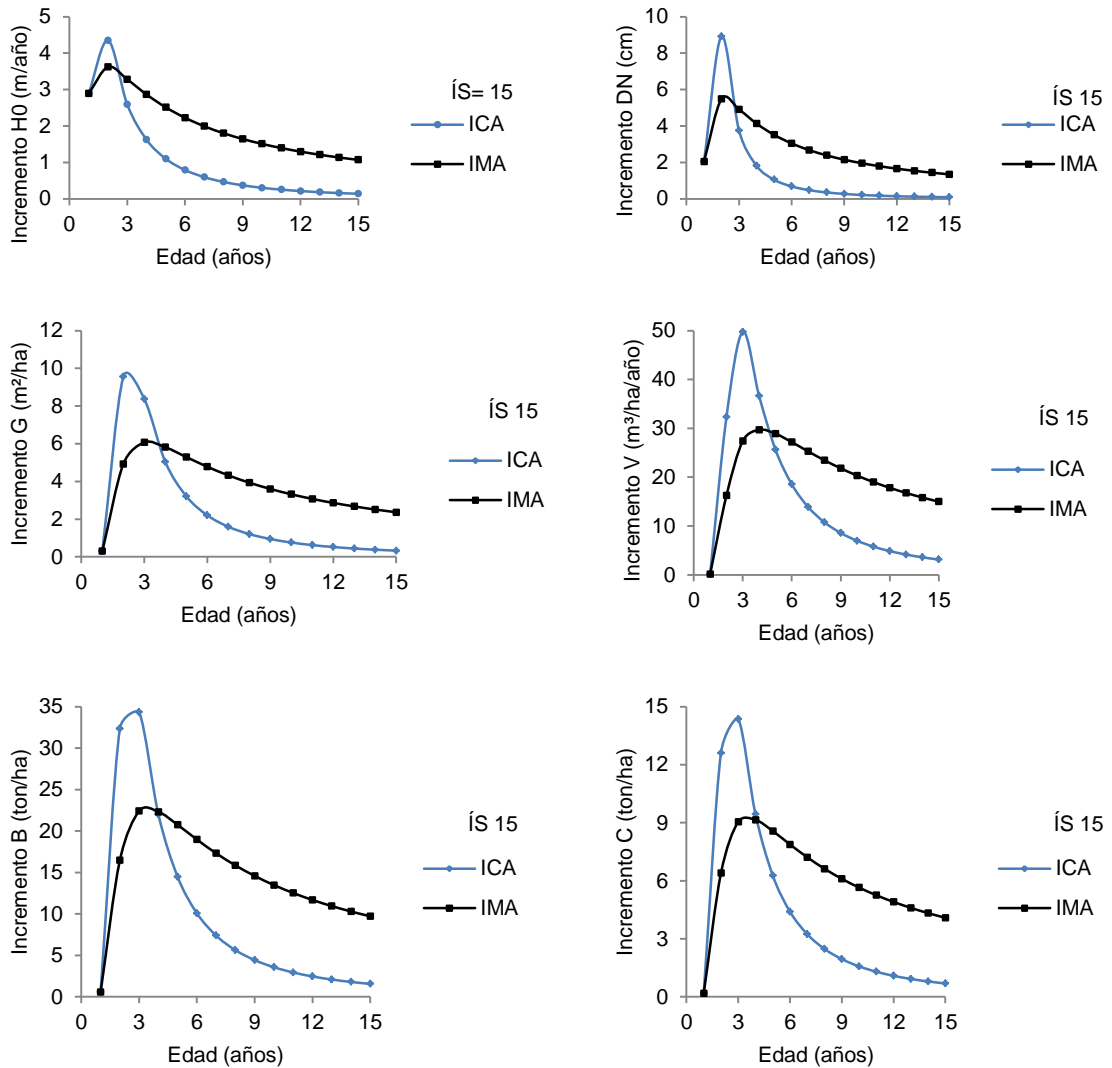


Figura 6. Curvas de ICA e IMA de altura (H0), diámetro normal (DN), área basal (G), volumen (V), biomasa (B) y carbono (C) en la plantación de *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Discusión

Índice de Sitio

Este sistema de ecuaciones expresa la calidad de sitio en los valores absolutos de altura dominante permite la comparación con otras plantaciones forestales para la misma especie en otras regiones. La tendencia de crecimiento de las

curvas generadas para *G. arborea* es similar a lo consignado por Martínez et al. (2015); Salazar et al. (2012) y Parra (2012).

Los resultados de la capacidad productiva del área donde se encuentra establecida la plantación de *G. arborea* en estudio son inferiores a lo reportado por Martínez et al. (2015) quienes determinaron cinco curvas de índices de sitio con edad base de 10 años en Tabasco, las cuales se clasificaron en mala (14.5 m), regular (19.5 m), buena (24.5 m), muy buena (29.5 m) y excelente (34.5 m).

En plantaciones de *G. arborea* establecidas en Veracruz, Salazar et al. (2102) ajustaron el modelo exponencial empleando una edad base de 4.33 años, determinaron que en sitios de primera se espera que los árboles dominantes alcancen alturas de 15.1 a 20 m o más a los 4 años; los sitios de segunda podrían tener de 10.1 a 15 m; los de tercera entre 5.1 y 10 m; y los de cuarta 5 m como máximo; con respecto a lo anterior *G. arborea* establecida en el Estado de México, a los 4 años puede alcanzar altura de 9.94 m, expuesto lo anterior se debe tomar en cuenta que el comportamiento del crecimiento en altura dominante durante los primeros años de establecimiento de una masa forestales puede ser errático como lo indican Diéguez-Aranda et al. (2009) que la evaluación de la calidad de estación en rodales demasiado jóvenes a partir de datos de crecimiento en altura dominante puede no resultar el método más conveniente para estimar la capacidad productiva de la estación forestal.

Esto permite diferenciar la calidad de sitio e identificar la productividad maderable de los sitios como lo señalan McKenney y Pedlar (2003) al tomar en cuenta que la calidad de estación puede variar por la capacidad de los suelos donde se desarrolle la especie (Delgado *et al.*, 2009).

Se han realizado diversos estudios para determinar el índice de sitio sobre plantaciones de diferentes especies, en la que se ha ajustado el modelo de Schumacher, ejemplo de lo antes mencionado Bedoya (2014) modeló la calidad de sitio en plantaciones jóvenes (4 años) de *Tectona grandis* establecidas en Colombia, con este modelo determinó cuatro clases de sitio, el cual explica

arriba del 66 % de la variabilidad de los datos; Jerez et al. (2011) ajustaron el modelo de Schumacher sobre plantaciones de *T. grandis* establecidas en Venezuela. Hernández et al. (2014) emplearon el modelo de Schumacher para estimar el crecimiento y rendimiento en plantaciones de *Pinus greggii* establecidas en Hidalgo.

Rendimiento de la plantación

Parra (2012) ajustó el modelo de crecimiento de Schumacher para plantaciones de *G. arborea* establecidas en Campeche, utilizó una edad de referencia de 7 años, con base en lo anterior se espera una altura promedio de 15.47 m para el tipo de suelo Kancab y para el tipo de suelo Akalché 11.63 m; *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México, con una edad base de 10 años se espera que alcance alturas de 13.10 m; este resultado es menor a lo reportado por Martínez et al. (2015) mencionan que en sitios de calidad baja a la edad de 10 años la altura sea de 14.5 m.

Con respecto al diámetro normal promedio por árbol, Parra (2012) señala que las plantaciones de *G. arborea* establecidas en Tabasco en diferentes tipos de suelos a la edad de 7 años se esperan 22.23 cm y 17.77 cm; *G. arborea* establecida en el Estado de México a la edad base de 10 años se espera que tenga un diámetro de 18.06 cm en promedio por árbol (IS 13); este resultado es mayor a lo reportado por Martínez et al. (2015) para un índice de sitio de baja calidad, pues esperan que diámetro promedio sea de 17.4 cm

Con referencia al volumen esperado promedio por árbol Parra (2012) señala que es de 0.218 m³ y 0.123 m³ para suelos de Kancab y Akalché respectivamente para *G. arborea* establecida en Campeche; *G. arborea* establecida en el estado de México para la edad de 10 años se espera que los árboles presenten un volumen promedio de 0.195 y 0.106 m³.

Martínez et al. (2015) señalan que el máximo rendimiento medio anual de volumen de madera en las plantaciones de *G. arborea* establecidas en Tabasco se alcanza a los 6 años, en sitios de calidad alta (IS= 24.5), edad en que el incremento medio anual (IMA) iguala al incremento corriente anual (ICA) e

indican que este sería el turno óptimo para producción de celulosa porque los árboles a esa edad no tendrían dimensiones suficientes para madera de aserrío; mientras que *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México en sitios de alta calidad (IS=15) alcanzaría el máximo rendimiento medio anual de volumen a los cinco años de edad.

En países como Costa Rica, Malasia e Islas Salomón (en orden de importancia) el incremento medio anual en volumen de *G. arborea* es de entre 12-35 (m³/ha/año), con rotaciones de 12-20 años de acuerdo con Kanninen (2010). En Colombia plantaciones de *G. arborea* poseen incrementos medios anuales de 13.3 m³/ha/año (Caguasango y Escobar, 2012).

Con respecto a la tendencia de evolución del ICA e IMA de *G. arborea*, es similar a lo señalado por Hernández et al. (2016) para plantaciones de *Pinus greggii*, indican que el crecimiento corriente anual se alcanzó más rápidamente que el crecimiento medio anual en todas las variables analizadas.

Camacho et al. (2013) realizaron un estudio sobre rendimiento para *Tectona grandis* establecida en Campeche, consideran una densidad de 1 111 árboles por ha, una edad base de 23 años y señalan que en dichas tablas no fueron considerados los aclareos, la densidad de la plantación de *G. arborea* es de 1 040 árboles/ha se estableció una edad base de 10 años, sobre la cual sólo se han realizado podas.

Estos crecimientos variados se pueden atribuir a la selección de material genético como lo indica Balarezo (2016) en dos plantaciones de *G. arborea* de distintas procedencias; falta de manejo y tratamientos silviculturales, disponibilidad de agua en el suelo como lo señala Melo (2015).

Conclusiones

El modelo de Schumacher mostró un ajuste aceptable a la base de datos muestrales de edad-altura dominante, se considera útil para predecir el crecimiento en altura dominante de *G. arborea* en la zona de estudio.

El modelo de Schumacher puede ser utilizado para construir esquemas de índice de sitio en la región; las ecuaciones generadas habrán de ser empleadas dentro del intervalo de las variables dimensionales y las edades consideradas en el estudio.

Con las ecuaciones generadas, la clasificación de la capacidad productiva de la superficie forestal de *G. arborea* en el Estado de México, contribuirá como herramienta básica y primordial en la planeación del manejo forestal en esta región.

Las plantaciones proporcionan una multitud de bienes y servicios valiosos. La captura de carbono es uno de estos servicios.

Bibliografía

Archila, L. G. R., & González, A. M. C. (2014). Carbon capture in three forest Species in Meta Department. *Revista Científica Guarracuco*, (18).

Balarezo, Z. W. H. (2016). Potencial de crecimiento de la especie *Gmelina arborea* Roxb (melina) en el Sector El Cóndor Cantón Valencia. Periodo 2013-2015. Tesis de Maestría. Quevedo: UTEQ. Ecuador.

Barreto, M. H., M. Frederic, G. Nepveu y D. Álvarez-Lazo C. (2011). Curvas anamórficas de índice de sitio para Plantaciones de *Pinus caribea* Morelet var. *caribea* Barret y Golfari de la empresa forestal integral MACURIJE (IFI) en la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista Chapingo: Serie de Ciencias Forestales*, 17(2), 245-252.

Bedoya, V. N. D. S. (2014). Modelación Calidad de sitio en plantación juvenil de teca. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Medellín, Colombia.

Caguasango, S., Cadena, M., & Escobar, J. (2012). Modelación de la calidad de sitio–suelo sitio específico en *Gmelina arborea* Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Camacho-Linton, A., Ramírez-Maldonado, H., de los Santos-Posadas, H. M., & Zamudio Sánchez, F. J. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el Estado de Campeche. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(19), 92-101.

Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister, and R. L. Bailey. (1992). *Timber Management: A quantitative approach*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Delgado-Caballero, C. E., A. Gómez-Guerrero, J. A. García-Salazar, J. R. Valdez-Lazalde, H. M. De los Santos P., A. M. Fierros-González y W. R. Horwath. (2009). Índice de sitio y propiedades del suelo en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus urophylla* en el sureste de México. *Agrociencia*. 43 (1), 61-72.

Diéguez-Aranda, U., Alboreca, A. R., Castedo-Dorado, F., González, J. Á., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., & Balboa-Murias, M. A. (2009). Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Forestry*, 82, 1-16.

Hernández-Ramos, J., García-Magaña, J. J., Olvera-Delgadillo, E. H., Velarde-Ramírez, J. C., García-Cuevas, X., & Muñoz-Flores, H. J. (2014). Índice de sitio para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm: En Metztlán, Hidalgo, México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(2), 167-176.

Ige, P. O., Akinyemi, G. O., & Smith, A. S. (2013). Nonlinear growth functions for modeling tree height–diameter relationships for *Gmelina arborea* (Roxb.) in south-west Nigeria. *Forest Science and Technology*, 9(1), 20-24.

INEGI. Marco Geoestadístico Municipal (2009) versión 3.1. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tlatlaya, México.

Jerez-Rico, M., Moret-Barillas, A. Y., Carrero-Gámez, O. E., Macchiavelli, R. E., & Quevedo-Rojas, A. M. (2011). Curvas de índice de sitio basadas en modelos

mixtos para plantaciones de teca (*Tectona grandis* LF) en Los Llanos de Venezuela. *Agrociencia*, 45(1), 135-145.

Kanninen, M. (2010). Plantation forests: global perspectives. In *Ecosystem goods and services from plantation forests* (pp. 17-31). Routledge.

Kanninen, M., Montero M. (2007). Biomasa y Carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica. Seminario–Taller Internacional: “Herramientas para la Evaluación de Biomasa y el Monitoreo del Secuestro de Carbono en Proyectos Forestales.

Mares, A. O., E. H. Cornejo O., S. Valencia M. y C. Flores L. (2004). Índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en Cd. Hidalgo, Michoacán. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27 (1), 77-80.

Martínez-Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L. M., de-la-Cruz-Arias, V., & Álvarez-Martínez, J. (2015). Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 415-425.

McKenney, D. W., and J. H. Pedlar. (2003). Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *Forest Ecology Management*, 175, 497-507.

Melo, C. O. A. (2015). Modelación del crecimiento, acumulación de biomasa y captura de carbono en árboles de *Gmelina arborea* Roxb, asociados a sistemas agroforestales y plantaciones homogéneas en Colombia. Medellín, Colombia. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín, Colombia.

Parra-Piedra, J. P. 2012. Crecimiento de Teca (*Tectona grandis* King. L.) y melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el predio Dzidzila, Campeche, México. Tesis de Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.

Pellat, F. P., González, J. W., Bazan, M., & Saynes, V. (2014). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013.

Pérez-González, G., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., & Etchevers-Barra, J. D. (2012). Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 7-24.

Salazar García, J. G., Santiago Trinidad, O., Sánchez Monsalvo, V., Monroy Rivera, C., & Couttolenc Brenis, E. (2012). Modelo para determinar calidad de sitio a edades tempranas de cuatro especies tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(11), 71-80.

Segura, M., & Andrade, H. J. (2008). Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? How to develop biomass models of woody perennials species. *Agroforestería en las Américas*, 46, 89-96.

Torres-Rojo, J. M. (2001). Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal. *Agrociencia*, 35(1).

CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS EDÁFICAS Y TOPOGRÁFICAS ASOCIADAS CON EL CRECIMIENTO EN VOLUMEN DE *Gmelina arborea* ROXB. EN TLATLAYA, ESTADO DE MÉXICO

Resumen

Gmelina arborea es de rápido crecimiento y fácil adaptación a diversidad de condiciones de sitio; el objetivo del estudio es analizar las características edáficas (físicas y químicas), y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen *G. arborea* establecida en el Estado de México y desarrollar un modelo para estimar el volumen fustal. Se desarrolló sobre 8 parcelas permanentes de muestreo con dimensiones de 400 m², se extrajeron 5 sub-muestras de cada parcela, se formó una muestra final de 500 gramos, las características edáficas se analizaron con base en la NOM-021-RECNAT-2000, y datos topográficos. Se realizó un análisis de varianzas y prueba de medias, se efectuó análisis de componentes principales y consecutivamente un análisis de regresión lineal múltiple, con el coeficiente de correlación de Pearson se compararon las correlaciones existentes entre las variables elegidas con el paquete estadístico R®. A excepción de la conductividad hidráulica, los nitratos de nitrógeno (N-NO₃) y la relación Ca/Mg, las características edáficas y topográficas analizadas mostraron diferencias significativas, el volumen fustal muestra diferencias significativas entre parcelas. El modelo resultante toma como variables predictoras la conductividad hidráulica, nitratos de nitrógeno y la relación Ca/Mg, y explica el 71.6 % de la variabilidad observada en el volumen fustal ($R^2_{adj} = 0.716$). La variación de las características edáficas (físicas y químicas) y topográficas influyen en el crecimiento en volumen, es indispensable conocer la autoecología de la especie la cual está asociada a las condiciones climáticas, edafológicas y la distribución altitudinal.

Palabras clave: Ecuación alométrica, *Gmelina arborea*, Nutrientes, Plantación Forestal, Productividad, Suelos.

Manuscrito sometido a Madera y Bosques, Junio de 2019.

Abstract

Gmelina arborea is of fast growth and easy adaptation to diversity of site conditions; the objective of the study is to analyze the soil (physical and chemical) and topographic characteristics associated with the growth in volume of *G. arborea* established in the State of Mexico and to develop a model to estimate the stem volume. It was developed on 8 permanent sampling plots with dimensions of 400 m², 5 sub-samples were extracted from each plot, a final sample of 500 grams was formed, soil characteristics were analyzed based on NOM-021-RECNAT-2000, and topographic data. An analysis of variance and mean test was carried out, analysis of main components was carried out and consecutively a multiple linear regression analysis was carried out, with Pearson's correlation coefficient the existing correlations between the chosen variables were compared with the statistical package R®. With the exception of hydraulic conductivity, nitrogen nitrates (N-NO₃) and the Ca/Mg ratio, the soil and topographic characteristics analyzed showed significant differences, the stem volume shows significant differences between plots. The resulting model takes hydraulic conductivity, nitrogen nitrates and the Ca/Mg ratio as predictive variables, and explains 71.6 % of the variability observed in the stem volume ($R^2_{adj} = 0.716$). The variation of soil characteristics (physical and chemical) and topography influence the growth in volume, it is essential to know the autoecology of the species which is associated with climatic conditions, soil and altitudinal distribution.

Key words: Allometric equation, Forest Plantation, *Gmelina arborea*, Nutrients, Productivity, Soils.

Introducción

Gmelina arborea es de rápido crecimiento y de fácil adaptación a una diversidad de condiciones de sitio, es usada comúnmente en plantaciones por su valor comercial y su gran variedad de usos que se le da a la madera (Rojas *et al.*, 2004, Indira 2006, Moya *et al.*, 2010) además de ofrecer a los productores e inversionistas un rápido retorno de su capital invertido (Wee *et al.*, 2012) por ser de fácil trabajabilidad (González y Serrano, 2004) y buen acabado; además de poder ser utilizada en una amplia variedad de productos como muebles de alta calidad (Rejón y Romero, 2004) así como para construcción, tableros contrachapados, lápices, etc. Además, posee un alto potencial para la elaboración de otros productos como tableros de fibras, tableros de partículas y pulpa para papel. (González y Serrano 2004). México cuenta con una superficie establecida de plantaciones forestales comerciales de 270 mil hectáreas de las principales especies maderables establecidas entre ellas *Gmelina arborea* con 24, 061 hectáreas (CONAFOR, 2014).

Escobar (2013) menciona que es evidente la necesidad de generar información de *Gmelina arborea*, para optimizar la productividad de las plantaciones, el contenido de nutrientes determinados mediante el análisis de suelos (parámetros físicos y químicos), es de suma importancia, para valorar la disponibilidad de elementos esenciales para la planta, tales como el potasio, que permitan evaluar en el tiempo los aportes a corto, mediano y largo plazo, con el fin de que las prácticas culturales conduzcan a un uso sostenible de la oferta de nutrientes en el suelo y la capacidad de resiliencia del mismo, y así mismo, a mejorar el rendimiento de las futuras plantaciones de *G. arborea*.

En plantaciones establecidas en Campeche de *G. arborea* de edades jóvenes, Parra (2012) analizó las características físicas y químicas de suelo, consigna que debido a los bajos contenidos de macronutrientes las plantas no pueden llevar a cabo sus principales funciones metabólicas, por tanto su desarrollo. Escobar (2013) manifiesta que los sitios de alta productividad de *G. arborea* de 3 y 10 años de edad establecida en Colombia se caracterizaron por su alto contenido de calcio y bajos contenidos de sodio y magnesio intercambiables y

encontró una relación entre el sodio intercambiable y el volumen, concluye que es posible que esta concentración incida en el desarrollo de la especie.

Se han realizado diversos estudios del efecto de las propiedades edáficas sobre el crecimiento para distintas especies como lo realizado por Kumar et al. (2011) quienes determinaron la estructura de un bosque seco tropical con predominancia de *Tectona grandis*, en India, observaron que el dap y la altura de teca estaban significativamente correlacionados con el pH del suelo. Bueis (2012) desarrolló un modelo discriminante para predecir la productividad de *Pinus sylvestris* con parámetros topográficos, edáficos (físicos, químicos y bioquímicos) y climáticos. Salcedo et al. (2014) en plantaciones de *Tectona grandis* establecidas en Nayarit, determinaron que un suelo con poca materia orgánica influye en la CIC que deriva en un menor desarrollo tanto en altura como en diámetro y que el contenido de K y P inciden de manera positiva en el crecimiento de teca. Salcedo et al. (2019) determinaron que suelos con pH de entre 6 y 7, $CIC > 30 \text{ cmol}^{(+)}\text{kg}$, $MO > 2.5 \%$ se asocian a las plantaciones de mejor productividad y concluyen que en México, el éxito en la productividad de plantaciones de especies exóticas dependerá, esencialmente, de las propiedades del suelo.

Objetivos

Los objetivos del estudio son analizar las características edáficas (físicas y químicas), y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de una plantación de *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México y desarrollar un modelo para estimar el volumen fustal a través de análisis de regresión lineal múltiple.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló sobre 8 parcelas permanentes de muestreo con dimensiones de 400 m^2 establecidas dentro de la plantación de *Gmelina arborea* ubicada en el predio “Las Piñas”, municipio de Tlatlaya, Estado de México (Figura 1). El clima es (Aw1) cálido subhúmedo con lluvias en verano,

de menor humedad (70.88 %), (Aw2) cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (20.14 %), temperatura media anual de 18-28 °C y precipitación anual 1000-1500 mm (INEGI, 2009). Los suelos predominantes son Phaeozem (37.34 %), Regosol (34.5 %), Leptosol (10.1 %), Luvisol (10.1 %), Cambisol (6.5 %), Vertisol (0.76 %) y Fluvisol (0.31 %) (INEGI, 2009).

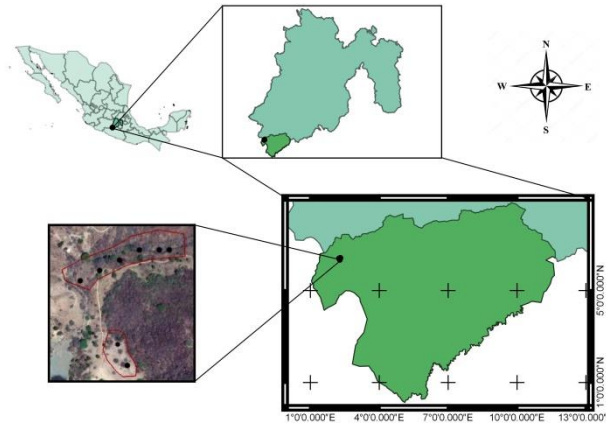


Figura 1. Ubicación de la plantación de *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

La superficie de la plantación es de ocho hectáreas en la que se colectaron datos de diámetros a 0.30 m sobre el nivel del suelo ($d_{0.30}$), diámetro a la altura de 1.3 m ($d_{1.3}$) y altura total (AT) con la Forcípula Haglof Sweden® y con el Hipsómetro Nikon Forestry Pro® a diferentes edades, los árboles están plantados bajo un arreglo topológico de tres bolillo con un espaciamiento de 3.10 m x 3.10 m, que corresponde a una densidad de 1,040 árboles/ha, adicionalmente se caracterizó el estado fitosanitario y el grado de sobrevivencia.

Datos edáficos y topográficos

Para determinar las características físico-químicas del suelo se extrajeron 5 sub-muestras de cada parcela se distribuyeron con base a un muestreo diagonal de acuerdo a los puntos cardinales N, S, E y W y una al centro de la parcela hasta una profundidad de 30 cm. Con estas cinco sub-muestras se

procedió a formar una muestra compuesta que se cuarteó para tener una muestra final de 500 gramos.

Las características físicas analizadas de cada muestra son: Clase textural, Punto de saturación, Capacidad de campo, Punto de marchitamiento permanente, Conductividad hidráulica, Densidad Aparente con base en los métodos descritos por la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

Las características químicas analizadas de cada muestra son: Materia orgánica (MO), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Boro (B), Aluminio (Al), Azufre (S), Nitrato de Nitrógeno (N-NO₃), pH, Carbonatos totales, Salinidad, Relación de cationes: Ca/K, Mg/K, Ca+Mg/K, Ca/Mg, CIC, Ca, Mg, K y Na, con base en los métodos descritos por la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). Además de las características edáficas se han tenido en consideración datos topográficos.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (procedimiento ANOVA) y prueba de medias (Tukey, 0.05) para observar diferencias de diámetro de tocón, diámetro normal, altura total y volumen, así como a los resultados obtenidos de las características edáficas (físico-químicas) y topográficas de las parcelas.

La información se sometió a un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las variables agrupadas por su tipo (edáficas físicas, edáficas químicas y topográficas) para reducir la dimensionalidad de los datos con el propósito de seleccionar aquellas variables no correlacionadas entre sí que recojan la mayor variabilidad de los datos.

El ACP se efectuó por grupos de variables ya que se considera que las correlaciones existirán mayoritariamente entre variables del mismo tipo, se tomó como criterio combinado de elección del número de componentes principales a considerar en cada análisis que el conjunto de las mismas recoja al menos el 45% de la varianza y que los autovalores de los componentes sean superiores

a la unidad. De cada uno de estos componentes se seleccionó la variable que presenta el coeficiente de mayor valor absoluto.

Se comprobó la normalidad de las variables seleccionadas a través del ACP mediante el test Shapiro-Wilk, las variables que no presentaban una distribución normal se excluyeron del Análisis de Regresión Lineal Múltiple. Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para analizar las correlaciones existentes entre las variables topográficas y edáficas seleccionadas entre sí, los procedimientos se realizaron con el paquete estadístico R® versión 3.14.

Resultados y Discusión

Las características edáficas físicas de las parcelas de la plantación de *G. arborea* muestran que la clase textural es francosa (C), franco arcillosa (Cr) y franca arcillo arenosa (Cra), la cual se clasifica como francosos (NOM-021-REC-NAT-2000) (Tabla 1). Las parcelas tienen entre 28 y 40.6 % de arcilla a excepción de la parcela 6 que contiene 51.2 %, algunos autores como Vásquez y Ugalde (1995) y Alfaro et al. (2002) mencionan que altos porcentajes de arcilla se constituyen como uno de los principales limitantes en el desarrollo de *G. arborea*, Rojas y Murillo (2004) recomiendan suelos con texturas francas, franca arcillosa y bien aireadas; Mohanty et al. (2007) y Martínez et al. (2008) señalan que los suelos arcillosos pueden retener más agua, pero las partículas están tan compactadas, que dejan poco espacio al aire que las raíces de las plantas necesitan dificultando su respiración, esta característica tiene importancia en el crecimiento forestal, determina en gran medida la capacidad de retención de agua y nutrientes y la aireación del suelo (Pritchett, 1986).

A través del análisis de la densidad real y la densidad aparente de un suelo se puede conocer la porosidad presente, parámetro que interviene directamente sobre la aireación del suelo y su contenido en agua (Cobertera, 1993). La densidad aparente por su parte suele variar entre 0.2 g/cm³ en las capas orgánicas y 1.9 en las arenas gruesas (Fisher y Binkley, 1999). De esta manera la porosidad media de los suelos forestales varía entre el 35 y el 65 % (Pritchett, 1986); expuesto lo anterior se observa que los valores de densidad aparente de

los suelos de las parcelas son altos (1.26 g/cm^3) por lo tanto, se trata de suelos compactos o poco porosos, es decir que tienen poca porosidad en su composición por ello la infiltración del agua es lenta, lo cual puede provocar anegamientos, el resultado de la prueba de “t” muestra que existen diferencias significativas entre las parcelas.

Tabla 1. Características edáficas físicas analizadas en las ocho (8) parcelas de *G. arborea*.

Característica física	*Medias	Pr>F
PS (%)	37.13±7.75 ab	0.007
CC (%)	19.10±4.20 a	0.177
PMP (%)	11.72±2.49 a	0.965
CH (cm hr)	6.01±2.00 a	0.609
DA (g cm^3)	1.26±0.10 ab	0.000

PS= Punto de saturación, CC= Capacidad de Campo, PMP= Punto de marchitamiento permanente, CH= Conductividad Hidráulica, DA= Densidad Aparente. *Medias (\pm Desv. Estándar). Letras distintas en hileras indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Las características edáficas químicas analizadas de las parcelas de *G. arborea* se resumen en la Tabla 2, se observa que la tendencia del pH en la plantación de *G. arborea* es moderadamente ácido con un promedio de 6.5, y existe diferencia significativa, así lo demuestra la prueba de “t”. Adekunle et al. (2011) evaluaron suelos que van de neutros a alcalinos (pH entre 6.47 y 7.47) en plantaciones de *G. arborea* en Nigeria; Parra (2012) obtuvo resultados de pH de 7.5 que es moderadamente alcalino en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Campeche. Se ha reportado que el rango de pH del suelo donde el crecimiento se ve favorecido es entre 5.7 y 6.4 (Vásquez y Ugalde, 1995; Vallejos, 1996) y entre 5 a 6 (Rojas et al., 2004). Vallejos (1996) menciona que la acidez de los suelos tiene efectos directos sobre el crecimiento forestal a través de la influencia que tiene sobre la actividad microbiana y la disponibilidad de los nutrientes, de manera que la disponibilidad de micronutrientes como el B, Cu, Mn y Fe es mayor al aumentar la acidez del suelo a diferencia de macronutrientes como el N, S, P, K, Ca, Mg que mejoran su disponibilidad a pH superiores; por su parte Pritchett, (1986) señala que los hongos por su parte son tolerantes a la acidez, pero son menos competitivos a pH menores de 6

mientras que las bacterias son menos tolerantes a la acidez disminuyendo su actividad con la misma.

Los resultados de salinidad del suelo con base en su conductividad muestran un promedio de 0.15 ds m, se clasifica como no salino (NOM-021-REC-NAT-2000), se observa que existe diferencia significativa entre las parcelas. El contenido de materia orgánica es de 2.67 %, se clasifica como clase medio (NOM-021-REC-NAT-2000) este resultado es ligeramente superior a lo reportado por Parra (2012) en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Campeche, determinó un contenido de MO de 1.2 a 2.3 %, ésta característica edáfica es de gran importancia para el crecimiento de las plantas, incrementa el poder retentivo de agua en el suelo, reduce las pérdidas por escurrimiento, mejora la aireación y produce una mejor estructura.

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para las plantas y los microorganismos, junto con el nitrógeno y el potasio. Puede ser un nutriente limitante, ya que es un componente de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos (Castellanos *et al.*, 2000), el resultado del contenido de fósforo en el suelo dentro de la plantación es de 6.94 ppm lo cual clasifica al suelo como de calidad media (NOM-021-REC-NAT-2000) y existe diferencia significativa entre las parcelas con respecto al fósfor; este resultado difiere con Escobar (2013) reporta valores de (15-45 ppm) y clasifica estas concentraciones como medias y óptimas, Parra (2012) determinó que el contenido de fósforo en suelos de plantaciones de *G. arborea* en Campeche es bajo, ante ello menciona que este resultado repercute en el crecimiento de los árboles.

Parra (2012) señala que la función principal de los micronutrientes es el metabolismo de las plantas, además de que participan en varios procesos enzimáticos de las plantas; así por ejemplo el hierro (Fe) es un metal que cataliza la formación de la clorofila y actúa como transportador del oxígeno, con respecto a este elemento reporta un contenido de 6.24 y 24.6 ppm estos resultados son menores a lo encontrado en la plantación de *G. arborea* del presente estudio, la cual presentó un promedio de 26.86 ppm y se clasifica

como muy alto (NOM-021-REC-NAT-2000) además se observa que existen diferencias significativas entre las parcelas; el zinc (Zn) ayuda a la síntesis de sustancias que permiten el crecimiento de la planta y es necesario para la producción de clorofila y carbohidratos la formación de la clorofila y actúa como transportador del oxígeno, encontró valores de 0.2 a 0.22 ppm, la plantación de *G. arborea* del presente estudio presenta un promedio de 1.23 ppm el cual se considera como medio, y existen diferencias significativas entre las parcelas; el cobre (Cu) es necesario para la formación de la clorofila y cataliza varias reacciones en las plantas, reporta valores de 1.26 y 1.32 ppm, *G. arborea* de este estudio presentó un promedio de 4.24 ppm y se clasifica como muy alto, no se observan diferencias significativas entre las parcelas; el manganeso (Mn) actúa directamente en la fotosíntesis al sintetizar clorofila, acelera la germinación y la maduración de las plantas además de incrementar la disponibilidad de fósforo (P) y calcio (Ca) reporta valores de 17.5 y 64.6 ppm, en la plantación en estudio de *G. arborea* el Mn 32.09 ppm se clasifica como muy alto; el B presentó 0.27 ppm el cual es muy bajo, estos elementos demuestran que existen diferencias significativas en las parcelas.

La CIC es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales. Esta capacidad aumenta marcadamente con la presencia de materia orgánica, y podría decirse que es la base de lo que llamamos fertilidad del suelo, el resultado de la CIC en la plantación de *G. arborea* es de 16.65 meq 100g, la fertilidad del suelo con base en la CIC es de clase media (NOM-021-REC-NAT-2000), se observa que existe diferencia significativa entre las parcelas con respecto a la CIC.

Los resultados del análisis de suelo indican que los cationes intercambiables de Ca son de 12.56 meq 100g este valor se clasifica de clase alta (NOM-021-REC-NAT-2000); Rojas y Murillo (2004) recomiendan que los contenidos de Ca deben ser mayores de 10 meq 100g, otros autores manifiestan que *G. arborea* crece normalmente cuando el contenido de Ca oscila entre 6.0 y 22.3 meq 100g (Vallejos, 1996).

El contenido de Mg presentó 3.48 meq 100g el cual se clasifica de clase alta (NOM-021-REC-NAT-2000), demuestra que existen diferencias significativas entre las parcelas; Rojas y Murillo (2004) recomiendan que los contenidos de Mg deben ser mayores de 6 meq 100g; Vallejos (1996) señala que *G. arborea* crece normalmente cuando el contenido de Mg es de entre 1.6 y 6.7 meq 100g (Tabla 2).

Los resultados del potasio (K) en los sitios de la plantación de *G. arborea* es de 0.32 meq 100g se clasifica de clase media (NOM-021-REC-NAT-2000), se observa que existen diferencias significativas entre las parcelas, es menor con respecto a lo reportado por Parra (2012) en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Campeche de 0.58 a 0.68 meq 100g. Vallejos (1996) señala que esta especie crece normalmente cuando el contenido de K oscila entre 0.5 y 0.7 meq 100g.

Con respecto a la relación Ca/K, Gómez (2005) puntualiza que debe variar entre 15 y 30 me 100g, el resultado promedio obtenido en la plantación de *G. arborea* es de 40.42 me 100g (Tabla 2), existen diferencias significativas entre las parcelas, este resultado es similar a lo obtenido por Escobar (2013) en algunas parcelas de *G. arborea*; se deduce que existe una deficiencia de potasio.

Para la relación Mg/K, Gómez (2005) indica un valor ideal de entre 10 y 15 me 100g, el resultado promedio de la plantación de *G. arborea* establecida en el Estado de México se encuentra en un rango aceptable, ya que muestra 12.75 me/100g que es aceptable (Tabla 2). Existen diferencias significativas entre las parcelas, resultado similar a lo reportado por Escobar (2013) en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Colombia donde obtuvieron 13.56 me 100g.

Sobre la relación Ca+Mg/K, Gómez (2005) menciona un valor ideal de entre 20 y 40 me 100g, *G. arborea* establecida en el Estado de México muestra un resultado promedio de 53.15 me 100g (Tabla 2) presentando diferencias significativas entre las parcelas. Éste resultado es mayor a lo recomendado por

Gómez (2005) y similar a lo reportado por Escobar (2013) quien obtuvo un promedio de 54.51 me 100g para plantaciones de *G. arborea* de 3 años de edad establecidas en Colombia, se infiere que existe deficiencia de potasio.

En la relación Ca/Mg, Gómez (2005) indica un valor ideal de entre 3 y 6 me 100g, *G. arborea* establecida en el Estado de México presenta un resultado de 3.86 me 100g, ésta relación se encuentra en el rango ideal y no muestra diferencias significativas entre las parcelas, es menor a lo reportado por Escobar (2013) muestra un resultado de 4.99 me 100g en plantaciones de *G. arborea* de 3 años de edad establecidas en Colombia.

Tabla 2. Características edáficas químicas analizadas en las ocho (8) parcelas de *G. arborea*.

Característica Química		Media	Pr>F
*MO (%)		2.67±0.49 ab	0.000
P (ppm)		6.94±6.87 ab	0.014
K (ppm)		118.2±62.77 ab	0.000
Ca (ppm)		2155.63±1315.52 ab	0.000
Mg (ppm)		393.75±290.58 ab	0.000
Na (ppm)		15.47±5.56 ab	0.046
Fe (ppm)		26.85±9.08 ab	0.002
Zn (ppm)		1.23±0.83 ab	0.010
Mn (ppm)		32.09±9.41 ab	0.002
Cu (ppm)		4.24±1.25 a	0.096
B (ppm)		0.27±0.06 ab	0.000
S (ppm)		2.19±1.10 a	0.052
N-NO ₃ (ppm)		4.49±1.17 a	0.068
pH		6.50±0.76 ab	0.006
Carbonatos Totales (%)		0.62±1.12 a	0.057
Salinidad (CE) (ds m)		0.15±0.04 ab	0.000
Relación entre cationes (me 100g)	Ca/K	40.42±22.80 ab	0.000
	Mg/K	12.75±8.83 ab	0.003
	Ca+Mg/K	53.15±29.35 ab	0.001
	Ca/Mg	3.86±1.58 a	0.269
Cationes intercambiables (meq 100g)	Ca	12.56±7.46 ab	0.008
	Mg	3.48±2.44 a	0.992
	K	0.32±0.15 ab	0.000
	Na	0.07±0.03 ab	0.000
	CIC	16.65±8.97 ab	0.002

*MO= Materia orgánica, P= Fósforo, K= Potasio, Ca= Calcio, Mg= Magnesio, Na= Sodio, Fe= Hierro, Zn= Zinc, Mn= Manganeseo, Cu= Cobre, B= Boro, S= Azufre, N-NO₃= Nitrato de nitrógeno, pH= Potencial de Hidrógeno. *Medias (± Desv. Estándar). Letras distintas en hileras indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Respecto a la distribución altitudinal *G. arborea* exhibe un buen crecimiento sobre rangos de 0-900 msnm como lo señalan Rojas y Murillo (2004); la plantación de *G. arborea* establecida en el Estado de México se encuentra establecida sobre una altitud promedio de 694.63 m, se puede decir que se encuentra en el rango indicado, aunque existen diferencias significativas con respecto a la distribución altitudinal a las que se encuentran las parcelas; con relación a la pendiente, éstos autores indican que *G. arborea* demuestra un buen crecimiento en sitios no superiores a 16 °, la pendiente del terreno en el que se ubica la plantación de estudio es de 21.39° (Tabla 3) y muestra que existen diferencias significativas entre las parcelas, además señalan que las plantaciones de *G. arborea* no prosperan en suelos muy erosionados o compactados, de topografía pronunciada, en esos sitios los árboles pueden mostrar características como fustes inclinados, poca altura, ramificados y aspecto arbustivo, por esta razón se sugiere plantar esta especie en suelos profundos, húmedos pero bien drenados y sin obstáculos de desarrollo radical; con base en lo anterior recomiendan que los mejores sitios para *G. arborea* se ubican en las partes bajas de los terrenos, donde por lo general tienen mayor disponibilidad de agua y nutrientes y los sitios con buenos contenidos de calcio y magnesio y los ubicados en áreas donde el uso anterior eran cultivos agrícolas.

Tabla 3. Características topográficas analizadas en las parcelas de *G. arborea*.

Características topográficas	*Medias	Pr>F
Altitud (msnm)	694.63±8.38 ab	0.004
Pendiente (°)	21.39±7.36 ab	0.009
Profundidad (cm)	31.38±1.86 a	0.486

*Medias (± Desv. Estándar). Letras distintas en hileras indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Con respecto a las variables dasométricas medidas en la plantación de *G. arborea* se tiene que son diferentes en las parcelas de acuerdo con el análisis de varianza ($p \leq 0.05$). En donde la parcela dos (2) presentó el mayor volumen fustal ($0.0295 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), con relación al diámetro de tocón, el diámetro normal y la altura total las parcelas dos (2), seis (6) y siete (7) son diferentes a las demás (Tabla 4); estos resultados son menores a los que reporta Escobar (2013) con

respecto a la altura total: 12.79 m, dap: 14.46 cm y volumen: 0.10 m³ ha⁻¹ en plantaciones de *G. arborea* de 3 años de edad establecidas en Colombia. El coeficiente de variación del dap es de 4 % en la plantación de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México, por lo que de acuerdo con Murillo et al. (1996) se trata de una plantación homogénea, es decir que tiene un coeficiente de variación menor de 10 %, lo cual refleja que se han realizado prácticas silvícolas (podas) oportunas conforme crecen los árboles.

Tabla 4. Variables dasométricas promedios de *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

Edad 2.91 años	Dt (cm)	Dap (cm)	At (m)	V (m ³ /ha)
Parcela 1	12.85±2.60 ac	9.66±1.98 ac	6.80±0.98 ab	0.0241±0.01 abd
Parcela 2	13.51±3.18 a	10.21±2.80 a	7.01±1.35 a	0.0295±0.02 b
Parcela 3	13.51±2.08 a	8.84±1.83 abc	6.61±0.78 ab	0.0199±0.01 abcd
Parcela 4	10.40±2.15 bc	7.70±1.53 bc	5.88±0.95 bcd	0.0142±0.01 cd
Parcela 5	11.36±1.39 abc	8.63±1.22 abc	5.53±0.51 cd	0.0154±0.01 acd
Parcela 6	13.11±3.04 a	10.00±2.25 a	7.08±1.06 a	0.0276±0.02 ab
Parcela 7	13.74±2.01 a	10.61±1.81 a	6.43±0.91 abd	0.0272±0.01 ab
Parcela 8	9.75±1.87 b	7.29±1.58 b	5.25±0.94 c	0.0111±0.01 c

Dt= Diámetro Tocón, Dap= Diámetro altura de pecho, At= Altura total, V (m³/ha)= Volumen fustal por hectárea. *Medias (± Desv. Estándar). Letras distintas en columnas indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey (p<0.05).

Del análisis de componentes principales para el conjunto de variables edáficas físicas estudiadas se seleccionaron los tres primeros componentes principales, se observa que el componente principal 1 explica el 79 % de la variabilidad total, mientras que el componente principal 2 explica el 19.96 %, y el componente principal 3 explica el 0.23 % (Figura 2), considerando los datos expuestos en el Tabla 5 y los criterios de selección establecidos.

Tabla 5. Autovalores y porcentajes de varianza de los tres primeros componentes principales de las variables edáficas físicas analizadas.

Componente Principal	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	1.9976	79.81	79.81
2	0.9989	19.96	99.77
3	0.10749	0.23	99.99

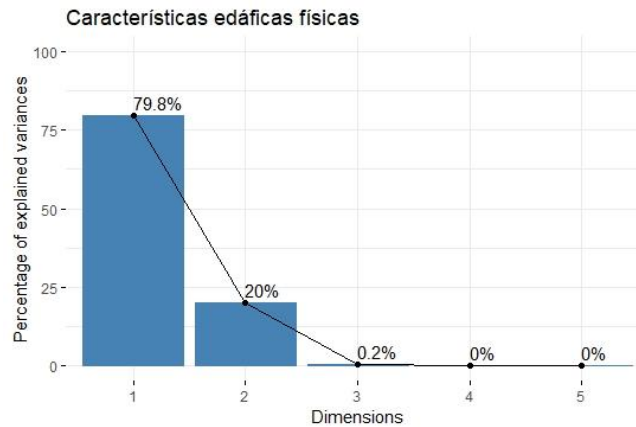


Figura 2. Variabilidad explicada por los grupos de componentes principales de las características edáficas físicas.

Se seleccionaron las variables Capacidad de Campo, Densidad Aparente y Conductividad Hidráulica por ser representativas de los tres primeros componentes principales (Tabla 6).

Tabla 6. Coeficientes para las funciones de los tres componentes principales para las variables edáficas físicas.

Variables	Componente 1	Componente 2	Componente 3
*PS (%)	-0.50034629	0.001387817	-0.28379147
CC (%)	-0.50035824	0.002084822	-0.28077997
PMP (%)	-0.50030378	0.008046264	-0.29954071
CH (cm/hr)	0.49623881	-0.093374525	-0.86306883
DA (g/cm ³)	0.05232968	0.995595391	-0.07754077

*PS= Punto de Saturación, CC= Capacidad de Campo, PMP= Punto de Marchitamiento Permanente, CH= Conductividad Hidráulica, DA= Densidad Aparente.

Se generó el círculo de correlaciones el cual permite observar la correlación entre los ACP (1 y 2) y las variables originales edáficas físicas (Figura 3), se observa que el CP1 explica mejor la variable densidad aparente, mientras que el segundo componente principal explica mejor el punto de marchitamiento permanente la capacidad de campo y el punto de saturación.

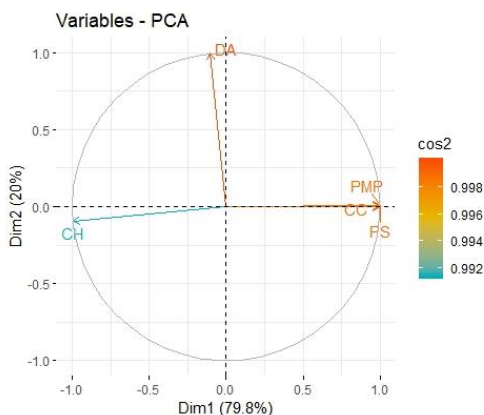


Figura 3. Correlación de los componentes principales 1 y 2 de las variables edáficas físicas.

En vista de los autovalores y porcentajes de varianza de los componentes principales del análisis de las variables edáficas químicas que se presentan en la Tabla 7, se seleccionaron seis componentes principales donde se observa que el componente principal 1 explica el 45 % de la variabilidad total, mientras que el componente principal 2 explica el 18.9 %, y el componente principal 3 explica el 15.3 % (Figura 4), considerando los datos expuestos en la Tabla 7 y los criterios de selección establecidos.

Tabla 7. Autovalores y porcentaje de varianza para los 6 primeros componentes principales para las variables edáficas químicas estudiadas.

Componente Principal	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	3.4203	44.99	44.99
2	2.2138	18.85	63.84
3	1.9928	15.27	79.12
4	1.60004	9.84	88.96
5	1.21031	5.63	94.59
6	0.95463	3.50	98.10

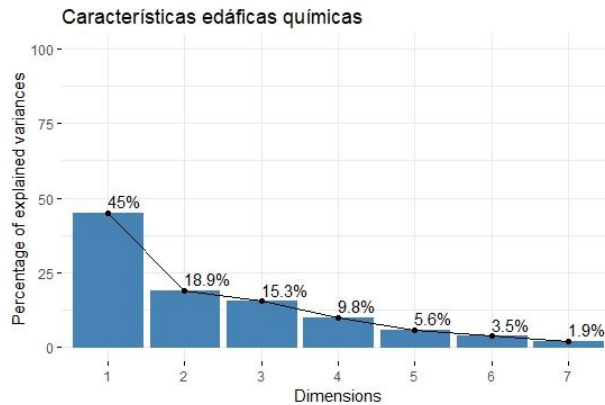


Figura 4. Variabilidad explicada por los grupos de componentes principales de las características edáficas químicas.

Se seleccionaron las variables Ca+Mg/K, Mn, Ca/Mg, N-NO₃, S y Cu por ser representativas de los componentes principales (Tabla 8).

Tabla 8. Coeficientes para las funciones de los seis componentes principales de las variables edáficas químicas.

Variable	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
MO	0.23404503	0.20231769	0.069221896	-0.197805470	0.077434876	-0.147120984
P	0.15995740	0.32332586	0.098362955	0.091440271	0.279059859	-0.078918815
K	0.15225351	0.36077175	0.139789520	0.064773384	-0.040176637	-0.003318688
Ca	-0.25000480	0.21639537	-0.019354616	0.095613974	-0.098398548	0.014913757
Mg	-0.20300288	0.01476541	0.299710162	-0.031663604	-0.275093870	0.206331153
Na	-0.26502168	0.17786642	-0.038020149	0.072526334	0.033306243	0.049621671
Fe	0.14978833	0.12040051	0.343467947	0.105337974	0.330065322	0.075168836
Zn	0.17135664	0.15742180	-0.176082680	-0.321297855	-0.310404559	0.040047894
Mn	0.03654476	-0.39307361	0.008130033	0.072895091	0.304040677	0.206037688
Cu	0.08557150	-0.15120562	-0.219315126	-0.320481856	-0.088945071	-0.600779251
B	0.15783303	-0.03540693	0.367761282	0.034322821	-0.113253397	-0.379489804
Al	0.11462509	-0.29562249	0.034034262	0.368064172	0.040170623	-0.261372229
S	-0.13892326	-0.04372932	0.076332050	0.291536844	-0.388373268	-0.304003314
N-NO ₃	-0.01987901	-0.18777565	0.065366066	-0.556447509	0.047725544	0.060721223
pH	-0.23061258	0.21608675	-0.142399323	0.024102391	-0.213569223	0.013200419
CT	-0.21648967	0.19845014	-0.072019591	0.204574746	0.019261797	-0.217560968
Salin	0.15292454	0.08792107	0.354847542	-0.139052062	-0.281946742	0.064499721
Ca/K	-0.28675885	0.04034964	-0.026882772	0.000464367	0.108719185	-0.104005650
Mg/K	-0.21609491	-0.14369547	0.278274194	-0.115877980	-0.055502899	0.053497042
Ca+Mg/K	-0.28790135	-0.01200621	0.063059964	-0.034296680	0.068001572	-0.064667503
Ca/Mg	0.04614913	0.25240524	-0.391147038	-0.035749081	-0.005285528	0.172860669

Cl Ca	-0.25185497	0.08181611	0.028250195	-0.171067561	0.259226054	-0.202509766
ClMg	-0.21197597	-0.02864800	0.311800894	-0.132679563	-0.130903321	0.115528665
ClK	0.14895945	0.33166699	0.184507227	-0.073321742	0.153233394	-0.119207643
ClNa	-0.26058228	0.05876526	-0.001279243	-0.155837971	0.262611119	-0.127490777
ClC	-0.26166099	0.04814631	0.110107716	-0.158445235	0.181772322	-0.153473140

Se generó el círculo de correlaciones el cual permite observar la correlación entre los ACP (1 y 2) y las variables originales edáficas químicas (Figura 5), se observa que el CP1 explica mejor la variable manganeso, nitratos de nitrógeno, aluminio y cobre, mientras que el segundo componente principal explica mejor la relación Ca/K, Ca+Mg/K, Mg/K y los cationes intercambiables de calcio y sodio.

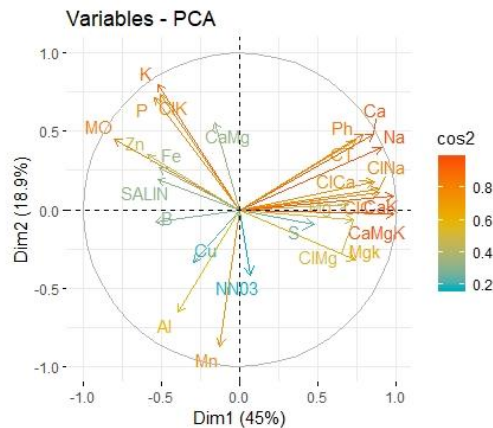


Figura 5. Correlación de los componentes principales de las variables edáficas químicas.

Dados los autovalores y porcentajes de varianza recogidos por las componentes principales del análisis de las variables topográficas estudiadas se seleccionaron los dos primeros componentes principales (Tabla 9). El ACP realizado sobre las variables topográficas revela que el primer componente principal recoge el 55.6 % de la varianza, con un autovalor de 1.29 y el segundo un 37.8 % con un autovalor de 1.06. Ya que sólo se cuenta con tres variables topográficas y la intención de este análisis es reducir la dimensionalidad de los datos se opta por limitar el número de componentes principales seleccionadas a dos. El coeficiente de la función del componente principal uno para el parámetro pendiente es el de mayor valor absoluto (0.710) por lo que esta variable ha sido

la seleccionada, y en el componente principal dos para el parámetro altitud es el de mayor valor absoluto (0.925) (Figura 6).

Tabla 9. Autovalores y porcentaje de varianza para los 3 primeros componentes principales para las variables topográficas estudiadas.

Componente Principal	Autovalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje de Varianza Acumulado
1	1.2910859	55.56	55.56
2	1.0649563	37.80	93.36
3	0.4460553	6.63	100.00

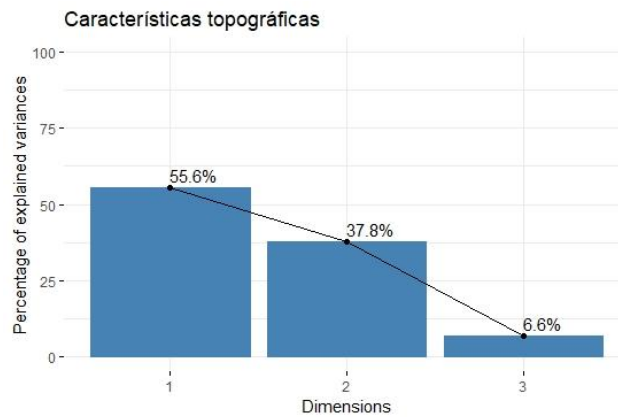


Figura 6. Variabilidad explicada por los grupos de componentes principales de las características topográficas.

Se seleccionaron las variables Pendiente y Altitud por ser representativas de los dos primeros componentes principales (Tabla 10).

Tabla 10. Coeficientes para las funciones de los tres componentes principales para las variables topográficas en *G. arborea*.

Variables	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Altitud	0.01807496	0.9252330	-0.3789685
Pendiente	0.71012777	0.2549409	0.6562954
Profundidad	-0.70384078	0.2809786	0.6524256

Altitud= Altitud (msnm), Pend= Pendiente (°), Prof= Profundidad (cm).

Se generó el círculo de correlaciones el cual permite observar la correlación entre los ACP (1 y 2) y las variables originales topográficas (Figura 7), se observa que el CP1 explica mejor la variable altitud, mientras que el segundo componente principal explica mejor la variable pendiente y profundidad.

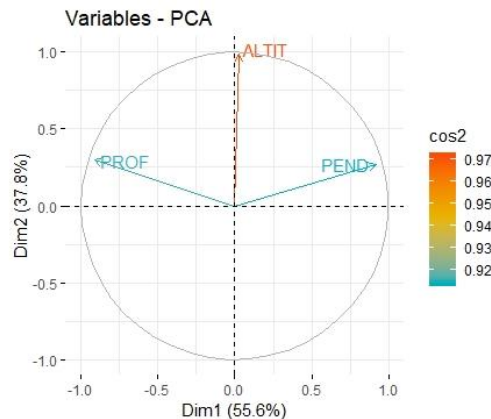


Figura 7. Correlación de los componentes principales 1 y 2 de las variables topográficas.

Realizados los ACP sobre los tres conjuntos de características estudiadas (edáficas físicas, edáficas químicas y topográficas), se seleccionaron 11 variables: CC, DA, CH, Ca+Mg/K, Mn, Ca/Mg, N-NO₃, S, Cu, Altitud, Pendiente. Con la prueba de Shapiro-Wilk, se examinó la normalidad de las variables elegidas, se acepta la hipótesis nula de normalidad de las variables a un nivel de confianza del 95%.

En la Tabla 11 se muestra la matriz de correlaciones para las 11 variables independientes que fueron seleccionadas con base en el ACP y el volumen. Se muestran algunas correlaciones positivas y significativas. Se encontró una correlación aunque no significativa pero apreciable entre la capacidad de campo y el volumen. La relación entre cationes Ca+Mg/K presentó un grado de asociación con el volumen de 0.62, el N-NO₃ presenta un grado de asociación de 0.60 con el volumen. Se infiere que la variación de volumen está fuertemente asociada a algunas características físicas y químicas de las parcelas donde se encuentra establecida *G. arborea*. Con base en su valor absoluto de correlación

las variables se ordenaron de forma jerárquica, es decir de mayor a menor para realizar el análisis de regresión lineal múltiple (ARLNM).

Tabla 11. Coeficientes de correlación entre volumen y las 11 variables independientes seleccionadas del ACP mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

	*V	CC	DA	CH	Ca+Mg/K	Mn	Ca/Mg	N-NO3	S	Cu	Altit	Pend
V	1.00											
	**											
CC	0.68	1.00										
	ns	**										
DA	-0.54	-0.10	1.00									
	ns	ns	**									
CH	-0.64	-0.99	0.01	1.00								
	ns	**	ns	**								
Ca+Mg/K	0.62	0.42	-0.55	-0.42	1.00							
	ns	ns	ns	ns	**							
Mn	-0.18	0.36	-0.12	-0.30	-0.09	1.00						
	ns	ns	ns	ns	ns	**						
Ca/Mg	-0.50	-0.94	-0.02	0.96	-0.28	-0.43	1.00					
	ns	**	ns	**	ns	ns	**					
N-NO3	0.60	0.34	-0.66	-0.23	0.14	0.30	-0.27	1.00				
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**				
S	0.25	0.44	0.29	-0.45	0.44	-0.06	-0.25	-0.33	1.00			
	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**			
Cu	-0.11	-0.22	0.07	0.26	-0.28	0.09	0.12	0.47	-0.24	1.00		
	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**		
Altit	-0.53	-0.25	0.80	0.22	-0.33	-0.05	0.26	-0.52	0.49	0.28	1.00	
	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	
Pend	-0.28	0.31	0.63	-0.37	-0.36	0.17	-0.39	-0.59	0.33	-0.48	0.24	1.00
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*V= Volumen (m³/ha), CC= Capacidad de Campo (%), DA= Densidad Aparente (g/cm³), Ca+Mg/K= Relación de cationes (me/100g), N-NO3= Nitrato de nitrógeno (ppm), S= Azufre (ppm), Cu=Cobre (ppm), Altit= Altitud (msnm), Pend= Pendiente (°).

***p<0.0001 **p<0.01 *p<0.05 ns=no significativa.

Con base en el conjunto de datos las variables introducidas como predictores en el ARLM, se muestra que tiene un $R^2_{adj} = 0.71$, el cual es capaz de explicar el 71.6 % de la variabilidad observada en el volumen de *G. arborea*, el test *F* muestra que es significativo (p-value: 0.04661), se satisfacen todas las condiciones para este tipo de regresión múltiple, por lo que se considera apropiado para estimar con mayor precisión del volumen fustal en función de las variables Conductividad Hidráulica (CH), Nitratos de Nitrógeno (N-NO3) y la relación Ca/Mg (Tabla 12).

Tabla 12. Valores de los estadísticos de bondad de ajuste del modelo evaluado en la estimación del volumen fustal de *G. arborea*.

Coefficientes	Valor estimado	Error Estándar	t value	Pr>t	R²_{adj}
Intercepto	0.019070	0.006847	2.785	0.0496	0.716
CH	-0.006113	0.002062	-2.965	0.0414	
NNO3	0.002902	0.001083	2.679	0.0553	
CaMg	0.006101	0.002647	2.305	0.0525	

R²_{adj}= Coeficiente de determinación ajustado.

Una vez examinado el cumplimiento de los supuestos de la regresión en el modelo, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, mostró un valor de 0.96 (Tabla 13); los porcentajes de frecuencias relativas acumuladas de los residuales muestran una relación cercana a una línea recta (Figura 8), respecto de la probabilidad de la distribución normal, sus porcentajes tienden a formar una campana de Gauss.

Tabla 13. Resultados de las pruebas los supuestos de la regresión.

Modelo	Shapiro-Wilk (W)	Pr<W	Durbin-Watson (DW)	Breusch-Pagan (BP)	Pr>Chi-Sq
$V = 0.019070 + -0.006113 \cdot CH + 0.002902 \cdot NNO3 + 0.006101 \cdot CaMg$	0.96503	0.8564	1.5684	3.3615	0.3392

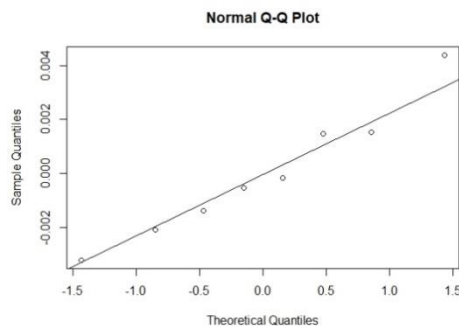


Figura 8. Porcentajes acumuladas de los residuales frente a la distribución normal para el modelo ajustado.

La dispersión de los residuos, respecto a los valores estimados de volumen del modelo (Figura 9) no presenta evidencia de alguna deficiencia. La prueba de

Breusch-Pagan obtuvo un valor de 3.36 (Tabla 13), el cual no es significativo en los residuales ($Pr > ChiSq = 0.3392$), no existe evidencia estadística significativa de heterocedasticidad. El estadístico Durbin-Watson de independencia de la frecuencia de los residuos demuestra que no hay colinealidad entre variables (Tabla 12).

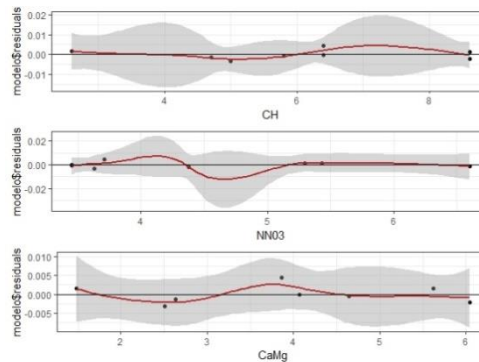


Figura 9. Distribución de residuos del modelo ajustado de volumen fustal para *G. arborea*.

Del proceso de selección dentro del ARLM, el mejor modelo resultante queda definido como:

$$V = 0.019070 + -0.006113 \cdot CH + 0.002902 \cdot NN03 + 0.006101 \cdot CaMg$$

VDonde:

V= Volumen fustal (m^3)

CH= Conductividad Hidráulica (cm/hr)

NN03= Nitratos de Nitrógeno (ppm)

Ca/Mg= Relación Calcio/Magnesio (meq/100g)

Conclusiones

Los resultados de crecimiento en volumen de la plantación de *G arborea*, sugieren que las variación de las características edáficas (físicas y químicas) y topográficas influyen en el crecimiento en volumen, mostró diferencias significativas entre las parcelas; con base en lo anterior se puede decir que es válido estudiar los factores ambientales que se asocian a este comportamiento.

Los resultados de las características edáficas físicas capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, y conductividad hidráulica son similares en las parcelas, la prueba de Tukey (0.005) demuestra que no existen diferencias significativas.

El modelo seleccionado para estimar el volumen fustal incluye como parámetro edáfico físico la conductividad hidráulica, las características edáficas químicas nitrato de nitrógeno y la relación de cationes intercambiables Ca/Mg, y con base en el resultado de la prueba de Tukey (0.005) para éstas características manifiestan que no existe evidencia de diferencias significativas entre las parcelas.

Se hace mención que en este estudio no se incluyeron aspectos climáticos, los cuales asociados a las características edáficas pueden explicar la variación del crecimiento de volumen de *G. arborea*.

Los parámetros edáficos y topográficos que contiene el modelo se pueden obtener en campo o mediante análisis de laboratorio de forma factible.

Se recomienda realizar un análisis foliar y establecer un sistema de fertilización con base a los resultados obtenidos de laboratorio y los requerimientos de la especie.

Con base en los resultados, se recomienda no establecer plantaciones de *G. arborea* en áreas con características edáficas y topográficas similares a las de este estudio.

Es indispensable conocer la autoecología de la especie la cual está asociada a las condiciones climáticas, edafológicas y la distribución altitudinal, además se debe tomar en consideración la oferta ambiental que presenta el área donde se proyecta establecer plantaciones.

Bibliografía

Adekunle, V. A. J., Alo, A. A., & Adekayode, F. O. (2011). Yields and nutrient pools in soils cultivated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in Nigerian

rainforest ecosystem. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 10(2), 127–135. doi.org/10.1016/j.jssas.2011.05.001

Alfaro, M., Camino, R. De, & Varmola, M. (2002). Melina (*Gmelina arborea*) in central América. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016039440>

Binkley, D., & Fisher, R. F. (2019). *Ecology and Management of Forest Soils*. Wiley. doi.org/10.1002/9781119455745

Bueis, T. M. (2012). Influencia de los parámetros edáficos , topográficos y climáticos sobre el índice de sitio de *Pinus sylvestris* L . en las masas de León y Palencia. Tesis de Maestría, Universidad de Valladolid.

Castellanos, J. Z., Uvalle, J. X. B., & Aguilar, A. S. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Recuperado de <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000056122>

Cobertera, E. (1993). *Edafología Aplicada*. Recuperado de <http://ebookbit.com/book?k=Edafologia+Aplicada&isbn=9788437611082&lang=es&source=firebaseapp.com>

Comisión Nacional Forestal, [CONAFOR]. (2014). México cuenta con 270 mil hectáreas de Plantaciones Forestales Comerciales. México D. F.: Semarnat.

Escobar, L. J. Q. (2013). Relación de parámetros de fertilidad del suelo con el índice de sitio determinado para plantaciones forestales de melina (*Gmelina arborea*) y ceiba (*Pachira quinata*) en Zambrano-Bolivar (Colombia). Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/44372/>

Gómez, M. (2005). Guía técnica para el manejo nutricional de los cultivos: Diagnóstico, interpretación y recomendación de planes de fertilización. Recuperado de https://www.google.com/search?rlz=1C1EJFA_enMX816MX816&ei=LLAGXaeNBKeR0gLEw7WgBg&q=Gu%25C3%25ADa+T%25C3%25A9cnica+para+el+ma+nejo+nutricional+de+los+cultivos%253A+Diagn%25C3%25B3stico%252C+inter+pretaci%25C3%25B3n+y+recomendaci%25C3%25B3n+de+planes+de+ferti

González, G. T., & Serrano, J. R. M. (2004). Propiedades y utilidades de la madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb) procedente de árboles plantados en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 6(17), 61–69. Recuperado de <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/386>

Indira, E. P. (2006). Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form. *Journal of Tropical Forest Science*, 36–50. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/43594644>

Instituto Nacional De Estadística Geografía e Informática, (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tlatlaya, Estado de México. Clave geoestadística 15105. México D. F.: Inegi. Recuperado de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/16/16059.pdf>

Kumar, J. N., Patel, K., Kumar, R. N., & Kumar, R. B. (2011). Forest structure, diversity and soil properties in a dry tropical forest in Rajasthan, Western India. *Annals of Forest Research*, 54(1), 89–98.

Martínez, J. A., Zuluaga, J. J. P., Romero, J. F., Baquero, C. M., Berrio, E. G., Arrieta, A. A., & Pérez, D. H. (2008). Efecto de prácticas de manejo de suelos sobre el crecimiento de plantas de *Gmelina arborea* y *Pachira quinata* en Zambrano, Bolívar. En S. G. Caicedo, C. R. S. Salamanca, C. A. S. Jaramillo, E. F. M. Almansa, & D. M. Peña, L (Eds.), XIV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo (p. 108). Villavicencio, Meta. Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Mohanty, M., Painuli, D. K., Misra, A. K., & Ghosh, P. K. (2007). Soil quality effects of tillage and residue under rice–wheat cropping on a Vertisol in India. *Soil and Tillage Research*, 92(1–2), 243–250. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719870600064X>

Moya-Roque, R., Muñoz-Acosta, F., Salas-Garita, C., Berrocal-Jiménez, A., Leandro-Zúñiga, L., & Esquivel-Segura, E. (2010). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana KurúMesoamericana*, 7, 18–19.

Murillo, L. F., Hernandez, X., & Murillo, O. (1996). Evaluacion de la calidad de plantaciones de cipres (*Cupressus lusitanica*) en el valle de el Guarco, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 20(1), 17–23.

Parra, J. P. P. (2012). Crecimiento de teca (*Tectona grandis* King. L.) y melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el predio Dzidzila, Campeche, México. Tesis de Ingeniero, Universidad Autónoma Chapingo.

Pritchett, W. L. (1986). Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. México D. F.: Limusa. Recuperado de <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=PLAFOR.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000077>

Rejón, L. A. S., & Romero, J. L. (2004). Plantations of *Gmelina arborea* in southern Mexico. *New Forests*, 28(2–3), 293–297. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1023/B:NEFO.0000040956.68838.97>

Rojas, F. R., & Murillo, O. G. (2004). Botánica y ecología. En F. R. Rojas, D. A. Arias, R. R. Moya, A. M. Meza, O. G. Murillo, & M. Arguedas (Eds.), *Manual para productores de melina (Gmelina arborea) en Costa Rica* (p. 314). Cartago, Costa Rica: FONAFIFO. Recuperado de [http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Especies_plantaciones/MELINA/Manual para los productores de melina.pdf](http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Especies_plantaciones/MELINA/Manual_para_los_productores_de_melina.pdf)

Salcedo-Pérez, E., Blandon-Ruiz, B. A., Hernández-Álvarez, E., González-Cruz, R., Bernabé-Antonio, A., Orozco-Guareño, E., ... Delgado-Fornué, E. (2019). Propiedades del suelo y nitrógeno como indicadores del crecimiento en plantaciones comerciales de teca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52). [doi.org/doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.398](https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.398)

Salcedo-Pérez, E., Ypushima-Pinedo, A. L., González-Cruz, R., Zamora-Nátera, J. F., 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. doi.org/10.29298/rmcf.v5i24.321

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana, Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudio, Muestreo y Análisis. Recuperado de https://www.google.com/search?rlz=1C1EJFA_enMX816MX816&ei=laUGXf6LEqaA0wKcrqf4Bg&q=Norma+Oficial+Mexicana%2C+Especificaciones+de+Fertilidad%2C+Salinidad+y+Clasificación+de+Suelos%2C+Estudio%2C+Muestreo+y+Análisis&oq=Norma+Oficial+Mexicana%2C+Esp

Vallejos, O. S. B. (1996). Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas edafoclimáticas y foliares para *Tectona Grandis* LF, *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb, en Costa Rica. Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Recuperado de <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=orton.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=062684>

Vasquez, W., & Ugalde, L. (1996). Rendimiento y Calidad de Sitio para *Gmelina arborea*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. En X Congreso Nacional Agronómico / II Congreso de Suelos. (pp. 7–13). Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza (CATIE).

Wee, A. K. S., Li, C., Dvorak, W. S., & Hong, Y. (2012). Genetic diversity in natural populations of *Gmelina arborea*: implications for breeding and conservation. *New Forests*, 43(4), 411–428. doi.org/10.1007/s11056-011-9288-2

CONCLUSIONES GENERALES

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 a establecer en plantaciones, las características agroecológicas del área a plantar y contar con los objetivos de destino de la producción, para que sea encaminada hacia la sustentabilidad; además se deben tomar en cuenta las tendencias sobre cambio climático.

Se estimó que el carbono acumulado en la plantación de *G. arborea* a la edad de 35 meses es de 8.31 ton ha⁻¹, con una densidad de 1040 árboles ha⁻¹; expuesto lo anterior se concluye que las plantaciones forestales comerciales son una opción para mitigar las emisiones de CO₂.

Con las ecuaciones generadas, la clasificación de la capacidad productiva de la superficie forestal de *G. arborea* en el Estado de México, contribuirá como herramienta básica y primordial en la planeación del manejo forestal en esta región. Los resultados de crecimiento en volumen de la plantación de *G. arborea*, sugieren que las variación de las características edáficas (físicas y químicas) y topográficas influyen en el crecimiento. Es válido estudiar los factores ambientales que se asocian a este comportamiento.

Se hace mención que en este estudio no se incluyeron aspectos climáticos, los cuales asociados a las características edáficas pueden explicar la variación del crecimiento de volumen de *G. arborea*. Se recomienda realizar un análisis foliar, el cual es muy útil para relacionar al suelo con el estado nutricional del arbolado y permite relacionar las variables de crecimiento con la nutrición de la

plantación. Se recomienda establecer un sistema de fertilización con base a los resultados obtenidos de laboratorio y los requerimientos de la especie.