



Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de *Gmelina arborea* Roxb, en Tlatlaya, Estado de México

Edaphic and topographic characteristics associated with growth in volume of *Gmelina arborea* Roxb, in Tlatlaya, Mexico State

Ricardo Telles Antonio¹, Eduardo Alanís Rodríguez^{2*}, Javier Jiménez Pérez², Oscar Alberto Aguirre Calderón², Eduardo Javier Treviño Garza² y Héctor Manuel de los Santos Posadas³

¹ Universidad Mexiquense del Bicentenario. Unidad de Estudios Superiores Amatepec. Amatepec, Estado de México, México.

³ Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.

* Autor de correspondencia.
eduardoforestal@gmail.com

² Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México.

RESUMEN

Gmelina arborea es una especie de rápido crecimiento y fácil adaptación a diversidad de condiciones de sitio; el objetivo del estudio fue analizar las características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen fustal de *G. arborea* establecida en el Estado de México y desarrollar un modelo para estimar el volumen fustal. La investigación fue desarrollada en ocho parcelas permanentes de muestreo de forma circular (400 m^2), donde se extrajeron 5 sub-muestras de suelo de cada parcela, las cuales fueron mezcladas para formar una muestra final de 500 gramos. El análisis de las características edáficas se hizo con base en la NOM-021-RECNAT-2000 y datos de altitud, pendiente y profundidad. Para el análisis de varianza y prueba de medias, se efectuó un análisis de componentes principales y posteriormente, una regresión lineal múltiple; a través del coeficiente de correlación, se compararon las correlaciones existentes entre las variables elegidas con el paquete estadístico R®. El modelo resultante tomó como variables predictoras la conductividad hidráulica, los nitratos y la relación Ca/Mg; este modelo explicó 71.6% de la variabilidad observada en el volumen fustal ($R^2_{\text{ajustado}} = 0.716$). De acuerdo con el resultado de varianza, estas variables no mostraron diferencias significativas. Se concluye que la variación de las características edáficas y topográficas influye en el crecimiento del volumen fustal. Es indispensable conocer la autoecología de la especie, la cual está asociada a condiciones climáticas y edafológicas, así como a la distribución altitudinal.

PALABRAS CLAVE: *Gmelina arborea*, nutrientes, plantación forestal, productividad, suelos.

ABSTRACT

Gmelina arborea is a fast-growing species easily adaptable to a diversity of site conditions; the objective of the study was to analyze the edaphic and topographic characteristics associated with the growth of *G. arborea* established in Mexico State and to develop a model to estimate the stem volume. The research was carried out in eight permanent sampling plots of circular shape (400 m^2), where 5 soil subsamples were extracted from each plot, which were mixed to form a final sample of 500 grams. The analysis of edaphic characteristics was made based on NOM-021-RECNAT-2000 and data on altitude, slope, and depth. For the analysis of variance and test of means, a principal component analysis was carried out, followed by a multiple linear regression; the correlation coefficient was used to compare the correlations between the variables chosen with the R® statistical package. The resulting model took hydraulic conductivity, nitrates and the Ca/Mg ratio as predictor variables; this model explained 71.6% of the variability observed in the volume of the trunk ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.716$). According to the variance results, these variables did not show significant differences. It is concluded that the variation of the edaphic and topographic characteristics influences the growth of the volume of the canopy. It is essential to know the autoecology of the species, which is associated with climatic and edaphological conditions, as well as altitudinal distribution.

KEYWORDS: *Gmelina arborea*, nutrients, forest plantation, productivity, soils.

INTRODUCCIÓN

Gmelina arborea Roxb. es una especie de rápido crecimiento a lo largo del turno y de fácil adaptación a una diversidad de condiciones de sitio; comúnmente es utilizada para el establecimiento de plantaciones comerciales (Rojas y Murillo, 2004; Indira, 2006; Moya-Roque *et al.*, 2010). Debido a su alta productividad maderable, *G. arborea* ofrece a los productores e inversionistas un rápido retorno del capital (Wee, Li, Dvorak, y Hong, 2012). Por las características tecnológicas que presenta su madera, es de fácil trabajabilidad (González y Serrano, 2004) y buen acabado; igualmente, puede ser utilizada en muebles de alta calidad (Rejón y Romero, 2004), construcción, tableros contrachapados, lápices, etc. De igual forma, 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 270 000 ha de plantaciones forestales comerciales; de las principales especies maderables establecidas, *G. arborea* cuenta con 24 061 ha (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2014). En el Estado de México existe una tendencia de adición de 250 ha de *G. arborea* establecidas por año, con una superficie total de 1248 ha al 2018 (Protectora de Bosques del Estado de México [Probosque], 2019).

En Colombia, Barrios *et al.* (2011) caracterizaron químicamente el suelo de una plantación de *G. arborea* de cuatro años de edad, establecieron dosis de fertilización y concluyeron que el máximo incremento promedio anual en volumen total sin corteza alcanza 15% en relación con las parcelas testigo.

El pH del suelo se ha correlacionado positivamente con la altura total y con el diámetro normal al determinar la estructura de un bosque tropical en predominancia de *Tectona grandis* L. f. en la India (Kumar, Patel, Kumar y Kumar, 2011). Bueis (2012) desarrolló un modelo discriminante para predecir la productividad de *Pinus sylvestris* L. con parámetros topográficos, edáficos (físicos, químicos y bioquímicos) y climáticos. En plantaciones de

T. grandis establecidas en Nayarit, Salcedo-Pérez *et al.* (2014) determinaron que un suelo con poca materia orgánica (MO) influye en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que deriva en un menor desarrollo tanto en altura como en diámetro normal y que el contenido de potasio (K) y fósforo (P) inciden de manera positiva en el crecimiento de la especie.

Salcedo-Pérez *et al.* (2019) establecieron que suelos con pH de entre 6 y 7, CIC > 30 cmol⁽⁺⁾ kg y materia orgánica > 2.5% se asocian a las plantaciones de mejor productividad de *T. grandis* y concluyeron que, en México, el éxito en la productividad de plantaciones de especies exóticas depende, esencialmente de las propiedades del suelo. Por su parte Ruiz-Blandon *et al.* (2020) estipularon que los mejores parámetros dasométricos y producción de biomasa de *G. arborea*, se asociaron a suelos con pH > 6 y relación C/N > 20, y que el óptimo rendimiento dependerá del arreglo forestal, el manejo y las características edáficas.

OBJETIVOS

Los objetivos del estudio fueron analizar las características físicas y químicas del suelo, así como las topográficas asociadas con el crecimiento en volumen fustal de una plantación de *Gmelina arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México, además de desarrollar un modelo para estimar el volumen fustal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en una plantación forestal comercial de *G. arborea* ubicada en el predio “Las Piñas”, municipio de Tlatlaya, Estado de México (Fig. 1). El clima es (Aw1) cálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004), temperatura media anual de 18 °C a 28 °C y precipitación anual que fluctúa entre los 1000 mm y los 1500 mm (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [Inegi], 2009). Los suelos predominantes son del grupo Regosol (Inegi, 2009).

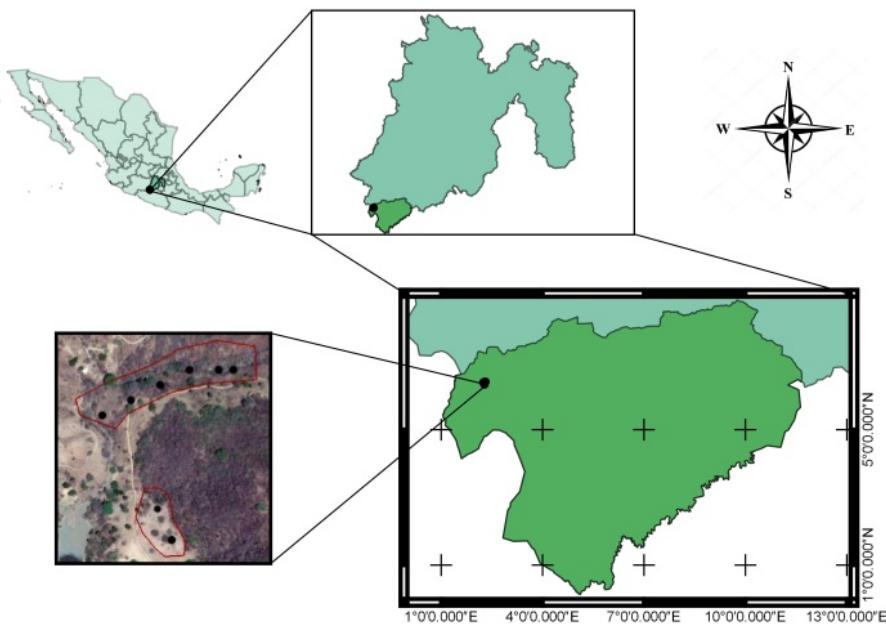


FIGURA 1. Ubicación de la PFC de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México.

La toma de datos de campo se realizó en el año 2017 a los tres años de edad de la plantación, la superficie de la plantación fue de ocho hectáreas. Los árboles estaban plantados bajo un arreglo tipológico en tresbolillo con un espaciamiento de 3.10 m × 3.10 m y con una densidad correspondiente a 1040 árboles por hectárea. Se establecieron ocho parcelas permanentes de muestreo de forma circular (400 m²) y a los árboles se les registraron datos de diámetros a 0.30 m sobre el nivel del suelo, diámetro normal (1.30 m) y altura total. Estas mediciones se hicieron con una forcípula Haglof Sweden® y con un hipsómetro Nikon Forestry Pro®. Adicionalmente, se caracterizó el estado fitosanitario y el grado de supervivencia de los árboles. Con los datos obtenidos de este inventario, se generó información de área basal y de volumen fustal con la ecuación de cubicación de Rodríguez y Castañeda (2014) (Ec. 1).

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \cdot ff$$

Donde:

V = Volumen (m³)

D = Diámetro normal (m)

h = Altura total (m)

ff = Factor de forma (0.46)

Datos edáficos y topográficos

Para determinar las características físico-químicas del suelo, se extrajeron cinco sub-muestras de cada parcela, se distribuyeron con base en un muestreo diagonal de acuerdo con los puntos cardinales N, S, E y W y una al centro de la parcela hasta una profundidad de 30 cm (Barrios *et al.*, 2011; Salcedo-Pérez *et al.*, 2019). Con las cinco sub-muestras se procedió a formar una muestra compuesta que fue mezclada homogéneamente y se dividió en cuatro partes para obtener una muestra final de 500 g, misma que fue rotulada con datos de identificación (Salcedo-Pérez *et al.*, 2014).

Las características físicas analizadas de cada muestra fueron: clase textural, punto de saturación, capacidad de

campo, punto de marchitez permanente, conductividad hidráulica, y densidad aparente, con base en los métodos descritos por la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2002; Salcedo-Pérez *et al.*, 2019).

Las características químicas analizadas de cada muestra fueron: MO, P, K, Ca, Mg, Na, hierro (Fe), Zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), aluminio (Al), azufre (S), nitratos (N-NO₃), pH, carbonatos totales, salinidad y 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, 2002); conjuntamente se obtuvieron datos topográficos de altitud (m), pendiente (°) y profundidad (cm) (Ávila, Murillo, Murillo y Sandoval, 2015).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (procedimiento ANOVA) de un factor y, posteriormente, a las variables que presentaron diferencia significativa, se les aplicó la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$) como comparador múltiple, para verificar posibles diferencias significativas entre las variables (Rubio y Berlanga, 2012): dasométricas, físicas-químicas y topográficas (Salcedo-Pérez *et al.*, 2014; González-Rojas, Murillo-Cruz y Ávila-Arias, 2016; Salcedo-Pérez *et al.*, 2019).

La información se sometió a un análisis de componentes principales (ACP) como técnica exploratoria sobre las variables agrupadas por su tipo (edáficas físicas, edáficas químicas y topográficas) para reducir la dimensionalidad de los datos y con el propósito de seleccionar aquellas no correlacionadas entre sí que recogieran la mayor variabilidad de los datos (Thiers y Gerding, 2007).

El ACP se efectuó por grupos de variables ya que se considera que las correlaciones existirán mayoritariamente entre variables del mismo tipo. Ante ello, se tomó como criterio combinado de elección del número de componentes principales a considerar en cada análisis que el conjunto de estas recogiera al menos 45% de la varianza.

La relevancia de las variables en cada componente principal se evaluó a través de su valor de contribución (autovalor), el cual es más significativo en la medida que se aproxima al valor |1| (Isebrands y Crow, 1975; Guisande, Vaamonde y Barreiro, 2013).

De cada uno de los componentes, se identificó el orden en que las diferentes variables de las parcelas están asociadas con el crecimiento en volumen fustal de *G. arborea* (Thiers y Gerding, 2007).

Se comprobó la normalidad de las variables seleccionadas a través del ACP mediante la prueba *Shapiro-Wilk*. Las variables que no presentaban una distribución normal se excluyeron del análisis de regresión lineal múltiple (Mariño-Macana y Rodríguez-Melo, 2010). Se utilizó el coeficiente de correlación de *Pearson* para analizar las similitudes existentes entre las variables topográficas y edáficas seleccionadas entre sí (Adeboye *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2011; Salcedo-Pérez *et al.*, 2014). Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete estadístico R® versión 3.14 (Santana y Farfán, 2014).

Para verificar el cumplimiento de los supuestos de la regresión, se determinaron la normalidad de los residuos (Shapiro-Wilk), la homogeneidad de varianzas de los residuos (Breusch-Pagan) y la independencia de los residuos (Durbin-Watson).

Se analizó la distribución de los residuales mediante método gráfico de la ecuación de regresión de volumen fustal de *G. arborea*, para observar la distribución de los residuos, tal como lo recomiendan Álvarez *et al.* (2003).

RESULTADOS

Las características edáficas físicas de las parcelas de la plantación de *G. arborea* mostraron que la clase textural es francesa (C), franco arcillosa (Cr) y franco arcillo arenosa (Cra), la cual clasifica a los suelos de las parcelas como francesos (NOM-021-RECNAT-2000) (Tabla 1). Las parcelas presentan entre 28% y 40.6% de arcilla a excepción de la parcela 6 que contiene 51.2%. Las características edáficas químicas analizadas se resumen en la tabla 2, las topográficas en la tabla 3 y las dasométricas en la tabla 4.



TABLA 1. Comparación de medias por Tukey de las características edáficas físicas analizadas en las parcelas de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México a los tres años de edad.

Característica física	*Medias	Pr>F	Clasificación NOM-021-RECNAT-2000
PS (%)	37.13±7.25 ab	0.000	--
CC (%)	19.10±3.93 ab	0.000	Media baja 12-20
PMP (%)	11.72±2.33 ab	0.000	--
CH (cm h ⁻¹)	6.01±1.88	0.198	Moderadamente Alto
DA (g cm ⁻³)	1.26±0.10 ab	0.002	Francosos 1.20-1.32

PS = punto de saturación, CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, CH = conductividad hidráulica, DA = densidad aparente. *Medias (\pm Desv. estándar).

Letras distintas en filas indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

TABLA 2. Comparación de medias por Tukey de las características edáficas químicas analizadas en las parcelas de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México a los tres años de edad.

Característica Química	Unidad de medida	**Medias	Pr>F	Clasificación NOM-021-RECNAT-2000
*MO	%	2.67±0.45	0.057	Medio 0.6-3.5
P		6.94±6.43	0.360	Bajo <15
K		118.2±58.72 ab	0.000	Bajo 100-150
Ca		2155.63±1230.55 ab	0.000	Alto >2000
Mg		393.75±271.81 ab	0.002	Alto >180
Na		15.47±5.20 ab	0.000	--
Fe	ppm	26.85±8.50 ab	0.000	Muy alto >2.10
Zn		1.23±0.77 ab	0.003	Medio 0.80-1.29
Mn		32.09±8.80 ab	0.000	Muy Alto >2.10
Cu		4.24±1.17	0.796	Muy Alto >2.10
B		0.27±0.05 ab	0.000	Muy bajo <0.39
S		2.19±1.03 ab	0.029	Medio 2-10
N-NO ₃		4.49±1.09	0.995	Muy bajo 0-10
pH	--	6.50±0.71 ab	0.045	Moderadamente ácido 5.1-6.5
Carbonatos Totales	%	0.62±1.05 ab	0.001	--
Salinidad (CE)	dS m ⁻¹	0.15±0.04 ab	0.000	No salino 0-2.0
Relación entre cationes	Ca/K	40.42±22.32 ab	0.001	--
	Mg/K	12.75±8.26 ab	0.023	--
	Ca+Mg/K	53.15±27.46 ab	0.000	--
	Ca/Mg	3.86±1.48	0.543	--
Cationes intercambiables	Ca	12.56±6.98 ab	0.012	Alta >10
	Mg	3.48±2.28	0.418	Alta >3.0
	K	0.32±0.14 ab	0.000	Media 0.3-0.6
	Na	0.07±0.03 ab	0.000	--
	CIC	16.65±8.39 ab	0.002	Media 15-25

*MO = materia orgánica, P = fósforo, K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio, Na = sodio, Fe = hierro, Zn = zinc, Mn = manganeso, Cu = cobre, B = boro, S = azufre, N-NO₃ = nitratos, pH = potencial de hidrógeno.

**Medias (\pm Desv. estándar). Letras distintas en filas indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

TABLA 3. Comparación de medias por Tukey de las características topográficas analizadas en las parcelas de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México a los tres años de edad.

Características topográficas	*Medias	Pr>F
Altitud (m s.n.m.)	694.63±8.38 ab	0.000
Pendiente (°)	21.39±7.36 ab	0.000
Profundidad (cm)	31.38±1.86 ab	0.000

*Medias (\pm Desv. estándar).

Letras distintas en filas indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

TABLA 4. Comparación de medias por Tukey de las variables dasométricas de *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México a los tres años de edad.

Parcela	Diámetro tocón (cm)	Diámetro normal (cm)	Altura total (m)	Volumen fustal ($m^3 ha^{-1}$)
1	12.01±2.57 bcd	9.00±1.95 abc	6.72±0.96 cd	0.021±0.01 abc
2	11.33±3.12 abc	8.25±2.75 a	6.04±1.32 abc	0.019±0.02 ab
3	11.38±2.05 abc	8.42±1.81 ab	6.37±0.77 acd	0.018±0.01 ab
4	10.71±2.11 ab	7.74±1.51 a	5.88±0.93 ab	0.014±0.01 a
5	11.04±1.36 abc	8.34±1.20 ab	5.69±0.50 ab	0.015±0.00 ab
6	13.57±2.96 d	10.23±2.19 c	7.11±1.03 d	0.030±0.02 c
7	13.27±1.97 cd	9.99±1.77 bc	6.36±0.89 acd	0.024±0.01 bc
8	9.75±1.80 b	7.29±1.53 a	5.25±0.91 b	0.011±0.01 a

Medias (\pm Desv. estándar).

Letras distintas en columnas indican diferencias significativas entre las parcelas, determinadas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales para el conjunto de variables edáficas físicas estudiadas evidenció tres componentes principales, los cuales se presentan en la tabla 5. Se seleccionaron las variables CC, DA y CH por ser representativas de los componentes principales (Tabla 6).

Con base en los grupos de componentes principales conformados por los tres tipos de variables: edáficas físicas, edáficas químicas y topográficas, se optó por limitar el número de componentes principales a dos por tipo de variable, como lo sugieren Guisande *et al.* (2013) con la intención de reducir la dimensionalidad de los datos. También para los tres tipos de variables, se generó el círculo de correlación para los dos componentes principales que

obtuvieron un valor de contribución (autovalor) aproximado al valor 1.

En la figura 2 se observa que el CP1 proporcionó mayor peso a las variables edáficas físicas CC, PMP, PS y CH, en orden de importancia. Además, se infiere que están relacionadas con las parcelas 3, 4, 6 y 7 por presentar resultados mínimos y máximos del análisis en laboratorio. El CP2 proporcionó mayor peso a la variable edáfica física DA y está relacionada con las parcelas 5 y 8 que presentaron resultados de DA máximos.

Para el conjunto de variables edáficas químicas estudiadas, se conformaron seis componentes principales (Tabla 7). Se seleccionaron las variables químicas: relación Ca+Mg/K, Mn, Ca/Mg, N-N03, S y Cu por ser representativas de los componentes principales (Tabla 8).



TABLA 5. Autovalor, porcentaje de varianza y porcentaje de varianza acumulado asociado del análisis de componentes principales de las variables edáficas físicas analizadas en la plantación de *G. arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

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	0.1074	0.23	99.99

TABLA 6. Coeficientes seleccionados y los primeros tres componentes principales del ACP de las variables edáficas físicas de la plantación de *G. arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

Variables	CP1	CP2	CP3
*PS (%)	-0.5003	0.0014	-0.2838
CC (%)	-0.5004	0.0021	-0.2808
PMP (%)	-0.5003	0.0080	-0.2995
CH (cm h ⁻¹)	0.4962	-0.0934	-0.8631
DA (g cm ⁻³)	0.0523	0.9956	-0.0775

*PS = punto de saturación, CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, CH = conductividad hidráulica, DA = densidad aparente, CP = componente principal.

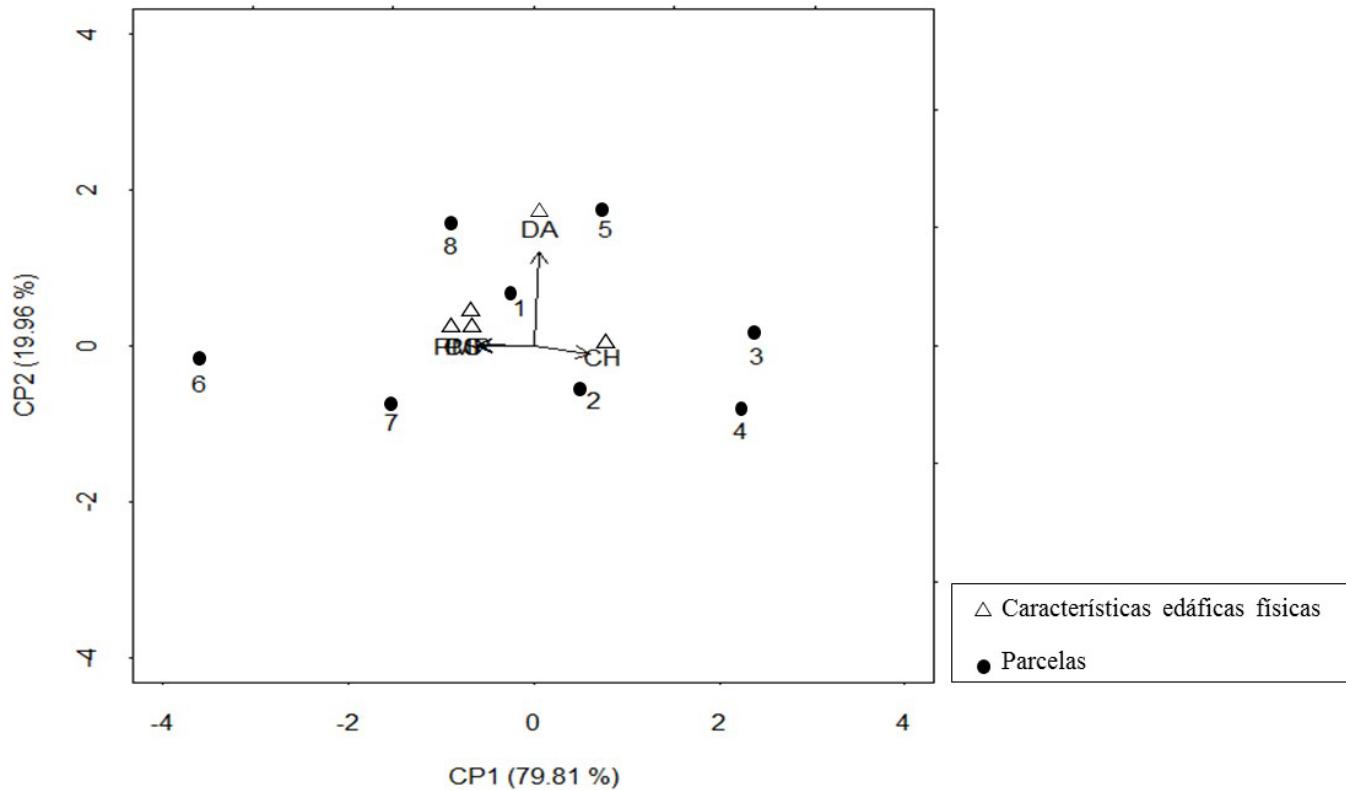


FIGURA 2. Correlación de los componentes principales 1 y 2 de las variables edáficas físicas analizadas en la plantación de *G. arborea* establecida en el Estado de México.

TABLA 7. Autovalor, porcentaje de varianza y porcentaje de varianza acumulado asociado del análisis de componentes principales de las variables edáficas químicas analizadas en la plantación de *G. arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

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	1.6000	9.84	88.96
5	1.2103	5.63	94.59
6	0.9546	3.50	98.10

TABLA 8. Coeficientes seleccionados y los primeros seis componentes principales del ACP de las variables edáficas químicas de la plantación de *G. arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
MO	0.2341	0.2023	0.0692	-0.1978	0.0774	-0.1471
P	0.1599	0.3233	0.0983	0.0914	0.2790	-0.0789
K	0.1522	0.3607	0.1397	0.0647	-0.0401	-0.0033
Ca	-0.2500	0.2163	-0.0193	0.0956	-0.0983	0.0149
Mg	-0.2030	0.0147	0.2997	-0.0316	-0.2750	0.2063
Na	-0.2650	0.1778	-0.0380	0.0725	0.0333	0.0496
Fe	0.1497	0.1204	0.3434	0.1053	0.3300	0.0751
Zn	0.1713	0.1574	-0.1760	-0.3212	-0.3104	0.0400
Mn	0.0365	-0.3930	0.0081	0.0728	0.3040	0.2060
Cu	0.0855	-0.1512	-0.2193	-0.3204	-0.0889	-0.6007
B	0.1578	-0.0354	0.3677	0.0343	-0.1132	-0.3794
Al	0.1146	-0.2956	0.0340	0.3680	0.0401	-0.2613
S	-0.1389	-0.0437	0.0763	0.2915	-0.3883	-0.3040
N-NO ₃	-0.0198	-0.1877	0.0653	-0.5564	0.0477	0.0607
pH	-0.2306	0.2160	-0.1423	0.0241	-0.2135	0.0132
CT	-0.2164	0.1984	-0.0720	0.2045	0.0192	-0.2175
Salin	0.1529	0.0879	0.3548	-0.1390	-0.2819	0.0644
Ca/K	-0.2867	0.0403	-0.0268	0.0004	0.1087	-0.1040
Mg/K	-0.2160	-0.1436	0.2782	-0.1158	-0.0555	0.0534
Ca+Mg/K	-0.2879	-0.0120	0.0630	-0.0342	0.0680	-0.0646
Ca/Mg	0.0461	0.2524	-0.3911	-0.0357	-0.0052	0.1728
Cl Ca	-0.2518	0.0818	0.0282	-0.1710	0.2592	-0.2025
CiMg	-0.2119	-0.0286	0.3118	-0.1326	-0.1309	0.1155
CiK	0.1489	0.3316	0.1845	-0.0733	0.1532	-0.1192
CiNa	-0.2605	0.0587	-0.0012	-0.1558	0.2626	-0.1274
CIC	-0.2616	0.0481	0.1101	-0.1584	0.1817	-0.1534

*CP = componente principal.



En la figura 3 se observa que el CP1 proporcionó mayor peso a las variables edáficas químicas Ca+Mg/K, Ca/K, Na, CIC, CiNa y CICA en orden de importancia, se infiere que las parcelas 1, 2, 6 y 7 están relacionadas con las variables antes mencionadas por presentar los resultados mayores obtenidos en laboratorio. El CP2 proporcionó mayor peso a las variables edáficas químicas Mn, K, CiK, P y Al, las cuales están relacionadas con las parcelas 5 y 8 pues presentan resultados mínimos y máximos de concentraciones.

Para el conjunto de variables topográficas estudiadas, se constituyeron tres componentes principales, que se

muestran en la tabla 9. Se seleccionaron las variables pendiente y altitud por ser representativas de los componentes principales (Tabla 10).

En la figura 4 se observa que el CP1 proporcionó mayor peso a las variables topográficas profundidad y pendiente en orden de importancia; se infiere que las parcelas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 están relacionadas con las variables antes mencionadas debido a que presentan valores máximos y mínimos obtenidos en campo. El CP2 proporcionó mayor peso a la variable topográfica altitud, que está relacionada con las parcelas 1 y 2 pues muestran la altitud máxima y mínima respectivamente.

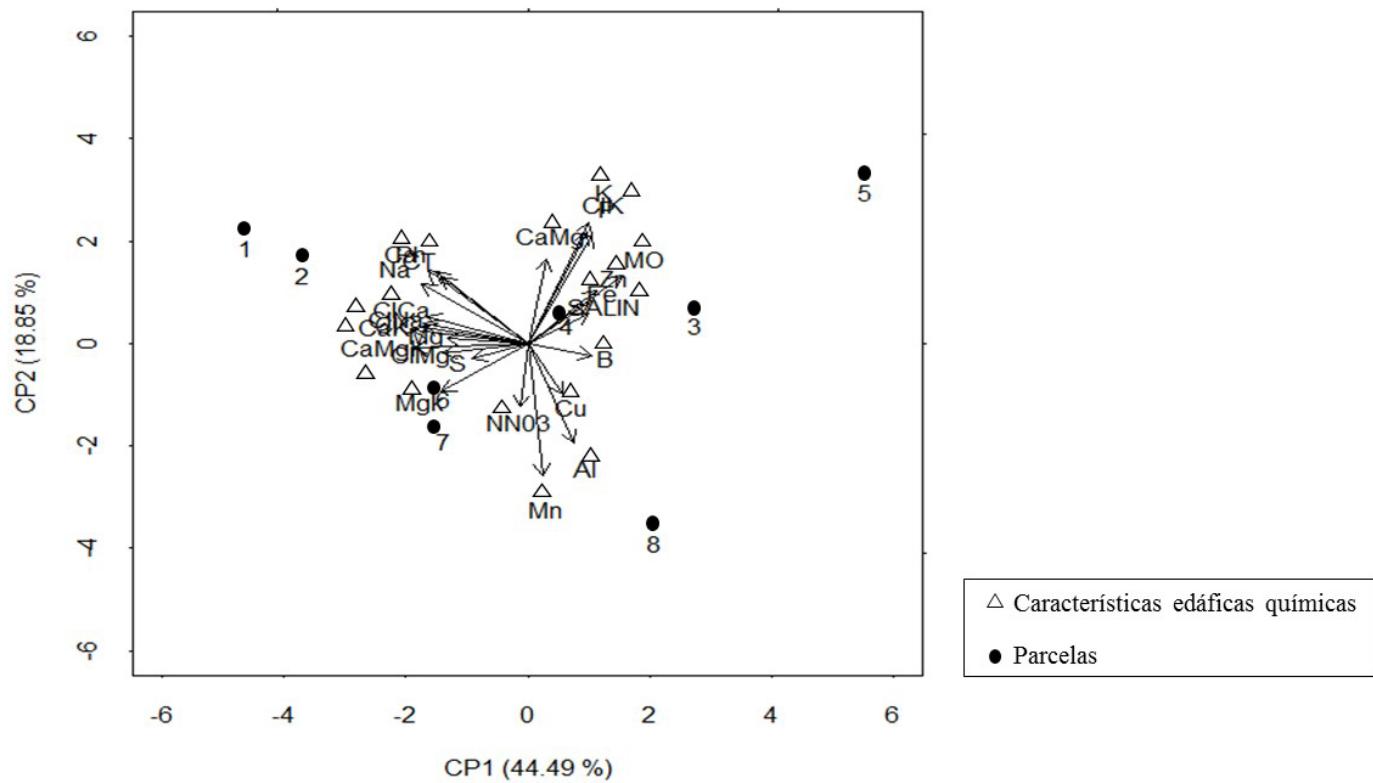


FIGURA 3. Correlación de los componentes principales de las variables edáficas químicas analizadas en la plantación de *G. arborea* establecida en el Estado de México.

TABLA 9. Autovalor, porcentaje de varianza y porcentaje de varianza acumulado asociado del análisis de componentes principales de las variables topográficas analizadas en la plantación de *G. arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

Componente principal	Autovalor	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulado
1	1.2911	55.56	55.56
2	1.0649	37.80	93.36
3	0.4461	6.63	100.00

TABLA 10. Coeficientes seleccionados y los primeros tres componentes principales del ACP de las variables topográficas de la plantación de *G. arborea* en Tlatlaya, Estado de México.

Variables	CP1	CP2	CP3
Altit.	0.0181	0.9252	-0.3789
Pend.	0.7101	0.2549	0.6562
Prof.	-0.7038	0.2809	0.6524

Altit. = altitud (msnm), Pend. = pendiente ($^{\circ}$), Prof. = profundidad (cm), CP = componente principal.

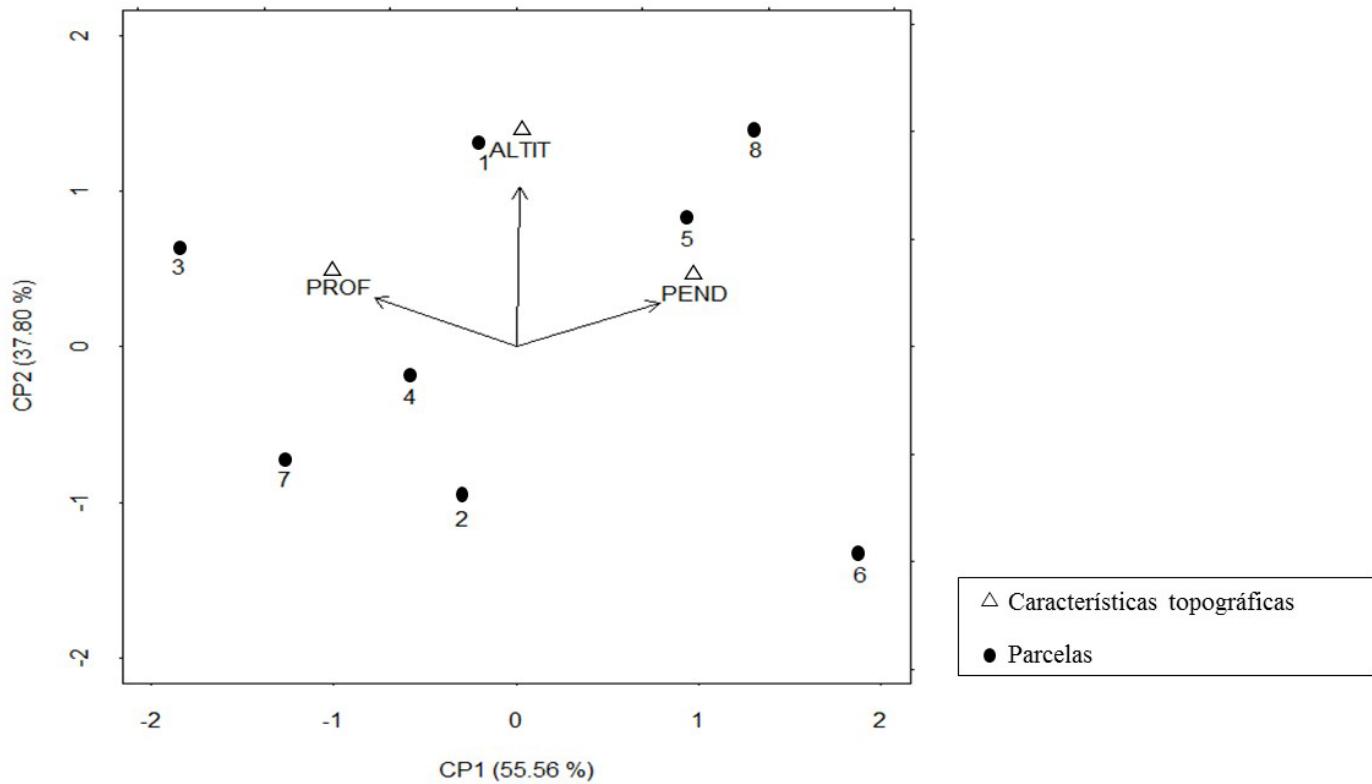


FIGURA 4. Correlación de los componentes principales 1 y 2 de las variables topográficas analizadas en la plantación de *G. arborea* establecida en el Estado de México.



Análisis de regresión lineal múltiple

Realizado el ACP sobre los tres conjuntos de características estudiadas, se seleccionaron 11 variables: CC, DA, CH, Ca + Mg / K, Mn, Ca / Mg, N - NO₃, S, Cu, altitud y pendiente. La prueba de *Shapiro-Wilk* indicó que las variables presentaban normalidad a un nivel de confianza del 95%, a excepción de la variable S la cual presentó *p*-valor = 0.004.

En la tabla 11 se expone la matriz de correlaciones para las 10 variables independientes que fueron seleccionadas con base en el ACP y la variable volumen fustal, estas correlaciones muestran algunas similitudes positivas y significativas. Algunas expresan semejanza, aunque no significativa pero apreciable entre la CC y el volumen fustal.

Las variables introducidas como predictores en el análisis de regresión lineal múltiple se ordenaron de forma jerárquica, es decir de mayor a menor por su valor absoluto obtenido en la correlación. El resultado del análisis de regresión múltiple presentó un valor de R²ajustado = 0.71, lo que significa que este modelo es capaz de explicar 71.6% de la variabilidad observada en el volumen fustal de *G. arborea*, la prueba de *F* muestra una significancia de P ≤ 0.0466. Para este tipo de regresión múltiple se satisfacen todas las condiciones; por ello, se considera apropiado para estimar con mayor precisión el volumen fustal en función de las variables CH, N-NO₃ y la relación Ca/Mg (Tabla 12).

TABLA 11. Coeficientes de correlación entre volumen y las 10 variables independientes seleccionadas del ACP mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

	*V	CC	DA	CH	Ca+Mg/K	Mn	Ca/Mg	N-NO ₃	Cu	Altit	Pend
V	1.00 **										
CC	0.68 ns	1.00 **									
DA	-0.54 ns	-0.10 ns	1.00 **								
CH	-0.64 ns	-0.99 **	0.01 ns	1.00 **							
Ca+Mg/K	0.62 ns	0.42 ns	-0.55 ns	-0.42 ns	1.00 **						
Mn	-0.18 ns	0.36 ns	-0.12 ns	-0.30 ns	-0.09 ns	1.00 **					
Ca/Mg	-0.50 ns	-0.94 **	-0.02 ns	0.96 **	-0.28 ns	-0.43 ns	1.00 **				
N-NO ₃	0.60 ns	0.34 ns	-0.66 ns	-0.23 ns	0.14 ns	0.30 ns	-0.27 ns	1.00 **			
Cu	-0.11 Ns	-0.22 ns	0.07 ns	0.26 ns	-0.28 ns	0.09 ns	0.12 ns	0.47 ns	1.00 **		
Altit	-0.53 ns	-0.25 ns	0.80 *	0.22 ns	-0.33 ns	-0.05 ns	0.26 ns	-0.52 ns	0.28 ns	1.00 **	
Pend	-0.28 ns	0.31 ns	0.63 ns	-0.37 ns	-0.36 ns	0.17 ns	-0.39 ns	-0.59 ns	-0.48 ns	0.24 ns	1.00 ns

Se marca en negritas las variables con los mayores valores de correlación.

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

Coeficientes	Valor estimado	Error Estándar	t value	Pr>t	R ² ajustado
Intercepto	0.019070	0.006847	2.785	0.0496	
CH	-0.006113	0.002062	-2.965	0.0414	
NN03	0.002902	0.001083	2.679	0.0463	
CaMg	0.006101	0.002647	2.305	0.0452	0.716

R²_{adj} = coeficiente de determinación ajustado.

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
$V = 0.019070 + -0.006113 * CH + 0.002902 * NN03 + 0.006101 * CaMg$	0.96503	0.8564	1.5684	3.3615	0.3392

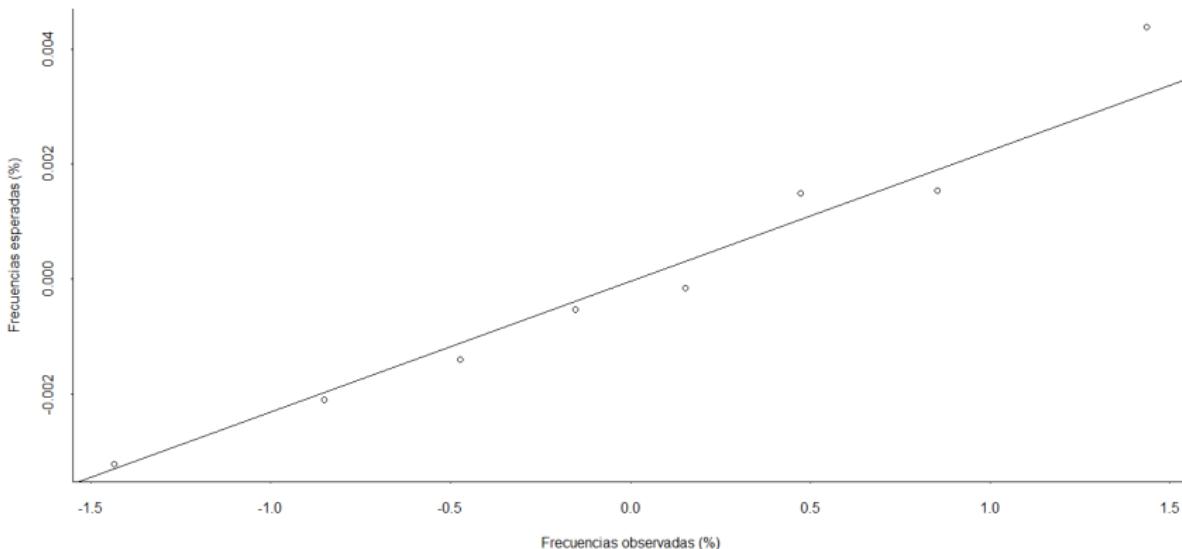


FIGURA 5. Porcentajes acumulados de los residuales frente a la distribución normal para el modelo ajustado para la plantación de *G. arborea* establecida en el Estado de México.

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 (Fig. 5). Respecto a la probabilidad de la distribución normal, los porcentajes tienden a formar una campana de *Gauss*. La dispersión de los residuos, respecto a los valores estimados

de volumen del modelo (Fig. 6) 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 13).

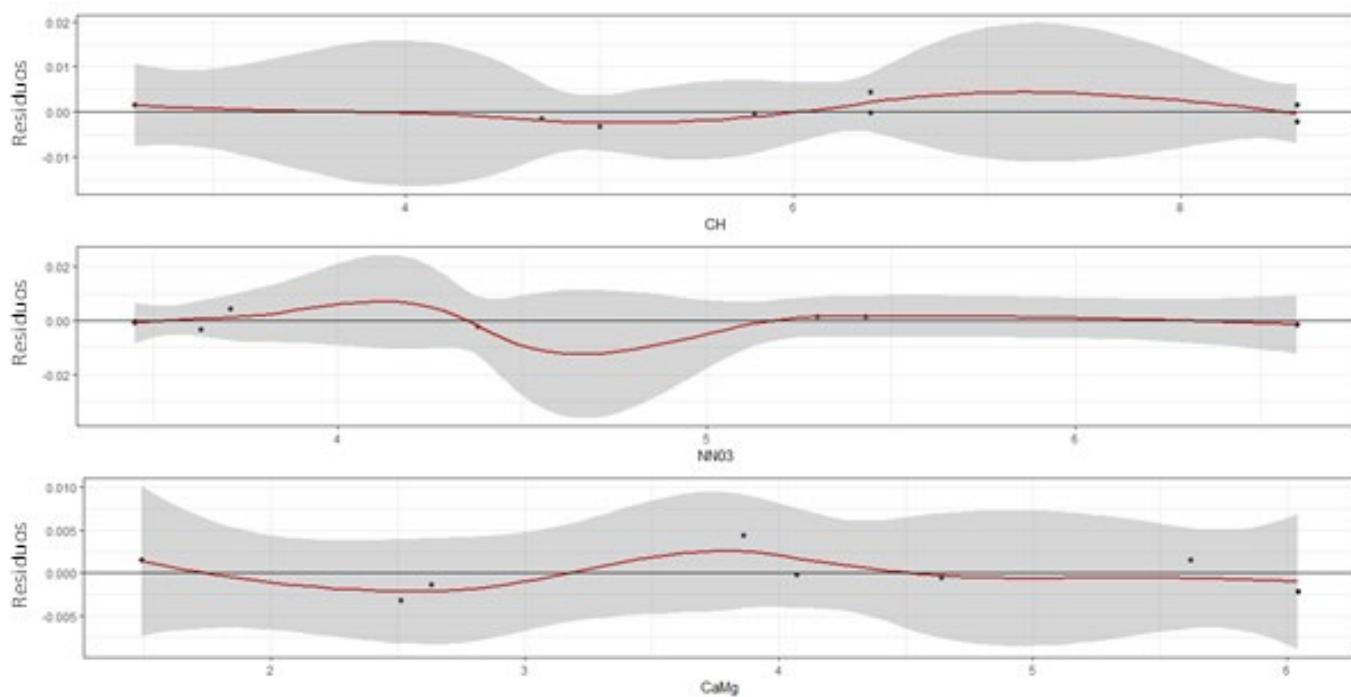


FIGURA 6. Distribución de residuos del modelo ajustado de volumen fustal de la plantación de *G. arborea* establecida en el Estado de México.

Del proceso de selección dentro del análisis de regresión lineal múltiple, el mejor modelo resultante para la estimación del volumen fustal queda definido como:

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

Donde:

V = Volumen fustal (m^3)

CH = Conductividad Hidráulica ($cm h^{-1}$)

$NN03$ = Nitratos de Nitrógeno (ppm)

$CaMg$ = Relación Calcio/Magnesio (meq/100 g)

DISCUSIÓN

Características edáficas físicas

Autores como Alfaro, de Camino y Varmola (2002) y Martínez (2015) mencionan que altos porcentajes de arcilla se constituyen como uno de los principales limitantes en el

desarrollo de *G. arborea*, mientras que, Rojas y Murillo (2004) recomiendan establecer plantaciones sobre suelos con texturas francas, franca arcillosa y bien aireadas. Los suelos de las parcelas de estudio donde se desarrolla *G. arborea* presentaron diferente textura (francosa, franco-arcillosa y franco arcillo-arenosa); esta característica tiene importancia en el crecimiento forestal, determina en gran medida la capacidad de retención de agua y nutrientes, así como la aireación del suelo (Martínez *et al.*, 2008).

La densidad aparente por su parte suele variar entre 0.2 $g cm^{-3}$ en las capas orgánicas y 1.92 $g cm^{-3}$ en arenas gruesas (Binkley y Fisher, 1999); de esta manera la porosidad media de los suelos forestales varía entre 35% y 65% (Pritchett, 1986); por lo tanto, se trata de suelos compactos o poco porosos, lo cual puede provocar anegamientos, en consecuencia el crecimiento de *G. arborea* se reduce cuando los suelos están compactados ($DA > 0.9 g m^{-3}$) (Martínez, 2015). Si las condiciones del suelo son adversas, sus individuos crecen de manera defectuosa: fustes torcidos,

poca altura, muy ramificados y aspecto arbustivo (Ruiz-Blandon *et al.*, 2020); lo anterior concuerda con los valores que aquí se determinaron para la DA que presentó un valor promedio de 1.26 g cm⁻³.

La conductividad hidráulica se encuentra en el intervalo observado por Mariño-Macana y Rodríguez-Melo (2010), en una plantación clonal de *G. arborea* establecida en Zambrano, Colombia a una altitud de 20 m s.n.m., dichos autores obtuvieron una categoría de 0.05 cm h⁻¹ a 6.10 cm h⁻¹. La capacidad de campo es una medida útil para calcular dosis de riego de los cultivos y da una idea real de las características hídricas del suelo (Garrido, 1971), se trata de suelos con CC de nivel medio bajo (12% - 20%).

Características edáficas químicas

Adekunle, Alo y Adekayode (2011) evaluaron suelos que van de neutros a alcalinos (pH entre 6.47 y 7.47) en plantaciones de *G. arborea* en Nigeria; Adeboye *et al.* (2011) obtuvieron un valor de pH de 6.9 en profundidades de 5 cm - 10 cm en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Nigeria, el resultado es superior a lo obtenido en la plantación de estudio. Kumar *et al.* (2011) obtuvo un valor de pH de 6.67 a una profundidad de 20 cm a 30 cm en el bosque seco tropical en India donde crece de forma natural *G. arborea*; Barrios *et al.* (2011) obtuvieron resultados de pH de 6.9 que es moderadamente alcalino en una plantación de *G. arborea* de 4 años de edad establecida en Tolima, Colombia a 317 m s.n.m., sobre suelos de origen aluvial de textura franco arenosos a profundidades de 0 cm - 30 cm y con una pendiente de 7°.

Se ha registrado que el intervalo de pH del suelo en el cual se ven favorecidos el crecimiento en diámetro normal, la altura total y el volumen total es entre 5 y 6.4 (Vásquez y Ugalde, 1996; Vallejos, 1996; Rojas y Murillo, 2004); por su parte, Martínez (2015) demuestra que altos crecimientos se procuran en suelos con pH arriba de 6.0, *G. arborea* crece vigorosamente en suelos con capas superficiales alcalinas o ligeramente ácidas, donde encuentran una amplia gama de nutrientes disponibles, no obstante, fracasará en suelos ácidos muy lixiviados donde puede prosperar el género *Pinus*.

La salinidad obtenida en las parcelas de estudio es inferior a lo observado por Salcedo-Pérez *et al.* (2014) sobre una plantación de *T. grandis* establecida en Nayarit de dos años de edad sobre suelos de textura arenosa con pH que oscila de 5.3 a 6.1. Estos autores obtuvieron valores que fluctúan entre 0.51 dS m⁻¹ y 0.59 dS m⁻¹, lo cual indica que es una variable edáfica de suma importancia que se relaciona con la absorción de nutrientes y agua; por su parte, Garrido (1971) muestra que los cultivos presentan un buen desarrollo en suelos con valores de CE < 500 dS m⁻¹.

El resultado de MO es afín a lo hallado por Adekunle *et al.* (2011), quienes determinaron un contenido de MO de 2.65% en una plantación de *G. arborea* de 14 años de edad en Nigeria e inferior a lo obtenido por Ruiz-Blandon *et al.* (2020) en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Nayarit, estos últimos autores registraron un contenido de MO de 3.2% en suelos con textura franco-arcillosa; Garrido (1971) recomienda elevar el contenido de MO a 3% cuando la productividad es baja o existe riesgo de erosión.

El resultado de P de las parcelas de estudio difiere con Salcedo-Pérez *et al.* (2014), quienes obtuvieron valores de 18 ppm a 42 ppm en profundidades de 40 cm en plantaciones de *T. grandis* de dos años de edad establecidas en Nayarit. Se alude que este elemento repercute en el crecimiento de los árboles específicamente sobre el desarrollo de las raíces (Garrido, 1971). Espinoza, Slaton y Mozaffari (2012) exponen que concentraciones menores de 16 ppm de P en suelos, el potencial de crecimiento es de 65%.

El resultado de K de las parcelas de estudio se encuentra dentro del intervalo 91 ppm - 130 ppm, de acuerdo con Espinoza *et al.* (2012), esas concentraciones de K en el suelo el potencial de crecimiento es de 85% a 95%. Con respecto al Ca, concentraciones ≤ 400 ppm en el suelo corresponden a un nivel bajo, por esta razón, el potencial de crecimiento es de 65% a 85% (Espinoza *et al.*, 2012); Espinoza *et al.* (2012) determinaron que concentraciones ≤ 30 ppm de Mg en el suelo representan a un nivel bajo, el potencial de crecimiento es de 65% a 85%. Con relación al elemento Fe, el resultado obtenido en las parcelas de



estudio es alto, al aumentar la acidez del suelo, se incrementa la actividad del Fe, que puede resultar tóxico.

Concentraciones \leq 1.6 ppm de Zn en el suelo son de nivel bajo, así pues, el potencial de crecimiento es $<$ 65% (Espinoza *et al.*, 2012). Respecto al elemento Cu, Barrios *et al.* (2011) observaron 0.20 ppm de este elemento; Espinoza *et al.* (2012) refieren que concentraciones \leq 1.0 ppm de Cu en el suelo es de nivel bajo, por ende el potencial de crecimiento es de 65% a 85%.

Barrios *et al.* (2011) obtuvieron un contenido de Mn de 14.00 ppm; Espinoza *et al.* (2012) expresan que concentraciones \leq 40 ppm de Mn en el suelo es de nivel bajo, de manera que el potencial de crecimiento es de 65% a 85%. Con respecto al B, Barrios *et al.* (2011) mencionan un promedio de 1.0 ppm. El N aprovechable por las plantas es en forma de N-NO₃ depende de la cantidad de nitrógeno amoniacal presente, ya sea que provenga de MO o de sales inorgánicas de amonio (Garrido, 1971).

La CIC definida como la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales, aumenta proporcionalmente a la cantidad de MO, la cual es la base en la fertilidad del suelo (Fernández y Rojas, 2006), de acuerdo con Garrido (1971) se trata de suelos con nivel bajo (10 meq/100 g - 20 meq/100 g) que requieren aporte de MO.

En relación con los cationes intercambiables de Ca, Adeboye *et al.* (2011) obtuvieron un valor de 2.80 meq/100g a profundidades de 5 cm - 10 cm en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Nigeria. Por su parte Barrios *et al.* (2011) determinaron un valor de 11 meq/100g; Rojas y Murillo (2004) recomiendan que los contenidos de Ca deben ser mayores de 10 meq/100g, el intervalo del contenido de Ca en el que *G. arborea* crece normalmente oscila entre 6.0 y 22.3 meq/100g (Vallejos, 1996), a medida que se pierde el calcio intercambiable del suelo por agotamiento aumenta gradualmente la acidez.

El resultado de Mg es superior a lo obtenido por Adeboye *et al.* (2011) en profundidades de 5 cm - 10 cm en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Nigeria (2.40 meq/100 g) y a lo observado por Barrios *et al.* (2011) (0.80 meq/100 g); Rojas y Murillo (2004) recomiendan que los

contenidos de Mg deben ser mayores de 6 meq/100g. *G. arborea* crece normalmente cuando el contenido de Mg es de entre 1.6 meq/100 g y 6.7 meq/100 g (Vallejos, 1996), conforme se pierde el magnesio intercambiable del suelo por agotamiento aumenta gradualmente la acidez.

El resultado de K es mayor con respecto a lo observado por Barrios *et al.* (2011), quienes determinaron un valor de 0.11 meq/100g, y menor con respecto a lo obtenido por Adeboye *et al.* (2011), quienes hallaron un valor de 1.96 meq/100g en profundidades de 5 cm - 10 cm. Esta especie crece normalmente en sitios donde el contenido de K oscila entre 0.5 y 0.7 meq/100g de acuerdo con Vallejos (1996).

Con respecto a la relación Ca/K debe variar entre 15 me/100 g y 30 me/100 g (Gómez, 2005), por lo anterior, se deriva que existe deficiencia de K debido a que el resultado es $>$ 30. En la relación Mg/K, el valor ideal es de entre 10 me/100 g y 15 me 100g (Gómez, 2005), en el presente estudio el resultado se encuentra en un intervalo aceptable, además es similar a lo obtenido por Adekunle *et al.* (2011) quienes determinaron un valor de 12.32 me 100 g en una plantación de *G. arborea* de 10 años de edad establecida en Nigeria.

Sobre la relación Ca+Mg/K, el valor ideal es de 20 me 100 g y 40 me 100 g (Gómez, 2005), se infiere que existe deficiencia de K debido a que el resultado es $>$ 40. En la relación Ca/Mg, el valor ideal es de entre 3 me 100g y 6 me 100g (Gómez, 2005); en las parcelas de estudio, ésta relación se encuentra en el intervalo ideal.

Características topográficas

Respecto a la distribución altitudinal *G. arborea* exhibe mayor crecimiento entre 0 m y 900 m s.n.m., como lo señalaron Rojas y Murillo (2004); de acuerdo con estos autores, las parcelas de este estudio se encuentran en este intervalo adecuado de altitud, aunque no muestran mejores crecimientos como lo señala Martínez (2015), quien indica que los mejores crecimientos se producen debajo de los 300 m s.n.m. Con respecto a la pendiente, Rojas y Murillo (2004) y Martínez (2015) indican que *G. arborea* demuestra

un buen crecimiento en sitios no superiores a 16 °, además señalan que las plantaciones de *G. arborea* no prosperan en suelos erosionados o compactados. En esas condiciones biofísicas los árboles pueden mostrar características como fustes inclinados, poca altura, ser ramificados y tener 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, Rojas y Murillo (2004) y Martínez (2015) sugieren 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.

Ávila et al. (2015) establecieron una clasificación de sitios (I, II, III, IV) para plantaciones clonales de *G. arborea* establecidas en Costa Rica con base en parámetros edafoclimáticos de la zona Pacífico Sur. Considerando esa clasificación, las características edáficas y topográficas de este estudio, la ubican en las clases III y IV, pues la topografía es ondulada, la pendiente de 40%, la precipitación es menor a 2000 mm año⁻¹, la textura es franca arcillo arenosa, la capacidad de intercambio catiónico se encuentra en el intervalo 11% - 25%; únicamente el pH (6.5) ubica al sitio en la clase I.

VARIABLES DASOMÉTRICAS

Ávila et al. (2015) estudiaron la interacción genotipo-sitio de dos plantaciones clonales de *G. arborea* de dos años de edad, en el Pacífico Sur de Costa Rica en suelos de tipo inceptisoles, con una pendiente de 1°, altitud de 26 m; el diámetro normal promedio de la procedencia zona sur fue de 15.87 cm y 17.08 cm y la procedencia zona norte mostró un diámetro normal de 17.20 cm y 16.10 cm; estos resultados son superiores a los obtenidos en la plantación en estudio e indican que la productividad del sitio es el resultado de complejas interacciones que ocurren entre distintos factores, dentro de los que destacan los edafoclimáticos, prácticas silviculturales y la genética del árbol.

El coeficiente de variación del diámetro normal fue de 4% en la plantación de estudio que, de acuerdo con Murillo, Hernández y Murillo (1996), indica una plantación homogénea, pues tiene un coeficiente de variación menor a 10%. Este resultado refleja que se han realizado podas oportunas conforme crecen los árboles.

ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Adekunle et al. (2011) determinaron correlaciones significativas negativas entre el contenido de K, la relación Mg / K y, en menor grado, el contenido de Ca con el volumen fustal en plantaciones de diferentes edades en Nigeria. Se deduce que la variación de volumen fustal está fuertemente asociada a algunas características físicas y químicas del suelo donde se encuentra establecida *G. arborea*. Esto concuerda con lo observado por Kumar et al. (2011), quienes determinaron que las diferencias de estructura y composición del bosque seco tropical donde crece *G. arborea* de forma natural están correlacionadas significativamente con la variación de las propiedades del suelo; estos mismos autores indican que las propiedades del suelo tienen una influencia sustancial en la composición del bosque subtropical.

Los resultados de CH obtenidos concuerdan con los de Mariño-Macana y Rodríguez-Melo, (2010) quienes generaron un modelo para establecer el PMP en plantaciones de *G. arborea* establecidas en Colombia a una altitud de 20 m s n m, estos autores utilizaron ocho propiedades fisicoquímicas como variables predictoras entre las que destacan DA y DR.

CONCLUSIONES

La variación de las características físicas y químicas del suelo y las topográficas intervienen en el crecimiento del volumen fustal de la plantación de *G. arborea*, por lo tanto, es válido estudiar los factores ambientales que se asocian a este comportamiento. Las características edáficas conductividad hidráulica, nitratos y la relación de cationes intercambiables Ca/Mg fueron las variables más preponderantes en la



definición del modelo para estimar el volumen fustal de *G. arborea*. En este estudio no se incluyeron aspectos climáticos que, asociados con las características edáficas, explican en mayor proporción la variación del crecimiento de volumen fustal de *G. arborea*.

REFERENCIAS

- Adeboye, M. K. A., Bala, A., Osunde, A. O., Uzoma, A. O., Odofin, A. J., & Lawal, B. A. (2011). Assessment of soil quality using soil organic carbon and total nitrogen and microbial properties in tropical agroecosystems. *Agricultural Sciences*, 02(01), 34–40. doi: 10.4236/as.2011.21006
- 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: 10.1016/j.jssas.2011.05.001
- Alfaro, M., Camino, R. De, & Varmola, M. (2002). Melina (*Gmelina arborea*) in central America. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016039440>
- Álvarez, J. G., Barrio, M., Diéguez, U., & Rojo, A. (2003). Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 309(1), 303–309. doi: 10.31167/csef.v0i18.9475
- Ávila, C. A., Murillo, R. C., Murillo, O. G., & Sandoval, C. S. (2015). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kuri*, 12(29), 2–14. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2238/8035>
- Barrios, A., López, A. M., Nieto, V., Burgos, N., Yaya, M., & González, I. (2011). Efecto del control de malezas y fertilización sobre el crecimiento inicial de *Gmelina arborea* Roxb. en el Departamento del Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 14(1), 31–40. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3548/5145>
- Binkley, D., & Fisher, R. F. (1999). Ecology and Management of Forest Soils. Wiley. doi: 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. Valladolid, España. 31 pp. Recuperado de http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/TFM_Teresa_de_los_Bueis.pdf
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2014). Principales especies maderables en PFC por entidad federativa en el periodo 2000-2014. Coordinacion General de Producción y Productividad. Gerencia de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/43/6019Principales%20especies%20maderables%20establecidas%20en%20PFC%20por%20Entidad%20Federativa%20en%202000%20-%202014.pdf>
- Espinoza, L., Slaton, N., & Mozaffari, M. (2012). Como interpretar los resultados de los análisis de suelos. Agricultura y Recursos Naturales. Cooperative Extension Service, Universidad de Arkansas, US Department of Agriculture, and county governments cooperating. Recuperado de <https://www.uaex.edu/publications/PDF/FSA-2118SP.pdf>
- Fernández, L. C. L., & Rojas, G. A. (2006). Análisis físicos y químicos en suelo. En L. C. Fernández, N. G. Rojas., T. G. Roldán., M. E. Ramírez., H. G. Zegarra., R. U. Hernández., R. J. Reyes., D. Flores & J. M. Arce (Eds.), *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados* (pp. 19–80). México D. F.: Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janum/Documentos/Ciga/Libros2011/CG008215.pdf>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372>
- Garrido, M. S. V. (1971). Interpretación de análisis de suelos. *Investigaciones Geográficas*. Madrid. España: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Recuperado de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf
- 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%25A1Da+T%25C3%25A9cnica+para+el+manejo+nutricional+de+los+cultivos%25A1+Diagn%25C3%25B3stico%252C+interpretaci%25C3%25B3n+y+recomendaci%25C3%25B3n+de+planes+de+ferti
- González, G. T., & Serrano, J. R. M. (2004). Propiedades y utilizaciones 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>
- González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R., & Ávila-Arias, C. (2016). Crecimiento inicial de *Gmelina arborea* Roxb. aplicando diferentes tratamientos de fertilización en el Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(33), 29. doi: 10.18845/rfmk.v13i33.2575
- Guisande, C., Vaamonde, A., & Barreiro, A. (2013). Tratamiento de datos con R, Estadística y SPSS. 2ª Edición electrónica. Ediciones Díaz de Santos, 1-977. Madrid, España. Recuperado de <https://www.editdiazdesantos.com/libros/guisande-tratamiento-de-datos-con-r-statistica-y-spss-L03009981001.html>
- 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.
- Isebrands, J. G., & Crow, T. R. (1975). Introduction to uses and interpretation of principal component analyses in forest biology. General Technical Report NC-17. St. Paul, MN: US Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 17. Recuperado de https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nc017.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. Recuperado de <https://www.afrjournal.org/index.php/afr/article/view/99>
- Mariño-Macana, Y. A., & Rodríguez-Melo, M. A. (2010). El punto de marchitez permanente (PMP) en melina (*Gmelina arborea* L. Roxb) para la Costa Caribe colombiana ¿una característica para la selección de clones?. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 116–121. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=4499/449945029002>
- Martínez, H. A. (2015). Melina (*Gmelina arborea* Roxb.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono.” Moravia, Costa Rica: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal Forest Monitoring System for REDD+ Costa Rica. Recuperado de <https://docplayer.es/74588165-Fondo-nacional-de-financiamiento-forestal-forest-monitoring-system-for-redd-costa-rica.html>
- 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. Caicedo, C. R. Salamanca, C. A. Jaramillo, E. F. Almansa, y D. M. Peña. (Eds.), XIV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo (p. 108). Villavicencio, Meta. Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- 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 Kurú*, 7, 18–19. Recuperado de <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/383>
- Murillo, L. F., Hernández, 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.
- 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>
- Protectora de Bosques del Estado de México [Probosque] (2019). Superficie plantada de *Gmelina arborea* (Roxb.) en el Estado de México. Metepec, Estado de México: Probosque. Recuperado de http://probosque.edomex.gob.mx/plantaciones_forestales
- 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>
- Rodríguez, A., L. G. & Castañeda, G. A. M. (2014). Carbon capture in three forest species in Meta Department. *Revista Científica Guerracucho*, 18(29), 10. Recuperado de http://revistas.unimeta.edu.co/index.php/rc_es_guerracucho/article/view/67/277
- Rojas, F. R., & Murillo, O. G. (2004). Botánica y ecología. En F. Rojas, D. Arias, R. Moya, A. Meza, O. Murillo, & M. Arguedas (Eds.), *Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica* (p. 314). Cártago, Costa Rica: Fonafifo. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Especies_plantaciones/MELINA/Manual_para_los_productores_de_melina.pdf%5Cnhttp://www.sirefor.go.cr
- Rubio, M. J. H., & Berlanga, V. S. (2012). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. Caso práctico. *Revista d'Innovació i Recerca En Educació*, 5(2), 83–100. doi: 10.1344/reire2012.5.2527
- Ruiz-Blandón, B. A., Hernández-Álvarez, E., Rodríguez-Macias, R., & Salcedo-Pérez, E. (2020). Valoración dasométrica y producción de biomasa en *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. establecida en



plantaciones puras y mixtas. Revista mexicana de ciencias forestales, 11(59), 94-117.

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: 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: 10.29298/rmcf.v5i24.321

Santana, J. S., & Farfán, E. M. (2014). El arte de programar en R: un lenguaje para la estadística. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, UNESCO, Comité Nacional Mexicano del Programa Hidrológico Internacional. 197 p. Recuperado de https://cran.r-project.org/doc/contrib/Santana_El_artde_programar_en_R.pdf

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat]. (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

Thiers, O., & Gerding, V. (2007). Variabilidad topográfica y edáfica en bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en el suroeste de Tierra del Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80(2), 201–211. doi:10.4067/S0716-078X2007000200006

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. 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&expresion=mfn=062684>

Vásquez, 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). Recuperado de http://repositorio.bibliotecaortón.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3819/Reendimiento_y_calidad_de_sitio_informe_final.pdf?sequence=1&isAllowed=true

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: 10.1007/s11056-011-9288-2

Manuscrito recibido el 19 de junio de 2019

Aceptado el 20 de marzo de 2020

Publicado el 19 de marzo de 2021

Este documento se debe citar como:

Telles A, R., Alanís R., E., Jiménez P., J., Aguirre C., O. A, & y García G., D. A. (2021). Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de *Gmelina arborea* Roxb, en Tlatlaya Estado de México. *Madera y Bosques*, 27(1), e2711987. doi: 10.21829/myb.2021.2711987



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.