








Relación entre variables edáficas y la calidad de sitio en plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham en Oaxaca, México

Relationship between soil variables and the plantation site quality in *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham plantations in Oaxaca, Mexico

Juan Ángel García-Aguilar¹  • Gerardo Rodríguez-Ortiz¹  • Vicente Arturo Velasco-Velasco¹ 
 • José Raymundo Enríquez-del Valle¹  • Judith Martínez-de la Cruz¹  • Marcos Emilio Rodríguez-Vásquez¹ 
 • Rufino Sandoval-García¹ 

Recibido: 26/9/2025

Aceptado: 16/1/2026

Abstract

The site index (SI) is associated with soil properties and the potential for tree growth. Therefore, research was conducted to determine the physical and chemical soil variables most closely related to SI in a *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. plantation in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. Through systematic sampling, 30 circular sites measuring 400 m² were distributed to compile a forest inventory. In addition, a soil profile was created in the center of each site to collect 60 composite samples at two depths, as well as to measure horizon characteristics. The physical and chemical characteristics of the samples were determined. The sites were classified according to the mathematical expression recommended for the study area. Normality and homogeneity of variance tests were applied to the data. Analyses of variance, correlations, and principal component analysis (PCA) were performed, and finally, the soil variables that were statistically significant were integrated into a multiple regression model. The soil variables that demonstrated the highest adjusted coefficient of determination were as follows: organic horizon thickness ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.77$), A horizon thickness ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.46$), and organic matter content ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.30$). Collectively, these variables explained 78 % of the functional relationship with SI. The soil variables identified in this study can be used by forest managers to select suitable sites for establishing *Pinus patula* plantations and ensuring high-quality timber yields.

Keywords: Soil, site index, regression, pine.

1. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca; Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México; gaja_9010@hotmail.com, gerardo.ro@voaxaca.tecnm.mx, vicente.vv@voaxaca.tecnm.mx, jose.ev@voaxaca.tecnm.mx, judith.mc@voaxaca.tecnm.mx, marcos.rv@voaxaca.tecnm.mx, rufino.sandoval.garcia@gmail.com

Resumen

El índice de sitio (IS) está relacionado con las propiedades del suelo y el potencial de crecimiento de los árboles. Por lo tanto, se realizó la investigación con el objetivo de determinar las variables físicas y químicas del suelo con mayor relación con el IS en una plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en la Sierra Norte de Oaxaca, México. Mediante muestreo sistemático se distribuyeron 30 sitios circulares de 400 m² para levantar un inventario forestal, en el centro de cada sitio se realizó un perfil de suelo para recolectar 60 muestras compuestas a dos profundidades, además de medir características de los horizontes; a las muestras se les determinó características físicas y químicas. Los sitios fueron clasificados de acuerdo con la expresión matemática recomendada para la zona de estudio. A los datos se les aplicó pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas. Se realizaron análisis de varianza, correlaciones, análisis de componentes principales (ACP), y por último se integraron las variables edáficas que fueron estadísticamente significativas en modelo de regresión múltiple. Las variables edáficas que mostraron mayor coeficiente de determinación ajustado fueron: espesor del horizonte orgánico ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,77$), espesor del horizonte A ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,46$), contenido de materia orgánica ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,30$) y en conjunto explicaron 78 % de la relación funcional con el IS. Las variables edáficas identificadas en este estudio pueden ser utilizadas por los administradores forestales para seleccionar sitios apropiados para el establecimiento de plantaciones de *Pinus patula* y que garantice rendimientos maderables de calidad.

Palabras clave: Suelo, índice de sitio, regresión, pino.

Introducción

Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham. es una especie endémica de mayor importancia forestal en México, utilizada ampliamente en plantaciones comerciales por su rápido crecimiento y calidad de madera [1]. Se distribuye naturalmente en los estados de Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Veracruz y Oaxaca en altitudes de 1 500 a 3 100 m [2]. En plantaciones de la Sierra Sur del estado de Oaxaca [3] reportaron que el incremento medio anual en volumen de esta especie es de alrededor de 16 m³ ha⁻¹ año⁻¹. En tanto, [4] estimaron que, para la localidad de Ixtlán de Juárez, *P. patula* alcanza alturas de 24 a 33 m a una edad base de 40 años, lo que refleja su potencial productivo y económico.

El crecimiento de los árboles es afectado por factores genéticos y de edad del árbol [5]; climáticos, como la temperatura y precipitación [6]; fisiográficos, como la exposición, pendiente y altitud del sitio [7], condiciones

variables de fertilidad y propiedades del suelo [8]; y de manejo, con los tratamientos silvícolas que aplica el administrador forestal [9]. Diversas investigaciones han evaluado el crecimiento de los árboles y refieren que el potencial de crecimiento de los árboles está en función de la calidad de estación [10], [11]. Aunque en estos estudios no se han considerado explícitamente las variables de suelo. Sin embargo, el suelo cumple funciones esenciales: proporciona anclaje a las raíces y es la fuente de agua y nutrimentos minerales indispensables para los procesos metabólicos de los árboles [8].

Estudios previos han demostrado la relación de las variables edáficas con el crecimiento forestal. Por ejemplo, [12] evaluaron la relación entre los nutrientes del suelo y el crecimiento de especies arbóreas tropicales en Colombia, y reportaron que el mayor crecimiento diamétrico de las especies evaluadas se correlacionó positivamente con variables edáficas como el contenido de materia orgánica, nitrógeno (N) total y arena; en contraste con menores crecimientos diamétricos se relacionaron de manera negativa con valores menores de fósforo (P), limo y arcilla. De manera similar, [13] encontraron que el mayor crecimiento de *Pinus greggii* Engelm, en Hidalgo, México se relacionó con sitios de mayor contenido de materia orgánica (20 %), densidad aparente de 0,88 g cm⁻³, 11,6 % de C y 0,16 % de N. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de que el administrador forestal cuente con herramientas técnicas que le permitan seleccionar sitios adecuados para establecer plantaciones, garantizando que las especies expresen su máximo potencial y se traduzcan en rendimientos maderables de calidad [14], [15].

En relación con lo anterior [16] recomiendan hacer uso del análisis de componentes principales (ACP) y de modelos multivariados para identificar las variables de suelo que están correlacionadas con el IS, e integrarlas en modelos de regresión lineal múltiple [17]. Dichos modelos deben ser simples, basados en variables accesibles y fáciles de medir en campo, con elevada capacidad de síntesis y abstracción de la realidad [18]. En este sentido el objetivo de este estudio fue determinar las variables físicas y químicas del suelo con mayor relación con el IS en una plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en la Sierra Norte de Oaxaca, México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en una plantación de *P. patula* que tiene una superficie de 4,1 ha, establecida en 1995, se ubica en áreas bajo manejo forestal a 12 km al noreste de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, a 17° 22' 38,69" N

y 96° 28' 44,8" O, con 2 550 m de altitud. Presenta clima (Cw_2), templado subhúmedo, la precipitación varía de 900 a 1100 mm al año con temperatura promedio anual de 20 °C [19]. Los sitios tienen densidades arbóreas entre 400 y 1 100 árboles ha^{-1} (Figura 1).

Inventario de sitios y clasificación de la calidad de sitio

En el área de la plantación, se distribuyeron de forma sistemática $n = 30$ sitios circulares de 400 m^2 , por lo que la intensidad de muestreo fue de 29 %, con la fórmula $n = N * i$, donde N fue el tamaño de la población, i representa la intensidad del muestreo [20]. A los árboles se les midió las siguientes variables: diámetro normal (DN, cm) con cinta diamétrica (Forestry Suppliers® 283D); altura total (m) con la pistola (Haga® W. Gemany) y diámetro de copa (DC, m), con cinta métrica (Truper®). Posteriormente se clasificaron los sitios con el modelo de índice de sitio recomendado para la zona de estudio, propuesto por [4].

Muestreo de suelo

En el centro de cada sitio se realizó un perfil de suelo para medir las características de los horizontes del

suelo y obtener muestras a dos profundidades de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm, en total se obtuvieron 60 muestras compuestas, es decir, dos por sitio y una en cada profundidad [21]. Las muestras de suelo se colocaron en bolsas de polietileno para su posterior análisis en el laboratorio de diagnóstico ambiental del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. En campo se determinaron las siguientes variables: profundidad y espesor de los horizontes (cm, cinta métrica TRUPER®), densidad aparente ($g\ cm^{-3}$) con el método del plástico, que consistió en hacer una pequeña excavación y registrar todo el suelo, posteriormente se pesó con la balanza electrónica (OHAUS CS5000®). Posteriormente las paredes de la cavidad creada al extraer la muestra de suelo se cubrieron con una película de polietileno para llenarlo con agua y obtener su volumen conocido. Posteriormente, en el laboratorio, mediante la relación peso/volumen se obtuvo la densidad aparente [22].

Las muestras se secaron a la sombra a temperatura ambiente, se trituraron y se pasaron por un tamiz de 2 mm. El contenido de la materia orgánica (MO) se determinó de acuerdo con el método de Walkey y Black; el pH se determinó con un medidor de pH, al preparar una suspensión en una relación 2:1 de agua destilada:

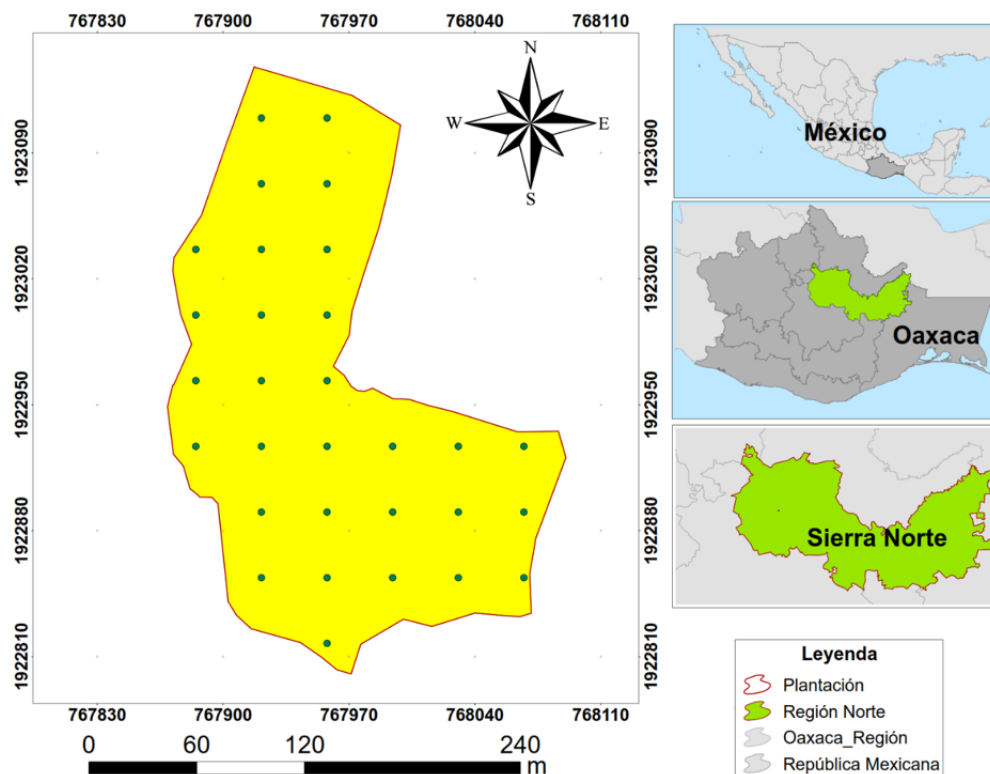


Figura 1. Localización de la plantación de *P. patula*, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

Figure 1. Location of the *P. patula* plantation in Ixtlan de Juarez, Oaxaca, Mexico.

suelo; nitrógeno total (N) con el método de Kjeldahl; P con el método de Bray y Kurtz; acidez intercambiable (Ainter) extraída con una solución de KCl 1N; cationes intercambiables con acetato de amonio 1N pH 7,0, por espectrofotometría de absorción atómica; capacidad de intercambio catiónico (CIC) por suma de cationes intercambiables; la textura por el método de Bouyoucos, todas las determinaciones anteriores se realizaron de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 [23].

Análisis de datos

Todos los datos obtenidos de las muestras de suelo se analizaron con el paquete estadístico SAS [24], se realizaron pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas con la prueba de Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente ($P=0,05$). Para determinar el comportamiento de las variables de suelo en relación con el IS, se realizaron cuatro clasificaciones de la calidad de sitio con base en la altura máxima de los árboles: calidad baja ($IS \leq 21$ m), calidad regular ($IS > 21$ m, ≤ 24 m), calidad buena ($IS > 24$ m, ≤ 27 m) y calidad excelente ($IS > 27$ m) de acuerdo con [4]. Las calidades de sitio se contrastaron mediante modelo general lineal (PROC GLM) y prueba de medias (Duncan, $P \leq 0,05$).

Se realizó análisis de componentes principales (ACP) para elegir las variables de suelo que reunían la mayor variación con el IS. Enseguida se realizó análisis de correlación de Pearson entre las variables físicas y químicas del suelo con el IS.

La selección de variables independientes (físicas y químicas del suelo) se realizó mediante el procedimiento STEPWISE (MAXR) para explicar la variación existente en el IS. Posteriormente, se utilizaron los procedimientos GLM y MODEL para ajustar los modelos, al mismo tiempo se observaron los supuestos de inflación de varianzas y colinealidad con las instrucciones VIF y COLLIN. Las ecuaciones 1 y 2 utilizados fueron de tipo simple y múltiple de acuerdo con lo recomendado por [25]

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + u \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k + u \quad (2)$$

Donde: y es la variable dependiente; $\beta_{(0,1,2,3,k)}$ son los coeficientes de regresión; $X_{(1,2,3,k)}$ son las variables independientes y u es la perturbación o error.

Variables	Calidad de sitio			
	Excelente (IS = 31)	Buena (IS = 27)	Regular (IS = 24)	Baja (IS = 21)
Da	0,77 ± 0,03 c **	0,87 ± 0,10 b**	1,10 ± 0,07 a**	1,19 ± 0,02 a**
HA	32,6 ± 3,04 a**	25,72 ± 1,9 b**	23,3 ± 5,37 b**	18,75 ± 2,21 c**
HO	15,84 ± 0,66 a**	12,02 ± 1,07 b**	8,47 ± 0,74 c**	5,97 ± 0,86 d**
MO	8,91 ± 2,34 a**	6,82 ± 2,95 ab**	5,09 ± 1,88 bc**	3,14 ± 1,91 c**
N	0,44 ± 0,11 a**	0,34 ± 0,14 ab**	0,25 ± 0,09 bc**	0,15 ± 0,09 c**
Arena	42,18 ± 7,43 a	49,45 ± 7,48 a	49,62 ± 9,42 a	50,05 ± 7,03 a
Arcilla	29,15 ± 12,95 a	20,46 ± 7,50 a	19,26 ± 13,88 a	21,85 ± 3,65 a
Limo	29,15 ± 6,23 a	20,46 ± 11,26 a	19,26 ± 13,73 a	21,58 ± 6,98 a
pH	5,20 ± 0,21 a	5,43 ± 0,42 a	5,36 ± 0,32 a	5,26 ± 0,32 a
P	0,51 ± 0,15 a	1,06 ± 0,81 a	3,06 ± 2,47 a	0,84 ± 0,28 a
Na	0,06 ± 0,01 a	0,08 ± 0,04 a	0,07 ± 0,03 a	0,07 ± 0,03 a
K	0,36 ± 0,08 a	0,56 ± 0,30 a	0,52 ± 0,35 a	0,40 ± 0,06 a
Ca	1,26 ± 1,20 a	4,12 ± 4,11 a	3,91 ± 3,90 a	2,44 ± 2,43 a
Mg	0,45 ± 0,14 a	0,79 ± 0,50 a	0,75 ± 0,47 a	0,41 ± 0,15 a
Ainter	1,87 ± 0,61 a	0,97 ± 0,11 a	0,89 ± 0,79 a	0,95 ± 0,57 a
CIC	4,01 ± 0,83 a	6,46 ± 3,85 a	6,17 ± 4,11 a	4,29 ± 2,24 a

Los valores corresponden a la media de variables de suelo ± desviación estándar. Letras distintas por fila indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, $P \leq 0,05$). Da = densidad aparente (g cm^{-3}); HA = espesor del horizonte A (cm); HO = espesor del horizonte O (cm); MO = materia orgánica (%); N = nitrógeno (%); P = fósforo (mg kg^{-1}); Na = sodio (cmolc kg^{-1}); K = potasio (cmolc kg^{-1}); Ca = calcio (cmolc kg^{-1}); Mg = magnesio (cmolc kg^{-1}); Ainter = acidez intercambiable (cmolc kg^{-1}); CIC = capacidad de intercambio catiónico (cmolc kg^{-1}); ** altamente significativas ($P \leq 0,01$). En cada variable por fila, valores con la misma letra no son significativamente diferentes (Duncan, $P \leq 0,05$).

La calidad de los modelos fue evaluada con los estadísticos de regresión: coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustados (R^2_{adj}), cuadrado medio del error (CME), error estándar (EE), coeficiente de variación (CV) y residuales [26].

Resultados y discusión

Calidad del sitio en función de variables edáficas

Fueron cinco las variables de suelo que mostraron diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) en relación con la calidad de sitio; la densidad aparente promedio de los sitios con calidad baja fue de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$, valor que superó en 54,5 % a los encontrados en sitios con calidad excelente. El espesor del horizonte A en sitios con calidad baja fue de 18,75 cm y en sitios con calidad excelente fue de 32,6 cm que se traduce en valores diferenciales de 73,8 %. En tanto, el espesor del horizonte O en sitios con calidad excelente (15,84 cm) evidenció que este valor superó en 165,3 % a los encontrados en los sitios de calidad baja (5,97 cm). El contenido de materia orgánica y nitrógeno mostraron

diferenciales de (183,7 % y 193,0 %, respectivamente) entre los valores de los sitios con calidad baja y excelente.

El resto de las variables evaluadas no evidenciaron diferencias estadísticas. Lo que significa que, en cuanto a los valores de P, Na, K, Ca, Mg, Ainter, CIC, pH, arena, limo y arcilla en las calidades de sitio evaluadas son similares (Cuadro 1).

Los indicadores biofísicos, en especial las variables de suelo explican en esencia las relaciones funcionales entre los factores ambientales y la magnitud de crecimiento de los árboles, con este conocimiento, permiten al administrador forestal una categorización de la calidad del sitio [27].

Los valores promedio obtenidos en este estudio en las variables densidad aparente ($0,98 \text{ g cm}^{-3}$), texturas francas (arena 50 %, arcilla 25 %, limo 25 %), pH (5,3), P ($1,36 \text{ mg kg}^{-1}$), espesor del horizonte O (10,5 cm), espesor del horizonte A (25 cm) y contenido de materia orgánica (6 %), son cercanos a los reportados por [28] en su estudio sobre identificación de indicadores clave de la calidad del suelo y que se relacionan

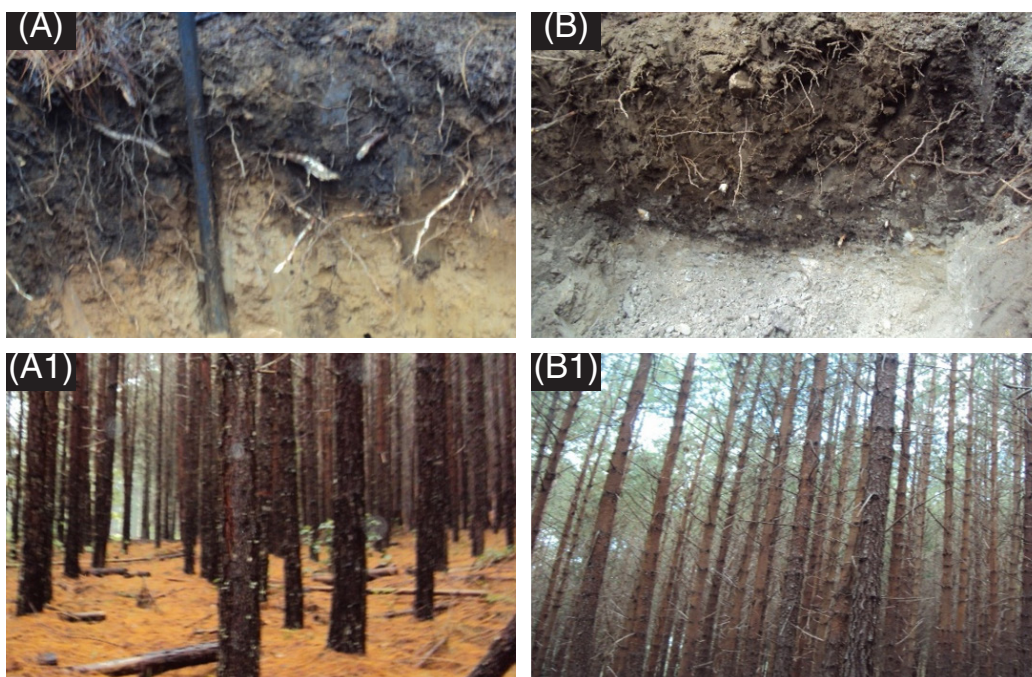


Figura 2. Condición de suelo y del arbolado en plantación de *P. patula*, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. A: características de suelo de un sitio clasificado con calidad de sitio excelente, A1: árboles con mayores dimensiones dendrométricas en sitio clasificado con calidad excelente, B: características de suelo de un sitio clasificado con calidad de sitio baja, B1: árboles con menores dimensiones dendrométricas en sitio clasificado con calidad de sitio baja.

Figure 2. Soil and tree conditions in a *P. patula* plantation in Ixtlan de Juarez, Oaxaca. A: Soil characteristics of an excellent-quality site. A1: Trees with larger dendrometric dimensions in an excellent-quality site. B: Soil characteristics of a low-quality site. B1: Trees with smaller dendrometric dimensions in a low-quality site.

con el incremento medio anual en volumen total en plantaciones forestales de *Pinus patula* en Tanzania, reportaron que esta especie se desarrolla en sitios con densidad aparente ($<1,1 \text{ g cm}^{-3}$), texturas francas (arena 62 %, arcilla 10 %, limo 28 %), pH (4,7), P (2 mg kg^{-1}), porosidad en el suelo (55 %).

En este sentido, [29] al estudiar la relación entre el IS con algunas propiedades físicas del suelo en *Pinus brutia* Ten., encontraron que en los sitios de mayor calidad los suelos presentaron baja densidad aparente ($1,07 \text{ g cm}^{-3}$), mayor contenido de materia orgánica (3,4 %) y mayor profundidad de los suelos (70 cm), características similares a lo descrito en este estudio. Por su parte [30] afirman que la profundidad del suelo, mayor espesor en los horizontes y la capa orgánica tienen relación con la fertilidad y la productividad del sitio, por lo tanto, son variables esenciales que caracterizan a la calidad de sitio [31]. Estas afirmaciones concuerdan con lo que

se observa en la Figura 2, en donde, los árboles con mayores dimensiones dendrométricas se observaron en sitios con mayor espesor de los horizontes y capa de materia orgánica, que a su vez se observan mayor número y grosor de raíces.

El análisis de componentes principales evidenció que, en el CP1 la variable porcentaje de arcilla y limo aportaron vectores de combinación de (0,73 y -0,65, respectivamente). El componente principal dos (CP2) se caracterizó por la variable porcentaje de arena y capacidad de intercambio catiónico. En el componente principal tres (CP3) se presentaron mayor número de variables con vectores de combinación altos como: espesor de los horizontes A (0,56) y O (0,21), contenido de materia orgánica (0,19) y Ca (0,60). En este sentido, fueron solo ocho variables de 16 analizadas que explican el 89,1 % de la varianza total en solo tres componentes (Cuadro 2).

De acuerdo con los valores propios del ACP, los primeros tres componentes fueron los que explicaron el 89,1 % de la varianza para todo el conjunto de datos, con base en el criterio propuesto por [32] de considerar solo aquellos componentes con valores propios que sean superiores al promedio (26,5). El ACP se considera un método para reducir la dimensión de los datos y hacerlos fáciles de interpretar, además permite elegir las variables de mayor relación con el IS, y que están altamente correlacionadas [14]. De las ocho variables

Cuadro 2. Resultados del análisis de componentes principales de variables edáficas.

Table 2. Results of the principal component analysis of soil variables.

Componentes principales	CP1	CP2	CP3
Valores propios	188,96	135,1	53,62
Varianza	0,4458	0,318	0,126
Varianza acumulada	0,445	0,764	0,891
Vectores de combinación			
Da (g cm^{-3})	-0,0015	0,0032	-0,0111
Horizonte A (cm)	0,1170	-0,0002	0,5658
Horizonte O (cm)	0,0406	-0,0967	0,2112
MO (%)	-0,0242	-0,0371	0,1912
N (%)	-0,0012	-0,0019	0,0096
Arena (%)	-0,0856	0,6461	-0,2617
Arcilla (%)	0,7345	-0,2384	0,2000
Limo (%)	-0,6547	-0,4314	0,2813
pH	-0,0076	0,0059	-0,0026
P (mg kg^{-1})	-0,0116	0,0653	0,0936
Na (cmolc kg^{-1})	0,0002	0,0007	-0,0004
K (cmolc kg^{-1})	-0,0027	0,0115	0,0053
Ca (cmolc kg^{-1})	-0,0891	0,5242	0,6014
Mg (cmolc kg^{-1})	-0,0000	0,0255	0,0199
Ainter (cmolc kg^{-1})	0,0220	-0,0335	-0,0032
CIC (cmolc kg^{-1})	-0,0030	0,2189	0,1999

Da = densidad aparente; MO = materia orgánica; N = nitrógeno; P = fósforo; Na = sodio; K = potasio; Ca = calcio; Mg = magnesio; Ainter = acidez intercambiable; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

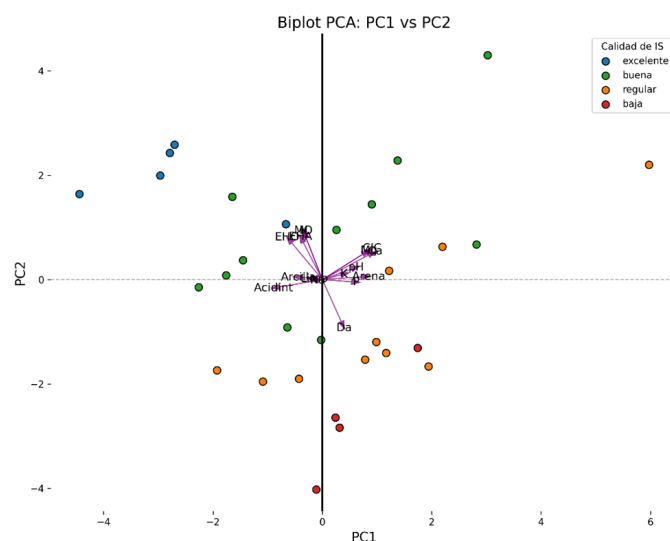


Figura 3. Gráfico biplot de las variables edáficas en función de la calidad de sitio en plantación de *P. patula* en Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

Figure 3. The biplot graph shows a visual representation of the relationship between soil variables and the site quality in a *P. patula* plantation in Ixtlan de Juárez, Oaxaca.

representativas (Figura 3), [33] refieren que la materia orgánica y el espesor del horizonte O son variables que influyen mayormente en la productividad del sitio, debido a que proporcionan un espacio de crecimiento adecuado para el desarrollo de las raíces, mayor retención de la humedad y es la fuente principal para abastecer los nutrimentos esenciales para el árbol.

La correlación de Pearson evidenció que solo cinco de las ocho variables analizadas en el procedimiento anterior tuvieron correlaciones altamente significativas ($P \leq 0,0001$) con el IS. Las variables que mostraron correlaciones positivas con el IS, fueron espesor del horizonte orgánico ($r = 0,88$), espesor del horizonte A ($r = 0,69$), contenido de materia orgánica ($r = 0,57$) y contenido de N ($r = 0,57$). Esto es que, al aumentar los valores de esas variables, el IS es de mejor calidad. No obstante, la densidad aparente mostró una correlación negativa ($r = -0,81$), esto sugiere que cuando esta variable redujo su valor dentro del rango evaluado, el IS aumenta.

La densidad aparente promedio de los suelos evaluados en este estudio fue de $0,98 \text{ g cm}^{-3}$ y se correlacionó negativamente con: espesor del horizonte A ($r = -0,61$), espesor del horizonte O ($r = -0,86$), contenido de materia orgánica ($r = -0,55$) y contenido de N ($r = -0,55$), lo que significa que cuando en el suelo aumentan los valores de esas variables, la densidad aparente disminuye. [34] refieren que cuando los suelos forestales tienen densidades aparentes $< 1,0 \text{ g cm}^{-3}$ se correlaciona con suelos profundos, de textura franca, fértiles y bien

drenados; estas características [35] las describen como necesarias para el buen desarrollo de *P. patula*, en su estudio sobre factores ambientales y su adaptación de esta especie a las condiciones de la sierra en Michoacán, México. El espesor del horizonte orgánico y espesor del horizonte A tuvieron correlación altamente significativa ($r = 0,7$). El contenido de materia orgánica y contenido de N resultaron correlacionados ($r = 0,58$) altamente significativos, mostrando que en la medida que una variable aumenta, la otra también (Cuadro 3).

Las correlaciones significativas entre el IS y las variables del suelo que se encontraron en este estudio, son similares al descrito por [36], que al estudiar la influencia de los factores edáficos sobre la productividad del *Pinus radiata* D. Don en España, demostraron que la profundidad del suelo, la materia orgánica, N total, pH, entre otras, mostraron coeficientes de correlación con el IS entre 0,39 y 0,53. De igual manera, [37] encontraron que la profundidad del suelo y el espesor del horizonte A están correlacionados con el IS, en su estudio sobre la predicción del IS a partir de variables climáticas y del suelo para *Quercus suber* L. en Portugal. [38] describieron que las variables altamente correlacionadas, permiten al administrador del bosque hacer una gestión adecuada de los sitios con base en sus condiciones locales y aprovechar de manera más adecuada su capacidad productiva [39].

Las cinco variables que tuvieron coeficientes de correlación altos y altamente significativos con el IS, se utilizaron para ajustar modelos de regresión lineal

Cuadro 3. Matriz de correlación con valores promedio por sitio, entre el índice de sitio y las variables del suelo.

Table 3. Correlation matrix with average values per site, between the site index and soil variables.

	IS	Da	HA	HO	MO	N	Arena	Arcilla	Limo	pH	P	Na	K
IS	1												
Da	-0,81**	1											
HA	0,69**	-0,61*	1										
HO	0,88**	-0,86**	0,70**	1									
MO	0,57**	-0,55*	0,51*	0,54*	1								
N	0,57**	-0,55*	0,51*	0,54*	0,58**	1							
Arena	-0,29ns	0,22ns	-0,12ns	-0,32ns	-0,15ns	-0,15ns	1						
Arcilla	0,29ns	-0,18ns	0,32ns	0,23ns	-0,06ns	-0,06ns	-0,38*	1					
Limo	-0,01ns	-0,06ns	-0,13ns	0,06ns	0,21ns	0,21ns	-0,32ns	-0,61*	1				
pH	-0,06ns	-0,13ns	-0,33ns	-0,008ns	-0,008ns	-0,008ns	0,23ns	-0,29ns	0,18ns	1			
P	-0,20ns	0,30ns	0,05ns	-0,38*	-0,19ns	-0,19ns	0,21ns	-0,08ns	-0,02ns	-0,03ns	1		
Na	-0,09ns	0,02ns	0,16ns	-0,09ns	0,08ns	0,08ns	0,33ns	-0,0004ns	-0,15ns	-0,45*	0,09ns	1	
K	-0,067ns	-0,011ns	0,16ns	-0,05ns	-0,16ns	-0,16ns	0,47*	-0,21ns	-0,06ns	-0,20ns	0,25ns	0,41ns	1

IS = índice de sitio; Da = densidad aparente (g cm^{-3}); HA = espesor del horizonte A (cm); HO = espesor del horizonte O (cm); MO = contenido de materia orgánica (%); P = fósforo (mg kg^{-1}); Na = sodio (cmolc kg^{-1}); K = potasio (cmolc kg^{-1}), ** altamente significativo ($P \leq 0,01$); *significativo ($P \leq 0,05$); ns = no significativo.

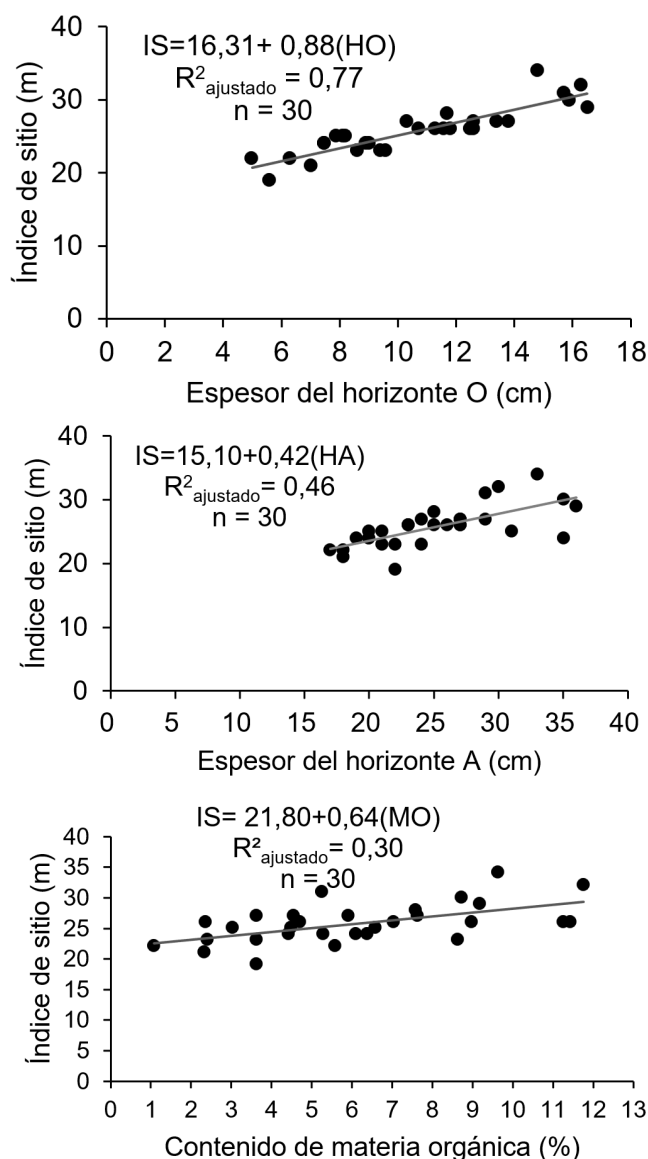


Figura 4. Relación entre el índice de sitio, el espesor de los horizontes A y O, y el contenido de materia orgánica en plantación de *P. patula* en Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

Figure 4. Relationship between site index, thickness of horizons A and O, and organic matter content in a *P. patula* plantation in Ixtlan de Juarez, Oaxaca.

simple y se eligieron las variables que presentaron los estadísticos regresión aceptables. Para espesor del horizonte O se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2_{ajustado} = 0,77$, seguido del espesor del horizonte A con $R^2_{ajustado} = 0,48$ y para la materia orgánica $R^2_{ajustado} = 0,30$ (Figura 4).

Relación funcional entre variables edáficas y calidad del sitio

Las variables antes descritas fueron integradas en la ecuación general 3 de regresión múltiple para explicar

la relación funcional con el IS, quedó integrado de la siguiente manera (ecuación 3).

$$IS = 15,39 + 0,06(HA) + 0,75(HO) + 0,12(MO) \quad (3)$$

Donde: *IS* es el índice de sitio (m); *HA* es el espesor del horizonte A (cm); *HO* es el espesor del horizonte O (cm); *MO* es el contenido de materia orgánica (%). El modelo se respalda de un cuadrado medio del error de 2,33, coeficiente de determinación $R^2_{ajustado} = 0,78$, coeficiente de variación 5,93, valores de inflación de varianzas (VIF) para cada variable entre 1 y 2, estadístico de Durbin Watson 1,58, estadístico de Breusch-Pagan con valor de 1,78.

Los modelos paramétricos se utilizan en investigación forestal para estimar el IS como por ejemplo en el de [40], al aplicarlos en rodales de *Pinus pinaster* Ait. en España, mediante la selección por pasos, determinaron que la profundidad del suelo es una variable importante para ser considerada en este tipo de análisis; el modelo lineal presentó coeficiente de determinación ajustado 0,32, valor cercano a los coeficientes obtenidos en este estudio en los modelos lineales que poseen una sola variable.

Por su parte [41] refieren que usar modelos segmentados que posean pocas variables puede tener planteamientos simples, tienen la ventaja de poseer un contexto sencillo en la interpretación. [42] discuten que en áreas que muestran poca variabilidad silvícola y ambiental como en las plantaciones forestales el uso de modelos de regresión es más apropiado que utilizar otro tipo de análisis. Para describir el crecimiento de *Abies alba* Mill. en función de algunas características del suelo, [43] utilizaron regresión lineal múltiple, concluyeron que las variables espesor y profundidad de los horizontes del suelo están asociados a la magnitud de crecimiento, los modelos que obtuvieron poseen coeficientes de determinación ajustados promedios de 0,57.

De manera general, los modelos de regresión seleccionados en este estudio, poseen coeficientes de regresión aceptables, el buen ajuste de ellos se le puede atribuir a las relaciones funcionales que se tiene entre las variables de suelo y la magnitud de crecimiento de los árboles, por lo tanto, en la calidad del sitio. Además, esta fuerte relación obtenida del IS influenciado por características del suelo, y que muestran los coeficientes de determinación del modelo puede deberse al tamaño de la muestra ($n = 30$) distribuida en una superficie de plantación (4,1 ha). El modelo lineal múltiple obtenido posee tres variables de suelo (HA, HO y MO) que ayudan a explicar el 78 % de la variación existente en el IS, que le da practicidad en su aplicación y le permite maximizar la capacidad de

explicar las relaciones funcionales entre las variables de suelo y la productividad de los árboles.

El presente trabajo es complemento a datos reportados por [4] de que arbolado con la misma edad que crecieron en sitios con calidades de estación diferentes, sus alturas promedio variaron entre 22,6 m (calidad de IS = baja) y 34,5 m (calidad de IS = excelente), sus diámetros normales fueron desde 26,0 a 38,5 cm, y sus diámetros de copa variaron desde 4,5 a 9,1 m, lo que es un indicador de diferentes expresiones de productividad. Entonces los árboles, incorporan al suelo parte de su biomasa (acículas, conos, flores, corteza, ramas) pero en cantidades relacionadas a la productividad del sitio, formando capas con diferente grado de descomposición y de nutrimentos disponibles que se reflejan en la fertilidad del suelo [44], misma que se suma a otras condiciones del sitio forestal que en conjunto determinan su capacidad productiva [45].

Los valores de correlación altos que presentaron las variables del suelo como espesor del horizonte A, espesor del horizonte O, contenido de materia orgánica y contenido de N, pueden ser indicadores para aplicar acciones sustentables de aprovechamiento forestal al realizar acciones para conservar el suelo, puesto que los horizontes superiores son los que primeramente son alterados en sus propiedades físicas, y propiedades químicas debido a actividades de aprovechamiento forestal; lo que genera mayor riesgo en la erosión de los suelos [46].

Conclusiones

El estudio evidenció variaciones significativas en cuanto a las variables edáficas para cada calidad de sitio, estas diferencias fueron mas pronunciadas en los sitios de calidad excelente. Las variables edáficas que tuvieron mayor relación con el índice de sitio fueron la densidad aparente, espesor del horizonte O, espesor del horizonte A y contenido de materia orgánica; mismas que explicaron el 78 % de su relación funcional total existente con la calidad de sitio. Las variables identificadas en este estudio pueden ser utilizados como indicadores de productividad de los sitios, además pueden permitir a los administradores forestales seleccionar sitios apropiados para el establecimiento de plantaciones para *Pinus patula* y se optimicen rendimientos maderables.

Referencias

[1] N. Escamilla-Hernández, et al., "Propagación vegetativa de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham en diferentes sustratos," Revista Fitotecnica Mexicana, vol. 43, no. 2, Jun., pp. 215-221, 2020.

doi. 10.35196/rfm.2020.2.215

- [2] L. C. Mendizábal-Hernández, et al., "Movimiento de especies," Foresta Veracruzana, vol. 13, no. 1, pp. 37-42, 2011.
- [3] C. A. Pedro, et al., "Crecimiento de *Pinus patula* var. longepedunculata Loock en plantaciones de la Sierra Sur de Oaxaca," Madera y Bosques, vol. 28, no. 1, Jul., pp. 1-14, 2022. doi. 10.21829/myb.2022.2811438
- [4] J. A. García-Aguilar, et al., "Influencia de la calidad de sitio sobre el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schltdl. et Cham.," Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 8, no. 44, 2017. doi. 10.29298/rmcf.v8i44.108
- [5] I. Fabián-Plesníková, et al., "Parámetros genéticos de caracteres de crecimiento en un ensayo de progenies de *Pinus oocarpa*," Madera y Bosques, vol. 26, no. 3, pp.1-14, 2020. doi. 10.21829/myb.2020.2632014
- [6] F. Chen, M. et al., "Summer monsoon season streamflow variations in the middle Yellow River since 1570 CE inferred from tree rings of *Pinus tabulaeformis*," Atmosphere, vol. 11, no. 7, Jul., pp. 1-11, 2020. doi. 10.3390/atmos11070717
- [7] R. J. M. Torres, "Factores ambientales y físicos que afectan la supervivencia de siete especies forestales en el Estado de México," Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 12, no. 64, Feb., pp. 66-91, 2021. doi. 10.29298/rmcf.v12i64.831
- [8] H. Wu, et al., "Tree growth rate and soil nutrient status determine the shift in nutrient-use strategy of Chinese fir plantations along a chronosequence," Forest Ecology and Management, vol. 460, Jan., pp. 1-9, 2020. doi. 10.1016/j.foreco.2020.117896
- [9] C. J. Soto et al., "Efecto de cuatro tratamientos silvícolas en la producción maderable en un bosque de Durango," Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 12, no. 67, Oct., pp. 56-80, 2021. doi. 10.29298/rmcf.v12i67.991
- [10] X. García-Cuevas, et al., "Modelos de índice de sitio en plantaciones de *Swietenia macrophylla* King en Quintana Roo, México," Revista Fitotecnica Mexicana, vol. 45, no. 3, pp. 387-397, 2022. doi. 10.35196/rfm.2022.387
- [11] X. García-Cuevas, et al., "Índice de sitio en plantaciones forestales de *Pinus oocarpa* Shiede en Michoacán, México," Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, vol. 11, no. 1, Feb., pp. 1-16, 2024. doi. 10.19136/era.a11n1.3765

- [12] H. Quinto-Mosquera y F. H. Moreno-Hurtado, "Influencia de los nutrientes del suelo sobre el crecimiento arbóreo en bosques del Pacífico colombiano," *Colombia Forestal*, vol. 25, no. 2, Jul., pp. 30–44, 2022. doi. [10.14483/2256201X.18232](https://doi.org/10.14483/2256201X.18232)
- [13] P. A. Domínguez-Calleros, et al. "Influencia de factores edáficos en el crecimiento de una plantación de *Pinus greggi* Engelm. en Santiago de Anaya, Hidalgo, México," *Madera y Bosques*, vol. 23, no. 2, pp.145-154, 2017. doi. [10.21829/myb.2017.2321522](https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321522)
- [14] K. Juhos, et al., "Explore the influence of soil quality on crop yield using statistically-derived pedological indicators," *Ecological Indicators*, vol. 63, Apr., pp. 366–373, 2016. doi. [10.1016/j.ecolind.2015.12.029](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.029)
- [15] K. Ahmadi, et al., "Constructing site quality curves and productivity assessment for uneven-aged and mixed stands of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forest, Iran," *Forest Science and Technology*, vol. 13, no. 1, Mar., pp. 41–46, 2017. doi. [10.1080/21580103.2017.1292959](https://doi.org/10.1080/21580103.2017.1292959)
- [16] A. L. Codilan, et al., "Estimating site index from ecological factors for industrial tree plantation species in Mindanao, Philippines," *Bulletin of The University of Tokyo Forests*, vol. 133, pp. 19–41, 2015.
- [17] J. Lasota, et al., "Relations between site characteristics and spruce stand productivity," *Baltic Forestry*, vol. 22, no. 1, pp. 81–89, 2016.
- [18] M. Dubova, et al., "Is Ockham's razor losing its edge? New perspectives on the principle of model parsimony," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 122, no. 5, Jan., pp.1-10, 2025. doi. [10.1073/pnas.2401230121](https://doi.org/10.1073/pnas.2401230121)
- [19] G. Rodríguez-Ortiz, et al., "Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo," *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 34, no. 3, Jul., pp. 205–212, 2011.
- [20] Z. Aguirre, et al., "Procesos sucesionales de la vegetación bajo plantaciones forestales y bosque andino en la hoya de Loja, Ecuador," *Conservação e Biodiversidade Amazônica: potencialidade e incertezas*, vol. 2, pp. 107-127, 2023. doi. [10.37885/220809828](https://doi.org/10.37885/220809828)
- [21] J. L. Núñez-Peñaloza, et al., "Efecto de tres sistemas de producción sobre el estado de la fertilidad física del suelo," *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 13, no. 72, Ago., pp. 55–81, 2022. doi. [10.29298/rmcf.v13i72.1279](https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1279)
- [22] A. A. Al-Shammary, et al., "Soil bulk density estimation methods: a review," *Pedosphere*, vol. 28, no. 4, Aug., pp. 581-596, 2018. doi. [10.1016/S1002-0160\(18\)60034-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60034-7)
- [23] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, NOM–021–RECNAT–2000. Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Diario Oficial de la Federación, México, D. F., México, 2002, 73 p.
- [24] SAS Institute Inc., The SAS System for Windows User's guide. Release 9.4, Cary, NC, USA: SAS Institute, 2022, 35 p.
- [25] J. A. Romero, et al., "Modelo de regresión múltiple para predecir el volumen maderable de árboles de eucalipto del Parque Forestal Aylambo de la Universidad Nacional de Cajamarca," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 6, Ene., pp. 10245-10259, 2024. doi. [10.37811/cl_rcm.v8i6.15683](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15683)
- [26] O. P. D. Carrera and Q. M. Cabrera, "Estimación del volumen comercial de laurel (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav) en árboles de regeneración en cultivos de Sucumbíos-Ecuador," *Green World Journal*, vol. 7, no. 1, Mar., pp. 1–18, 2024. doi. [10.53313/gwj71108](https://doi.org/10.53313/gwj71108)
- [27] J. D. Bontemps and O. Bouriaud, "Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives," *Forestry*, vol. 87, no. 1, Nov., pp. 109–128, 2014. doi. [10.1093/forestry/cpt034](https://doi.org/10.1093/forestry/cpt034)
- [28] J. Maguzu, et al., "Identification of key soil quality indicators for predicting mean annual increment in *Pinus patula* forest plantations in Tanzania," *Forests*, vol. 15, no. 11, Nov., pp. 1-13, 2024. doi. [10.3390/f15112042](https://doi.org/10.3390/f15112042)
- [29] R. Gundogan, et al., "Relationship between site index and some physical properties of calabrian pine," *Forest Products Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 45–48, 2005.
- [30] J. Romanya and V. R. Vallejo, "Productivity of *Pinus radiata* plantations in Spain in response to climate and soil," *Forest Ecology and Management*, vol. 195, no. 1-2, Jun., pp. 177–189, 2004. doi. [10.1016/j.foreco.2004.02.045](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.045)
- [31] A. Suleymanov, et al., "Soil organic matter in temperate forest-grassland systems: a case study from the Southern Cis-Ural, Russia," *Web of Conferences*, vol. 411, Aug., pp. 1–17, 2023. doi. [10.1051/e3sconf/202341102004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341102004)

- [32] L. Pla, "Análisis multivariado: Método de Componentes Principales", Instituto Interamericano de Estadística, Sec. General de la OEA, Washington, D.C., 1986.
- [33] M. Unger, et al., "Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the equatorial Andes," *Oecologia*, vol. 170, Mar., pp. 263–274, 2012. doi. [10.1007/s00442-012-2295-y](https://doi.org/10.1007/s00442-012-2295-y)
- [34] V. Shahrokh, et al., "Advancing soil compaction assessment: a comprehensive study in Ireland," *European Journal of Soil Science*, vol. 76, no. 3, May., pp. 1-14, 2025. doi. [10.1111/ejss.70122](https://doi.org/10.1111/ejss.70122)
- [35] H. J. Muñoz, et al., "Factores ambientales de *Pinus patula* Schl. et Cham. y su adaptación a las condiciones de la Sierra Purépecha, Michoacán," *Foresta Veracruzana*, vol. 12, no. 2, Feb., pp. 27-33, 2010.
- [36] F. Sánchez-Rodríguez, et al., "Influence of edaphic factors and tree nutritive status on the productivity of *Pinus radiata* D. Don plantations in northwestern Spain," *Forest Ecology and Management*, vol. 171, no. 1-2, Nov., pp. 181–189, 2002. doi. [10.1016/S0378-1127\(02\)00471-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00471-1)
- [37] A. J. Paulo, et al., "Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal," *New Forests*, vol. 46, Oct., pp. 293–307, 2015. doi. [10.1007/s11056-014-9462-4](https://doi.org/10.1007/s11056-014-9462-4)
- [38] N. Farrelly, et al., "Sitka spruce site index in response to varying soil moisture and nutrients in the three different climate regions in Ireland," *Forest Ecology and Management*, vol. 262, no. 12, Dec., pp. 2199–2206, 2011. doi. [10.1016/j.foreco.2011.08.012](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.012)
- [39] M. Toledo, et al., "Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance," *Journal of Ecology*, vol. 99, no. 1, Oct., pp. 254–264, 2011. doi: [10.1111/j.1365-2745.2010.01741.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01741.x)
- [40] P. Álvarez-Álvarez, et al., "Effects of foliar nutrients and environmental factors on site productivity in *Pinus pinaster* Ait. stands in Asturias (NW Spain)," *Annals of Forest Science*, vol. 68, no. 3, Apr., pp. 497–509, 2011. doi. [10.1007/s13595-011-0047-5](https://doi.org/10.1007/s13595-011-0047-5)
- [41] C. E. Delgado-Caballero, et al., "Site index and soil properties in young plantations of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* in southeastern México," *Agrociencia*, vol. 3, no. 1, pp. 61–72, 2009.
- [42] F. Bravo, et al., "Soil and forest productivity: a case study from Stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Calabria (southern Italy)," *iForest*, vol. 4, no. 1, Jan., pp. 25–30, 2011, doi. [10.3832/ifer0559-004](https://doi.org/10.3832/ifer0559-004)
- [43] M. Kopal, et al., "Influence of soil properties on silver fir (*Abies alba* Mill.) growth in the Dinaric Mountains," *Forest Ecology and Management*, vol. 337, Feb., pp. 77–87, 2015, doi. [10.1016/j.foreco.2014.10.017](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.10.017)
- [44] T. Bueis, et al., "Influencia de la densidad del arbolado sobre el desfronde y su reciclado en pinares de repoblación del norte de España," *Bosque*, vol. 38, no. 2, pp. 401–407, 2017. doi. [10.4067/S0717-92002017000200017](https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200017)
- [45] A. R. Telles, et al., "Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de *Gmelina arborea* Roxb. en Tlatlaya, Estado de México," *Madera y Bosques*, vol. 27, no. 1, pp. 1–19, 2021. doi. [10.21829/myb.2021.2711987](https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711987)
- [46] V. Rodríguez-Rivera, et al., "Efecto del manejo forestal en las propiedades fisicoquímicas del suelo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México," *Madera y Bosques*, vol. 29, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi. [10.21829/myb.2023.2912476](https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912476)