



Factores edáficos y su impacto en la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba*

Edaphics factors and their impact on the dominant height of *Prosopis alba* plantations

María Gracia Senilliani^{1*}, Cecilia Bruno² y Miguel Brassiolo¹

¹ Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales-INSIMA. Santiago del Estero, Argentina. mmbraasiolo@gmail.com

² Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Biometría y Estadística. Córdoba, Argentina. cebruno@agro.inc.edu.ar

* Autor de correspondencia. senilliani@yahoo.com.ar

RESUMEN

Prosopis alba Griseb es la especie nativa de mayor importancia en el Chaco semiárido para la forestación con múltiples objetivos. Más de 50% de la superficie plantada en la provincia de Santiago del Estero, Argentina se ha establecido en áreas con calidades de sitio muy diferentes, generando un comportamiento heterogéneo en el crecimiento. Se propone evaluar la influencia de factores edáficos en el crecimiento de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb (algarrobo blanco), información que facilitará la toma de decisiones silviculturales y permitirá predecir la calidad de sitio con potencial de forestación, con base en características edáficas. Se evaluó la correlación entre variables dasométricas y edáficas en relación con tres clases de calidad de sitio (CI, CII y CIII). Se determinó un modelo de proyección de altura dominante, expresado como índice de sitio con las variables edáficas de mayor correlación, que explica 42% de la variación en el crecimiento. La conductividad eléctrica presentó un umbral de 10 dS m⁻¹ para la CI y CII con índice de sitio de 10 y 8 respectivamente; para valores superiores de CE disminuyó el crecimiento de la masa. La concentración de cationes solubles varió con respecto al índice de sitio, la CI y CII presentaron concentraciones bajas de sodio, con un valor crítico de aproximadamente 39 mEq L⁻¹. El crecimiento estuvo condicionado por propiedades químicas del suelo, la presencia de sales explicaría en mayor medida el impacto en el crecimiento, con un umbral salino a partir del cual el crecimiento se ve comprometido desde un enfoque productivo.

PALABRAS CLAVE: algarrobo, factores edáficos, índice de sitio, silvicultura, salinidad.

ABSTRACT

Prosopis alba is the most important native species in the semi-arid Chaco for afforestation with multiple objectives. More than 50% of the planted area in Santiago del Estero, Argentina has been established in areas with very different site quality, generating a heterogeneous growth behavior. It is proposed to evaluate the influence of edaphic factors on the growth of plantations *Prosopis alba* Griseb (algarrobo) in areas of the semi-arid Chaco, information that will facilitate silvicultural decision making and will allow predicting the quality of sites with forestation potential based on conditions of the environment. The correlation between dasometric and edaphic variables was evaluated in relation to 3 kinds of site quality (CI, CII and CIII). A dominant height projection model expressed as a Site Index with the most correlated edaphic variables was determined, which explains 42% of the variation in growth. The electrical conductivity has a threshold of 10 dS m⁻¹ for the CI and CII with Site Index of 10 and 8 respectively; for higher EC values the growth of the mass decreases. The concentration of soluble cations varies in relation to the site index, the CI and CII have low sodium concentrations, with a critical value of approximately 39 mEq L⁻¹. Growth is conditioned by chemical properties of the soil, the presence of salts would further explain the impact on growth, with a saline threshold from which growth is compromised from a productive approach.

KEYWORDS: algarrobo; edaphic factors; site index; forestry; salinity.

INTRODUCCIÓN

El género *Prosopis* tiene gran relevancia entre la flora presente en la mayor parte de la región chaqueña de Argentina y tiene gran importancia en la composición arbórea y arbustiva de estas zonas. De un total de 31 especies sudamericanas, 11 son endémicas de Argentina (Burkart, 1976). En esta amplia gama de especies dentro del género, se destaca *Prosopis alba* Griseb, como una especie nativa de gran importancia en las regiones semiáridas (Giménez, Ríos, Moglia, Hernández y Bravo 2001; Cisneros y Moglia, 2017). Esta constituye una de las principales especies nativas en Argentina como fuente de madera para aserrío; así lo confirman las estadísticas que indican que, de las tres especies más usadas para este destino, registrado dentro del periodo 2010-2016, el algarrobo ocupó el segundo lugar en importancia con 15% de la producción total de madera proveniente en su mayoría del Parque Chaqueño (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2018). Además de ser valorada por la calidad de la madera, se considera una especie multipropósito, con un creciente mercado para los productos forestales no maderables que brinda, por ejemplo, frutos con alto contenido en proteínas y azúcares, usados para alimento humano y forraje (Giménez, Ríos, Moglia, Hernández y Bravo, 2001; Juárez de Galíndez, Giménez, Ríos y Balzarini, 2005; Juárez de Galíndez, Giménez, Ríos y Balzarini, 2008; Ewens y Felker, 2010; Cisneros y Moglia, 2017). El algarrobo tiene gran potencial para la reforestación y, debido a sus características ecofisiológicas, puede crecer en zonas donde otras actividades ya no son productivas por la calidad de los sitios. Los resultados obtenidos en plantaciones sugieren que el máximo punto de crecimiento en volumen con esta especie se obtiene a la mitad del turno alcanzado en rodales naturales de *Prosopis* (Juárez de Galíndez *et al.* 2005). La mayor parte de la superficie reforestada ha sido establecida en áreas muy diferentes en cuanto a las condiciones del suelo, generando un comportamiento heterogéneo en el crecimiento de las plantaciones. Se requiere de una base amplia de conocimientos silviculturales de la especie que permita

conocer la dinámica y productividad de la especie e introducir el concepto de calidad del sitio en la planificación de la silvicultura, como el término referido a la productividad potencial de un sitio para una especie particular (Clutter, Fortson, Pienarr, Brister y Bailey, 1983).

Los conceptos de calidad de sitio e índice de sitio (IS) son de máxima importancia en la silvicultura de plantaciones y su predicción es uno de los elementos centrales en la planificación del uso de la tierra con fines forestales (Valle Arango, 1993). En la región del Noroeste argentino, existe una serie de investigaciones tendientes a dar respuesta a los problemas que se generan en el cultivo forestal de *Prosopis alba* (Ledesma, de Bedia y López, 2008; Navall, Ewens, Senilliani y López, 2015; Salto, Harrand, Oberschelp y Ewens, 2016), sin embargo, la fase inicial de evaluación de la calidad del sitio forestal es aún materia pendiente. Es necesario poder estimar el rendimiento de las masas forestales o contar con los elementos para predecir la productividad de un sitio que aún no ha sido plantado estimando las relaciones causales que determinen la productividad, con base en los factores del medio ambiente (Schlatter y Gerding, 1995).

OBJETIVOS

El presente trabajo se propuso evaluar la influencia de los factores del suelo en el crecimiento de plantaciones de *Prosopis alba* Griseb en áreas del Chaco semiárido, a partir de la correlación del crecimiento de la especie con los factores edáficos, con la perspectiva de aportar información que facilite la toma de decisiones silviculturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se sitúa en la subregión del Chaco semiárido de la República Argentina, comprendida en el área de riego del río Dulce, en la provincia de Santiago del Estero, latitud S 27° 39' y longitud O 64° 14', que abarca 110 000 ha aproximadamente con un área de influencia general de 275 365 ha. El área de estudio se caracteriza por presencia de agua subterránea cercana (2 m a 5 m de profundidad). El material de estudio está constituido por plantaciones adultas de la especie (> de 9 años). El criterio



para la selección contempló la edad de la plantación y la variabilidad en los tipos de suelo, teniendo en cuenta principalmente la salinidad y las características propias de los rodales. El material genético empleado en la zona es homogéneo, proviene de áreas de colecta de semilla. Las intervenciones silvícolas comprenden dos a tres podas en los primeros años, un riego anual durante los primeros años y desmalezados ocasionales. Los datos utilizados provienen de parcelas temporales, parcelas permanentes y análisis de fustes de individuos dominantes. El área de las parcelas establecidas varía en superficie de 576 m² a 1728 m², pero incluye un número fijo de 48 árboles, por lo que el área es variable, según el espaciamiento inicial de la plantación.

Las variables de crecimiento evaluadas fueron: la altura dominante (HD, definida por Assman [1970] como la altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea), expresada en metros; el diámetro a la altura de pecho (DAP), en centímetros; el área basal (AB), expresada en metros cuadrados por hectárea y la edad (E), expresada en años.

En cuanto a los factores del sitio, se considera que el área donde se ubican las plantaciones evaluadas coincide en una misma región con características climáticas y fisiográficas comunes. El área en estudio presenta una biotemperatura promedio anual de 20.4 °C y precipitación promedio anual de 624 mm. Fisiográficamente, el área en general constituye una planicie que se encuentra entre 75 m y 90 m snm, con un paisaje que presenta planicies onduladas de formación eólica con hondonadas y pequeñas cubetas de deflación (Godagnone y de la Fuente, 2001). Esta área corresponde a la zona de distribución natural de la especie, por lo que no representa un factor limitante en el crecimiento.

De acuerdo con Bonelli y Schlatter (1995), quienes expresan que los factores del suelo en áreas con condiciones de clima local y sin grandes variaciones suelen ser más influyentes que los demás factores del ambiente en el establecimiento de la especie forestal y su nivel de producción, el trabajo se focaliza en el estudio de los factores del suelo. En concordancia con lo expresado por Méndez Paiz y Banegas Chacon (2016), se define al factor

suelo como el primer aspecto de la condición de sitio y, a partir de allí, se establecen diferencias con base en factores locales del sitio.

La caracterización general del sitio y del perfil se hizo mediante calicatas, situadas en cada parcela, extrayendo muestras de 0 cm a 90 cm de profundidad de cada uno de los horizontes. Los análisis correspondientes se realizaron en el laboratorio del Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (Insima) de la Facultad de Ciencias Forestales UNSE y en el Laboratorio de Suelo, Agua y Fertilizantes (LabSA) de la Estación Experimental Agropecuaria Salta Grupo Recursos Naturales.

Los parámetros edáficos, físicos y químicos, así como las técnicas empleadas, se describen a continuación. Parámetros edáficos: pH, por potenciometría en extracto de saturación; conductividad eléctrica (CE) en el extracto de saturación, expresada en miliohms por centímetro; cationes solubles: sodio, calcio más magnesio soluble en el extracto de saturación (mEq L⁻¹); relación adsorción sodio (RAS) y presencia de carbonatos (en porcentaje). Parámetros físicos: densidad aparente (DA, g cm⁻³) por el método del cilindro metálico usando un cilindro de 100 cm³; porosidad de la capa arable (PT), por el método del cilindro metálico (Page, 1982), se expresa en porcentaje v/v; textura y humedad del suelo, descritos cualitativamente.

El índice dasométrico, obtenido según Senilliani, Bruno y Brassiolo (2019), para *Prosopis alba* fue correlacionado con los factores edáficos citados, con el propósito de determinar la relación entre las variables. Se trabajó con 47 parcelas, a las cuales se asignó su correspondiente clase de calidad desde la clase de mayor calidad a la menor (CI, CII y CIII), a través del cálculo del IS, utilizando la altura dominante y la edad actual con la función de Gompertz del IS, determinado a una edad base de 15 años. Para una evaluación preliminar de la correlación de la calidad de sitio con las variables físicas (porosidad y DA) y químicas (pH, cationes solubles [Ca+Mg, Na] CE y RAS), se realizó un análisis multivariado con análisis de componentes principales.

Algunas de las variables edáficas empleadas son variables discretas ordinales, debido a esto se realizó su codificación para poder efectuar su evaluación. En el caso de carbonatos, se usó la siguiente codificación: (0) sin presencia, (1) presencia solo en profundidad de 0% a 5%, (2) presencia solo en profundidad de 5% a 10% y (3) presencia en todo el perfil. La textura se clasificó en: franco limoso arenoso y franco limoso; y la humedad en: uniformemente seco, uniformemente fresco, no uniformemente fresco y uniformemente húmedo. El método de clasificación se basa en la guía de reconocimiento de suelos de la FAO.

Posteriormente se trabajó en la construcción de un modelo predictivo del IS mediante regresión lineal múltiple, para situaciones donde no existen plantaciones de la especie. Se relacionó el IS con las variables edáficas de mayor relevancia en el efecto sobre el crecimiento, determinados en los análisis previos. De todas las variables estudiadas, la CE y la concentración de sodio, resultaron ser las variables de mayor capacidad de predicción del crecimiento.

La validación de los modelos de predicción del IS, a partir de variables ambientales, se realizó utilizando el método *Leave one out* o *jackknife*. Como medida del error y de sesgo, se utilizó el cuadrado medio del error promedio (ECMP) y el coeficiente de variación que refleja la variabilidad de la estimación del modelo.

Los datos fueron analizados estadísticamente con InfoStat (Di Rienzo, Casanoves, Balzarini, González, Tablada y Robledo, 2018) y su interfaz con el programa R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores promedio de altura dominante y el error experimental según clase de calidad e IS (edad base = 15) se muestran en tabla 1, registrándose diferencias altamente significativas en la HD (valor de F 19,5 $p < 0,0001$) y en el IS (valor de F 53,95 $p < 0,0001$) entre clases de calidad.

Los valores obtenidos en el análisis confirman que las clases de calidad se encuentran correctamente representadas, como resultado del crecimiento en altura de los rodales en estudio. La muestra de 47 parcelas resultó clasificada en 21,3% en la CI, 53,2% en la CII y 25,5% en la CIII.

Factores del sitio

Se evaluó el comportamiento de los factores edáficos, considerando las propiedades físicas, textura y humedad, mediante análisis de correspondencias múltiple en relación con las calidades de sitio (Fig. 1).

Se obtuvo un porcentaje de inercia de 38,3% que se considera bajo para este tipo de análisis, lo que indicaría que estas variables presentan una débil asociación con las clases de calidad de sitio. Sin embargo, se percibe una tendencia a que la CI se relacione con suelos con un tenor de humedad media, diferenciándose de la CIII, que crece en sitios con un perfil húmedo a mojado, que se incrementa con la profundidad del perfil y se asocia a la presencia de salinidad.

El resto de las variables físicas evaluadas fueron la porosidad y la DA, el análisis de componentes principales en este caso se muestra en la figura 2.

TABLA 1. Análisis de la varianza para las variables índice de sitio (IS) y altura dominante (HD), según clases de calidad; y prueba DGC para el análisis de las diferencias de medias

Clases	HD(m)	EE	IS	
I	8,7	0,32	9,9	A
II	7,6	0,22	8,1	B
III	5,5	0,42	6	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

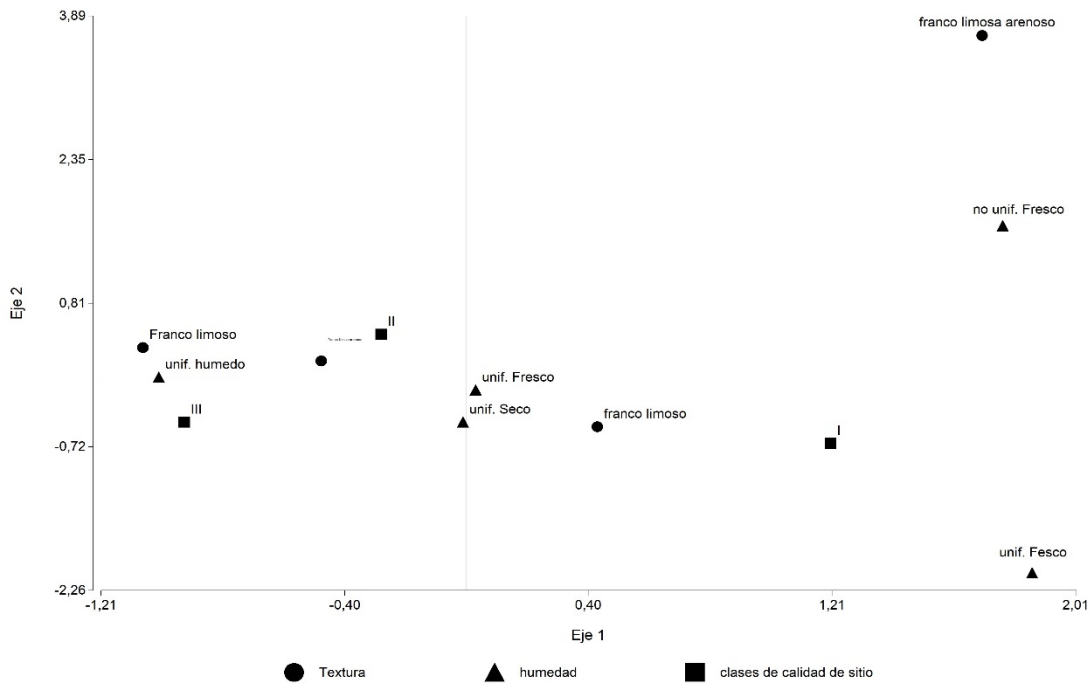


FIGURA 1. Asociación de variables edáficas físicas, textura y humedad, con las clases de calidad de sitio I, II y III.

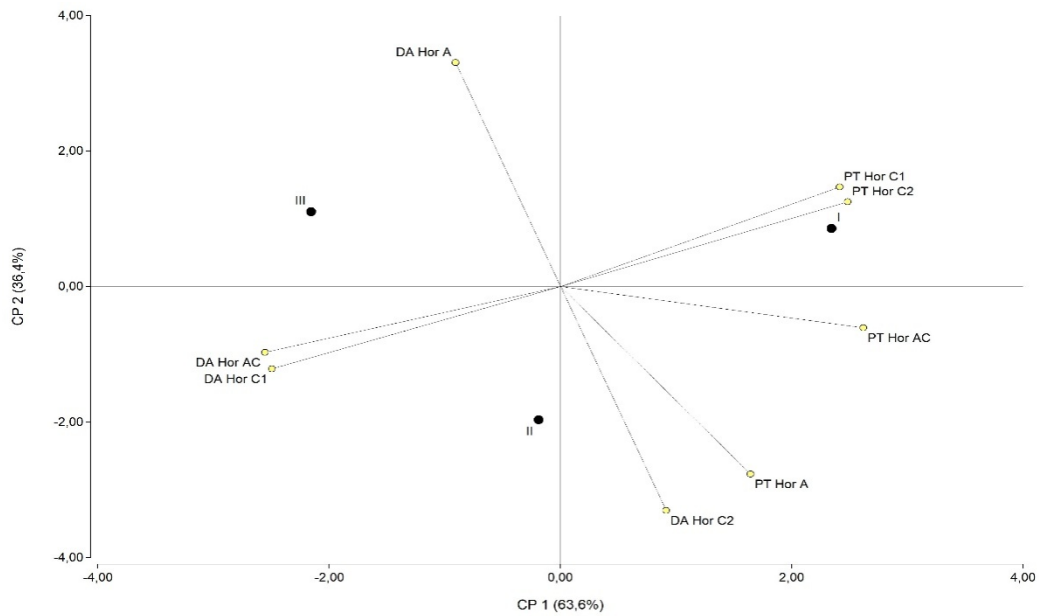


FIGURA 2. Relación de las variables físicas, porosidad total (PT) y densidad aparente (DA) en diferentes horizontes del perfil, en relación con las clases de calidad de sitio I, II y III.

Se estableció una correlación positiva entre las PT en los horizontes y una correlación negativa, como era de esperar, con la DA. El CP1 explica 63,6% de la variabilidad de las clases, asociando una mejor calidad de sitio con mayor PT y menor DA.

Para confirmar los datos anteriores, se comprobó que la DA y la porosidad total presentaran diferencias altamente significativas de la CI con respecto a CII y CIII (valor de F 9,3 y 7,8 $p < 0,0001$ respectivamente); sin embargo, las CIII y CII fueron iguales entre sí. Estudios similares en otras especies forestales indican que las propiedades físicas y químicas tienen su impacto en el crecimiento, así es el caso de la textura y la porosidad en el crecimiento de *Pinus sylvestris* en España (De los Bueis Mellado, 2012) o la textura y la materia orgánica en *Tabebuia donnell-smithii* Rose en

plantaciones en Guatemala (Méndez Paiz y Vanegas Chacón, 2016).

La porosidad total demuestra ser una de las variables, entre las propiedades físicas, con mayor poder de respuesta en asociación con la humedad del perfil. La porosidad se encuentra entre 44% y 51%, con los mayores valores para la CI; a su vez, esta clase se asocia con condiciones de humedad media, correspondientes a un perfil uniformemente fresco. Estos valores coincidirían con Pritchett (1986), quien expresa que la porosidad media en suelos forestales varía entre 35% y 65%.

El comportamiento de las propiedades químicas en relación con la calidad de sitio es variable, en la figura 3 se observa la variación que presentan algunos parámetros edáficos con la profundidad del perfil por clase de calidad de sitio.

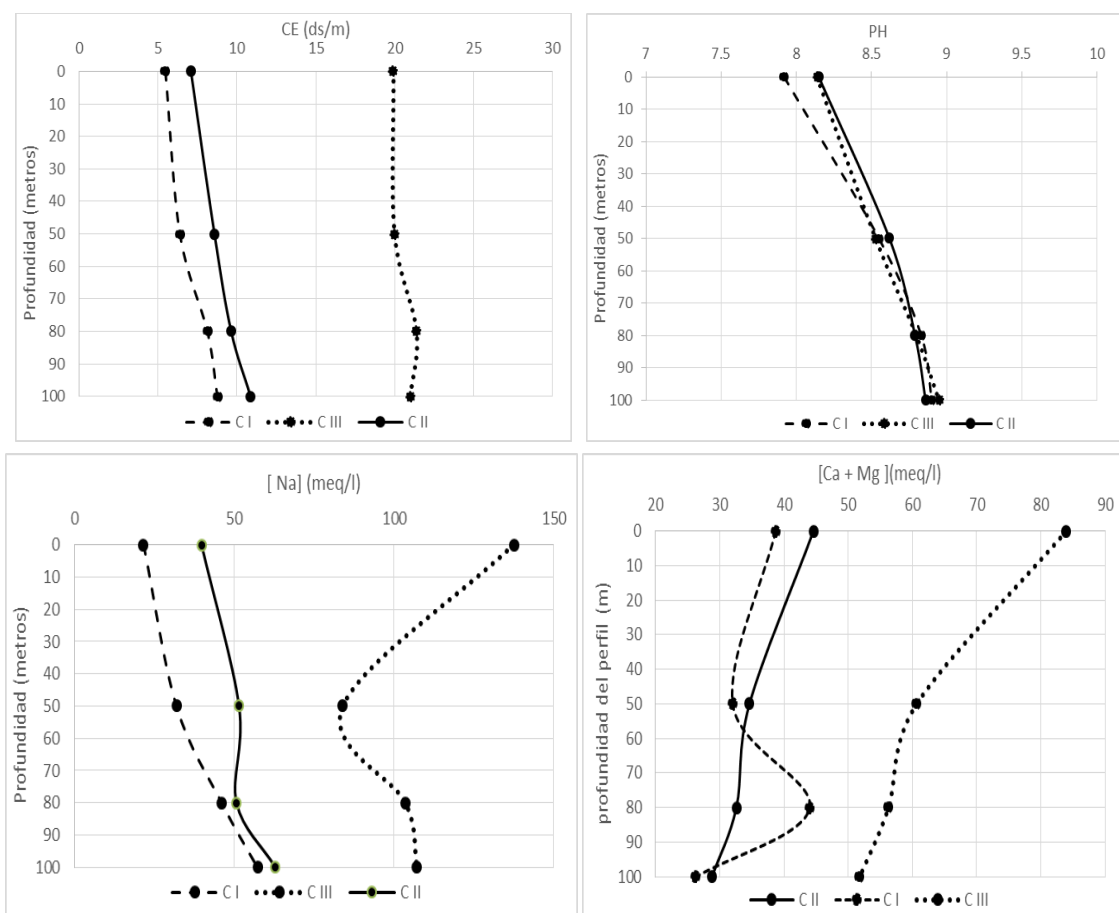


FIGURA 3. Variación de las propiedades químicas CE, PH, [ca+Mg] y [Na], en la profundidad del perfil y para cada clase de calidad de sitio.



La CE registró curvas diferentes para cada una de las clases, pero los valores dentro de la clase fueron homogéneos en profundidad. El pH se incrementó levemente en profundidad, pero no mostró diferencias entre clases. La concentración de los cationes solubles se diferenció entre clases, principalmente el sodio, que registró para las CI y CII concentraciones bajas en superficie y más altas en los horizontes profundos, al contrario de la CIII que registró altas concentraciones en superficie.

El comportamiento de los cationes solubles en el perfil de CI y CII podría indicar que existe cierta movilidad del Na desde la superficie hacia los horizontes más profundos, como resultado del aporte esporádico de agua de riego que se ha registrado en las plantaciones. Sin embargo, la CIII, aun teniendo aportes de agua, no presentó mejores condiciones, manteniendo mayor concentración de sodio en superficie.

Las propiedades químicas presentan diferencias altamente significativas entre clases de calidad de sitio y en

cada uno de los contrastes entre ellas (valor de F 4,13 $p < 0,0001$), a diferencia de las propiedades físicas. El análisis de componentes principales señaló que 85% de la variabilidad relacionada con la calidad de sitio se explica en el CP1 mediante algunas de las propiedades químicas evaluadas. En la figura 4 se observan las propiedades de mayor impacto en la determinación de las clases de calidad de sitio, con una alta correlación entre ellas y asociadas a la CIII.

Entre las variables de mayor influencia en el crecimiento estarían la CE, la RAS y los cationes solubles (Ca, Mg y Na), que poseen los mayores valores en los coeficientes y se asocian con la peor calidad de sitio (CIII). El pH no tendría gran impacto en el crecimiento. Las variables evaluadas hasta el momento podrían presentar correlaciones entre sí mismas, para evaluar esta situación se presenta, en tabla 2, la matriz de correlaciones.

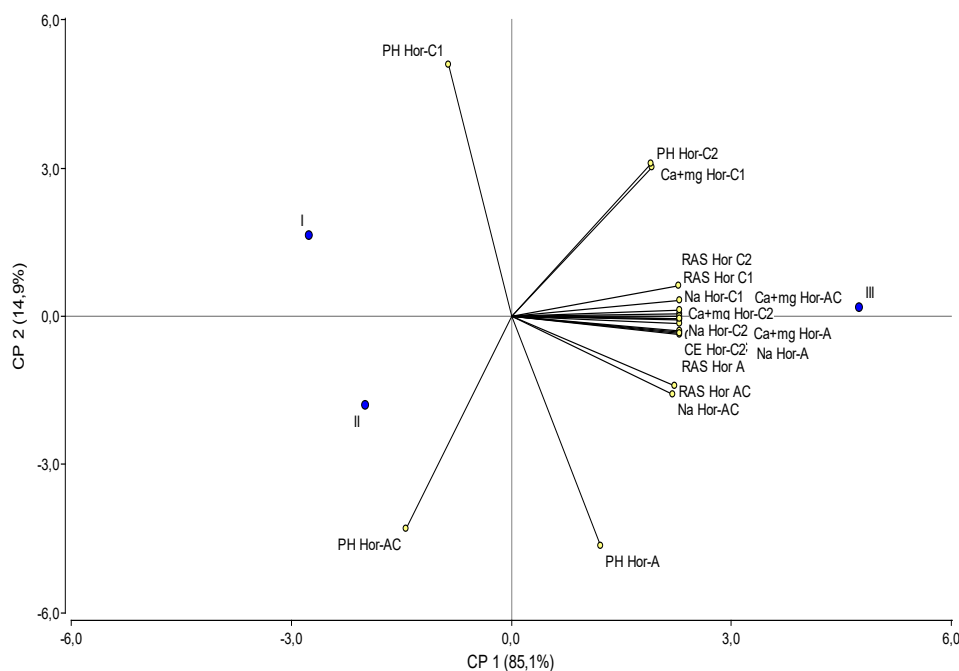


FIGURA 4. Relación de las variables químicas, ph, cationes solubles (Ca+Mg, Na) CE y RAS en diferentes horizontes del perfil, en relación con las clases de calidad de sitio I, II y III.

TABLA 2. Matriz de correlación de Pearson con 7 variables seleccionadas: CE en horizonte A, porosidad total en horizonte AC, pH en horizonte C1, textura, concentración de Na, Ca y Mg, RAS en horizonte A.

	CE	PT	PH	Textura	Na	RAS	Ca+mg
CE	1,00						
PT	-0,67	1,00					
PH	-0,27	0,19	1,00				
Textura	0,26	-0,24	-0,57	1,00			
Na	0,97	-0,73	-0,14	0,24	1,00		
RAS	0,65	-0,68	0,33	0,16	0,78	1,00	
Ca+mg	0,87	-0,63	-0,53	0,40	0,76	0,33	1,00

Se marcan en negrita las variables con los mayores valores de correlación.

Se observa una alta correlación entre la CE y la concentración de Na y de los cationes Ca+Mg en horizonte A. El Na también se correlaciona con la RAS y con la concentración de Ca+Mg, efecto predecible debido a la relación existente entre estos parámetros en términos de salinidad. Las correlaciones encontradas serán de utilidad al momento de definir las variables más explicativas del crecimiento en altura en los modelos de predicción.

De acuerdo con Senilliani *et al.* (2019), a cada clase de calidad de sitio enunciada le correspondería un IS, presentando la CI un IS de 10,1 la CII un IS de 8,1 y la CIII un IS de 6,1. Una mejor visualización del comportamiento de las variables químicas según el IS se presenta en la figura 5.

Se observó que la presencia de carbonatos es bastante uniforme y parece no representar una limitante importante para el crecimiento. El pH se comporta de forma similar, se registra un intervalo de 7 a 9, donde los rodales tienen IS desde bajos hasta altos; sin embargo, por encima de pH 9 asociado con altas CE, se reduce el crecimiento de la masa. La CE presenta un umbral aproximado de 10 dS m⁻¹ donde se registran IS de 8 y 10, por encima de este valor de CE disminuye el crecimiento de la masa. La concentración de cationes solubles también varía en relación con el IS, los rodales de mejor

crecimiento presentaron concentraciones bajas de sodio, llegando a un valor crítico de aproximadamente 39 mEq L⁻¹. Las calidades CII a CIII tienen un margen más amplio de tolerancia a la presencia de sodio en solución llegando a valores de 300 mEq L⁻¹, en algunos casos. La RAS, únicamente en la CI, no superó el valor de 15.

Relación crecimiento-suelo

La capacidad productiva de la especie está influenciada por el sitio, así lo expresan las variables de crecimiento. De las propiedades edáficas evaluadas, el pH y los carbonatos se mostraron invariables en las clases de calidad de sitio; por el contrario, la CE, la RAS, el Na, la suma Ca+ Mg y la PT presentaron mayor variación. La mayoría de estos parámetros característicos de las condiciones de salinidad en los suelos condicionan negativamente el crecimiento. La influencia de una alta CE en los suelos muestra su impacto sobre otras propiedades, Rhoades y Chanduvi, (1999) expresan que este parámetro se correlaciona directamente con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la capacidad de retención de agua y la porosidad, influyendo en la fertilidad. En coincidencia con este aspecto, se observa que los perfiles más salinos poseen problemas de drenaje por lo que se muestran mojados en profundidad.

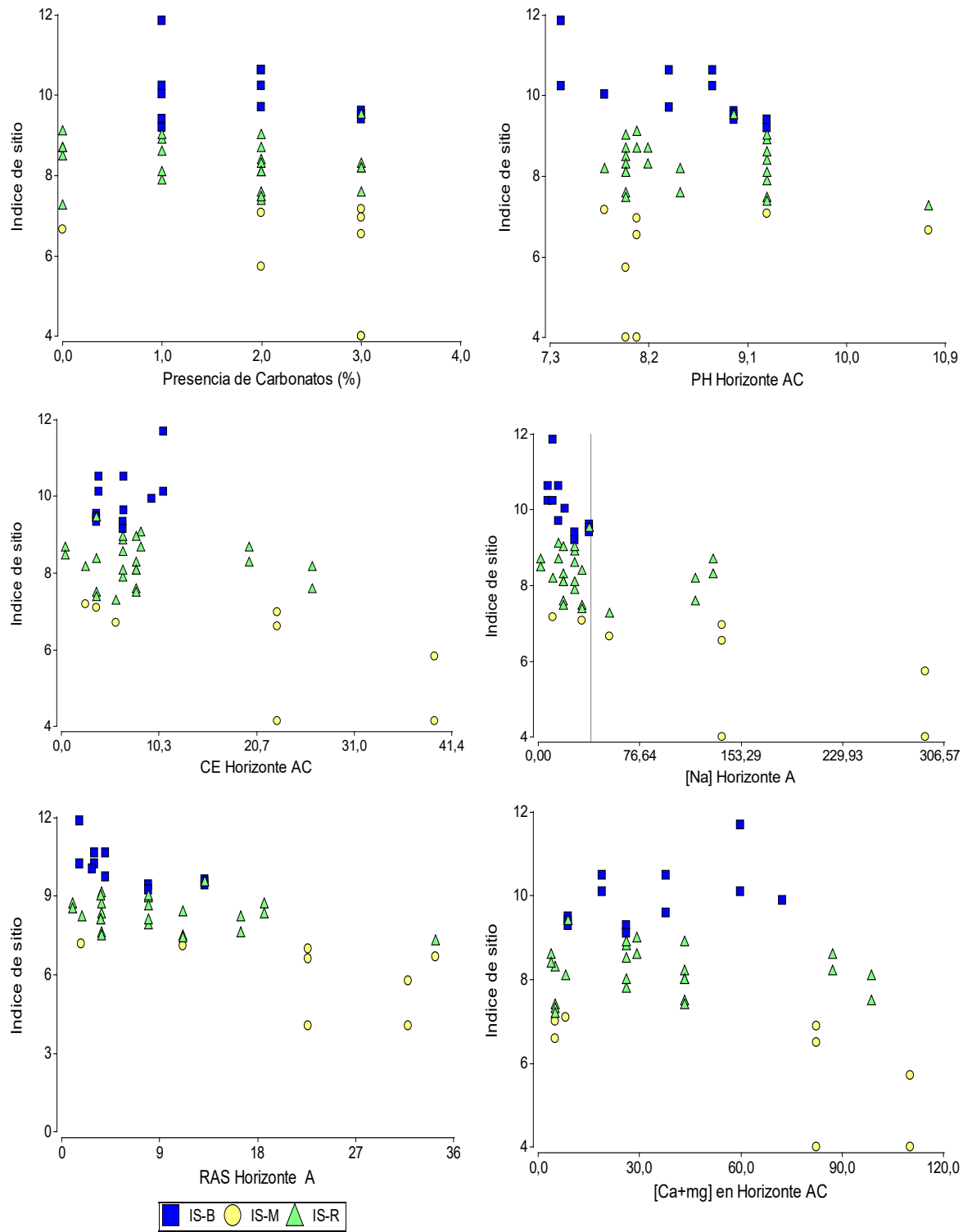


FIGURA 5. Relación del índice de sitio con el contenido de carbonatos en el perfil, pH, CE, cationes solubles y RAS en suelos de los rodales.

Otro aspecto que se debe considerar en suelos salinos es la fijación de nitrógeno a través del proceso de simbiosis. Diversos estudios documentan que este proceso se ve notablemente reducido en algunas especies agrícolas (Geetanjali y Neera, 2008) como también en especies forestales; Meloni, Gulotta, Martínez y Oliva (2004) evaluaron su influencia en plántulas de *Prosopis alba*. Si bien la salinidad afecta el proceso de infección de algunas micorrizas por la inhibición del crecimiento radicular (Geetanjali *et al.*, 2008), decreciendo el rendimiento por una simbiosis insatisfactoria (Hafeez, Aslam y Malik, 1988), hay registros de que la inoculación con la micorriza arbuscular *G. intraradices* en condiciones salinas mejora la tasa de sobrevivencia inicial durante el periodo de implantación (Scambato, Echeverría, Sansberro, Ruiz y Menéndez, 2010).

Umbral salino

El crecimiento de las plantaciones se ve influenciado principalmente por la salinidad de los suelos de la región, esto se refleja en la tabla 3 con valores umbrales para las clases de calidad de sitio, tomando como referencia rodales de más de 12 años de edad, en referencia a CE, Na en superficie, pH y RAS. La CI se corresponde con plantaciones en un intervalo de 8,4 m a 10 m de HD. La CII crece en un intervalo de 7 m a 8,4 m de HD. Las áreas con menor potencial de crecimiento (CIII) se caracterizan por HD de 4 m a 7 m y con la presencia de suelos clasificados como salino-sódico ($CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$; $RAS > 12$;

$pH < 8,5$). El pH es típico de un suelo con “salitre blanco”, con valores levemente superiores a 8, suelos en su mayoría, salinizados y sodificados alcalinos.

Las plantaciones registradas en CI y CII responden a perfiles salinos con niveles menores de CE y Na a iguales valores de pH que la CIII. Esto concuerda con lo expresado por Toll Vera Martín, Nicosia, Fernández, Olea, González Coletti y Agüero (2016), quienes observaron buen crecimiento en plantaciones de *Prosopis alba* en fase de establecimiento, tanto en suelos agrícolas como en suelos salinos sin presencia de capa freática salina, registrando baja sobrevivencia al tercer año de implantación en suelos salino-sódicos con saturación del perfil por aporte de la capa freática con drenaje impedido, presentando condiciones de hipoxia en la zona radical y gran parte de las plantas afectadas severamente.

Según Boscá (2007), citado en Sánchez, Dunel Guerra y Scherger (2016), la situación presente en el área de estudio, principalmente en suelos correspondientes a la CIII, muestra un proceso de salinización en los campos regados por elevación del plano freático y en los no regados por exfiltración debido al ascenso capilar.

Diversos autores confirman la tolerancia de la especie al estrés salino, común en las zonas áridas a semiáridas; según Meloni *et al.* (2004), plántulas de vivero de *Prosopis alba* toleran altos grados de salinidad (hasta 300 mmol L^{-1} de NaCl) en el sistema radicular, viéndose afectado su crecimiento ante concentraciones cercanas a 600 mmol L^{-1} de NaCl.

TABLA 3. Valores umbrales por clase de calidad de sitio, concentración de sodio en horizonte A (mEq L^{-1}), conductividad eléctrica del horizonte AC (dS m^{-1}), pH y RAS

Clases	Na	CE	PH	RAS
I	21,5	6,3	8,5	9,7
II	39,6	8,5	8,6	13
III	137,4	19,9	8,5	19



De las propiedades edáficas evaluadas en este estudio, se verifica que las propiedades químicas en los suelos de las plantaciones presentan un mayor impacto en el crecimiento de la especie, demostrando que son un factor de importancia en la planificación y toma de decisiones silviculturales.

Modelo de predicción del índice de sitio

Diversos estudios consideran las propiedades edáficas como factores determinantes en el crecimiento de especies forestales, así Bueno-López, Torres Herrera y García (2015) trabajaron en *Pinus occidentalis* en las principales regiones productivas de República Dominicana, estableciendo en este caso relación entre el IS y las variables edáficas y las fisiográficas, los autores consideraron a este método una herramienta indispensable en el manejo sostenible de estas áreas boscosas. En este trabajo, la estimación del IS para *Prosopis alba* se logró a partir de un modelo regresivo donde el coeficiente de determinación indicó que 42% de la variabilidad del IS resulta explicada por la variabilidad de los parámetros edáficos. Aunque el grado de precisión en el ajuste no es alto ($r^2 = 46$) Montero, Ugalde y Kanninen (2001) obtuvieron valores cercanos en estudios semejantes, para *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica. Igualmente, Mollinedo, Ugalde, Alvarado, Verjans y Rudy (2005) obtuvieron valores de $r^2 = 46$ para *Tectona grandis* en Panamá y, en el caso citado anteriormente para *Pinus occidentalis*, Bueno-López *et al.* (2015) obtuvieron un coeficiente de determinación mucho más bajo en el modelo definitivo que incluyó como variables: materia orgánica y porcentaje de arena, indicando que 29% de la variabilidad en el IS es explicada por estas dos variables predictoras.

Los valores de ajuste de la regresión mediante un análisis de regresión lineal múltiple se presentan en la tabla 4.

Se realizó la transformación de la variable “concentración de sodio en horizonte A” en potencia (POT_NaHor-A) para una mayor eficiencia del ajuste y se seleccionó como segunda variable la conductividad eléctrica del horizonte AC.

TABLA 4. Valores de ajuste de la regresión para el modelo de predicción del índice de sitio relacionado con variables edáficas según coeficiente de correlación, la desviación estándar residual (Sigma), criterio de información de Akaike (AIC); y criterio bayesiano de información de Schwartz (BIC)

Variable	R ²	Sigma	AIC	BIC
IS	0,42	1,18	194,84	201,79

Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y la homogeneidad de varianzas. Se ajustó la variable IS en función de las variables regresoras; la variable concentración de sodio y su interacción con la CE resultaron ser significativas en la regresión ($p > 0,008$ y $p > 0,04$, respectivamente). El modelo resultante fue:

$$IS = 8,81 - 1,9 \times 10^{-4} POT_Na.HorA + 3,6 \times 10^{-6} POT_Na.HorA * CEHorAC$$

Validación del modelo

La evaluación de la precisión indica errores aceptables para el modelo (Tabla 5). Se observa un error de 1,38 con un coeficiente de variación de 14%.

TABLA 5. Parámetros que miden precisión y variabilidad de la estimación del modelo: cuadrado medio del error promedio (ECMP) y coeficiente de variación (CV)

ECMP	1,38
CV	14%

Este estudio establece, en forma preliminar, valores de algunos parámetros edáficos de mayor impacto en el crecimiento, pudiendo orientar la selección de sitios de plantación.

Se visualiza un umbral salino a partir del cual el crecimiento se ve comprometido desde el punto de vista productivo, no así desde el enfoque de la rehabilitación de áreas degradadas, donde la especie puede cumplir un rol importante.

Si bien este estudio arroja datos preliminares para la diferenciación de áreas con buen potencial productivo de aquellos sitios que no lo son, se considera necesario profundizar la temática en la región.

CONCLUSIONES

Las propiedades químicas del suelo, CE, Na, Ca+Mg y RAS, parámetros característicos que describen las condiciones de salinidad de un sitio, son determinantes en el crecimiento de *Prosopis alba*. El crecimiento se ve condicionado negativamente por encima de un umbral salino, alterando la productividad de las masas forestales. La CE presenta un umbral de 10 dS m⁻¹ donde se registran IS de 8 y 10; por encima de este valor de CE, disminuye el crecimiento a IS 6. La concentración de Na como valor crítico es de aproximadamente 39 mEq L⁻¹. Si bien las propiedades químicas evaluadas son determinantes en el crecimiento, las propiedades físicas presentan cierta capacidad explicativa; entre estas, se cita la porosidad total en asociación con la humedad del perfil, con los mayores valores de porosidad y un perfil uniformemente fresco correspondiente a la CI. La CIII crece en sitios con un perfil húmedo-mojado que se incrementa con la profundidad del perfil y se asocia con la presencia de salinidad.

REFERENCIAS

- Assman, E. (1970). *The principles of forest yield study* (pp. 24-26). Oxford, UK: Pergamon Press.
- Bonelli, L. & Schlatter, J. (1995). Caracterización de suelos rojo arcillosos de la zona Centro-sur de Chile. *Bosque*, 16(2), 21-37.
- Bueno-López, S., Torres Herrera, J., & García, M. (2015). Factores edáficos-fisiográficos y calidad de sitio del *Pinus occidentalis* Sw. *Madera y Bosques*, 21(3), 83-93. doi: 10.21829/myb.2015.213458
- Burkart, A. (1976). A monograph of the Genus *Prosopis*. *Journal of the Arnold Arboretum*, 57(3-4) 219-240.
- Cisneros, A. & Moglia, J. (2017). *Prosopis alba*, alternativa sustentable para zonas áridas y semiáridas. En A. M. Giménez & J. G. Moglia. (Eds.) *Los bosques actuales del Chaco semiárido argentino. Ecoanatomía y biodiversidad. Una mirada propositiva Parte III Propuestas productivas*.
- Clutter, J., Fortson, J., Pienarr, L., Brister, G., & Bailey, R. (1983). *Timber management: A quantitative approach*. New York: John Wiley and Sons.
- De los Bueis Mellado, T. (2012). *Influencia de los parámetros edáficos, topográficos y climáticos sobre el índice de sitio de Pinus sylvestris en las masas de León y Palencia*. Tesis de Maestría. Universidad de Valladolid, España.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. (2018). InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de <http://www.infostat.com.ar>
- Ewens, M. & Felker, P. (2010). A comparison of pod production and insect ratings of 12 elite *Prosopis alba* clones in a 5-year semi-arid Argentine field trial. *Forest Ecology and Management*, 260(3), 378–383. doi: 10.1016/j.foreco.2010.04.030
- Geetanjali, M. & Neera, G. (2008). Review. Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30(5), 595–618. doi: 10.1007/s11738-008-0173-3
- Giménez, A. M., Ríos, N., Moglia, J.G., Hernández, P., & Bravo, S. (2001). Estudio de magnitudes dendrométricas en función de la edad en *Prosopis alba* Griseb, algarrobo blanco, Mimosaceae. *Forestal Venezolana*, 45(2), 175-183.
- Godagnone, R. & De La Fuente, J. (2001). Regionalización Ecológica del NOA. Instituto de Suelos CIRN-INTA.
- Hafeez, F., Aslam, Z., & Malik, K. (1988). Effect of Salinity and inoculation on growth, nitrogen fixation and nutrient uptake of *Vigna radiata* (L.) Wilczek. *Plant and Soil*. 106(1), 3-8. doi: 10.1007/BF02371188
- Juárez de Galíndez, M., Giménez, A., Ríos, N., & Balzarini, M. (2005). Modelación de crecimiento en *Prosopis alba* Griseb empleando dos modelos biológicos. *Quebracho*, 12, 34-42.
- Juárez de Galíndez, M., Giménez, A. M., Ríos, N., & Balzarini, M. (2008). *Determinación de la edad de aprovechamiento de individuos de Prosopis alba mediante un modelo logístico de intercepto aleatorio para incrementos radiales*. Chile: INFOR. Recuperado de <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/18818>
- Ledesma, T., de Bedia, G., & López, C. (2008). Productividad de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero. *Quebracho*, 15(5-9). Recuperado de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/nea01.pdf>
- Meloni, D., Gulotta, M., Martínez, C., & Oliva, M. (2004). The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycinebetaine accumulation in *Prosopis alba*. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 16(1), 39-46. doi: 10.1590/S1677-04202004000100006
- Méndez Paiz B. & Vanegas Chacón, E. (2016). Factores de sitio y crecimiento de plantaciones de Palo Blanco (*Tabebuia donnell-smithii* Rose) en Guatemala. *Revista Cubana de Ciencias*



- Forestales*, 4(2), 175-185. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5768632>
- Mollinedo, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J., & Rudy, L. (2005). Relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis*), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 67-75. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/436/43629107/index.html>
- Montero, M., Ugalde, L., & Kanninen, M. (2001). Relación del índice de sitio con los factores que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L.F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. Una herramienta práctica para el manejo de plantaciones forestales. *Recursos Naturales y Ambiente*, 35, 2001. Recuperado de <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RRNA/article/view/691>
- Navall, M., Ewens, M., Senilliani, M. G., & López, C. (2015). Efectos de la poda en plantaciones jóvenes de *Prosopis alba* Griseb en Santiago del Estero, Argentina. *Quebracho*, 23(1, 2), 77-91. Recuperado de <https://fc.unse.edu.ar/archivos/quebracho/v23n2a02.pdf>
- Page, A. L. (Ed) (1982). *Methods of soils analysis*. Part I and II. Madison Wis.: American Society of Agronomic.
- Pritchett, W. (1986). *Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento*. México D.F: Limusa.
- Rhoades, J. D., Chanduvi, F., (1999). Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *Food & Agriculture Org. FAO irrigation and drainage paper*, 57. Recuperado de <http://www.fao.org/3/x2002e/x2002e.pdf>
- Salto, C., Harrand, L., Oberschelp, G., & Ewens, M. (2016). Crecimiento de plantines de *Prosopis alba* en diferentes sustratos, contenedores y condiciones de vivero. *Bosque*, 37(3), 527-537. doi: 10.4067/S0717-92002016000300010
- Sánchez, R., Dunel Guerra, L., & Scherger, M. (2016). *Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina* (1a ed.). Buenos Aires: Ediciones INTA. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_h._ascasubi-estimacion-areas-salinas-argentina_2016.pdf
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable [SAyDS] (2018). Series estadísticas forestales 2010-2016. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/series_2010-2016_1.pdf
- Scambato, A., Echeverría, M., Sansberro, P., Ruiz, O., & Menéndez, A. (2010). *Glomus intraradices* improved salt tolerance in *Prosopis alba* seedlings by improving water use efficiency and shoot water content. *Brazilian journal Plant Physiology*, 22(4), 285-289. doi: 10.1590/S1677-04202010000400008
- Schlatter, J. & Gerding, V. (1995) Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. *Bosque*, 16(2), 13-20.
- Senilliani, M.G., Bruno, C., & Brassiolo, M. (2019). Site index for *Prosopis alba* plantations in the semi-arid chaco through mixed models. *Cerne*, 25(2), 195-202. doi: 10.1590/01047760201925022622
- Toll Vera, J. R., Martín, G. O., Nicosia, M. G., Fernández, M. M., Olea, L. E., González Coletti, A., & Agüero, S. N. (2016). Supervivencia de plantines de algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.) en suelos salinos y salino-sódicos del Departamento Río Hondo, Santiago del Estero. *Revista Agronómica Noroeste Argentino*, 36(1), 57-63. Recuperado de <http://www.faz.unt.edu.ar/ranar/ranar3618.pdf>
- Valle Arango, J. (1993). La predicción del sitio forestal para especies que se plantan en el trópico. *Revista Facultad Nacional Agropecuaria Medellín*, 46 (1y2), 47-69. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/29819/1/28490-102421-1-PB.pdf>

Manuscrito recibido el 3 de octubre de 2019

Aceptado el 11 de febrero de 2020

Publicado el **fecha**

Este documento se debe citar como:

Senilliani, M. G., Bruno, C., & Brassiolo, M. (2020). Factores edáficos y su impacto en la altura dominante en plantaciones de *Prosopis alba*. *Madera y Bosques*, 26(3), e2632054. doi:



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