



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN  
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO FORESTAL**

**Características edafológicas y potencial productivo de  
*Eucalyptus urophylla* y *E. grandis* en Huimanguillo,  
Tabasco**

**REYNA PÉREZ SANDOVAL**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

**2010**

---

---

# CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
RESUMEN .....	viii
SUMMARY .....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 Eucalyptus urophylla S.T. Blake y E. grandis.....	4
3.2. Eucalyptus grandis Hill ex Maiden .....	4
3.3 Ventajas de los clones de Eucalyptus urophylla S.T. Blake .....	5
3.4 Importancia de las plantaciones forestales.....	5
3.5 Productividad forestal y su evaluación por medio del índice de sitio .....	6
3.6 Propiedades del suelo y su relación con el crecimiento de los árboles.....	9
3.6.1 Densidad aparente.....	10
3.6.2 Materia orgánica.....	10
3.6.3 Agua en el suelo.....	12
3.6.4 Textura del suelo.....	12
3.6.5 Zona de intercambio catiónico en el suelo.....	13
3.6.6 Porcentaje de saturación de bases.....	14
3.6.7 Aluminio en el suelo.....	15
3.6.8 pH del suelo.....	18
3.6.9 Nitrógeno total .....	19
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
4.1 Localización del área de estudio.....	22
4.2 Material biológico.....	22
4.3 Clima .....	23
4.4 Orografía .....	23
4.5 Hidrografía.....	23
4.6 Principales Ecosistemas .....	23
4.7 Requerimientos ecológicos de Eucalyptus urophylla .....	24
4.7.1 Clima.....	24

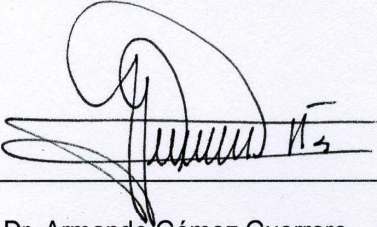
4.7.2 Suelo.....	24
4.7.3 Topografía.....	24
4.8 Muestreo de suelo.....	24
4.9 Análisis de laboratorio de las muestras de suelo.....	25
4.10 Determinación del porcentaje de saturación de bases y aluminio.....	25
4.11 Estimación del índice de sitio en las plantaciones.....	25
4.12 Modelos para la estimación de volumen.....	26
4.13 Análisis estadístico.....	27
<b>V. RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
5.1 Características dasométricas de los sitios de estudio.....	29
5.2 Características edafológicas de los sitios de estudio.....	31
5.3 Relación entre variables del suelo y variables de crecimiento sin considerar la fuente.....	32
5.4 Generación de modelos por fuente.....	39
5.4.1 Semilla.....	39
5.4.2 Clon.....	39
5.4.3 Mezcla.....	40
5.5 Análisis gráfico de la relación IS y variables edafológicas por fuente.....	40
5.5.1 Relación de IS con variables de suelo en el grupo de semilla.....	40
5.5.2 Relación de IS con variables de suelo en el grupo de clon.....	45
5.5.3 Relación de IS con variables de suelo en el grupo de mezcla.....	46
5.6 Generación de modelo de IS y análisis gráfico para E. grandis.....	46
<b>VI. DISCUSIÓN.....</b>	<b>48</b>
<b>VII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>VII. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>72</b>

La presente tesis titulada "Características edafológicas y potencial productivo de *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis* en Huimanguillo", Tabasco, realizada por REYNA PÉREZ SANDOVAL, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada como requisito para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS  
FORESTAL**

**CONSEJO PARTICULAR**

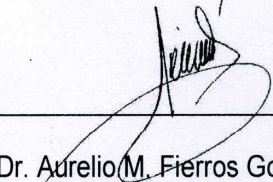
CONSEJERO



---

Dr. Armando Gómez Guerrero

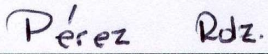
ASESOR



---

Dr. Aurelio M. Fierros González

ASESOR



---

Dr. Paulino Pérez Rodríguez

Montecillo, Texcoco, Edo. de México, Septiembre de 2010

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por el apoyo financiero otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

Al **Colegio de Postgraduados**, en especial al **Posgrado Forestal** por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios.

A la empresa **Forestaciones Operativas de México, S.A. de C.V. (FOMEX)**, por brindar el apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

Al **Dr. Armando Gómez Guerrero**, quien dirigió la presente investigación a través de la que se obtuvo el presente documento.

Al Dr. **Aurelio M. Fierros González** por sus valiosas aportaciones y observaciones a este trabajo.

Al Dr. **Paulino Pérez Rodríguez** por su contribución y conocimientos, a este trabajo.

Al **Dr. Héctor M. De los Santos Posadas**, por sus sugerencias a la realización del presente trabajo.

Al Ing. **Eric Gordillo López** y por el apoyo en la proporción de información, para la realización del presente documento.

Al Ing. **Juan Ramón Aguilar Rodríguez** por su apoyo en la recopilación de información, para la realización del presente documento.

## **DEDICATORIA**

*Con todo mi amor, a mi hijo Diego Jarquín, por ser mi gran tesoro y existencia en esta vida. Y por los momentos que no he estado a tu lado.*

*A mi esposo Juan Diego, por su comprensión, tolerancia, amor y su gran ayuda, para ser mejor cada día.*

*A mi padre Onésimo, por sus consejos de superación en la vida.*

*A mi madre Florentina, por su gran apoyo en la realización de mis sueños.*

*A mis hermanas, Marisela, Gabriela, Maricruz y Griselda por brindarme su amistad y cariño.*

*A mis sobrinos Bryan, Juan Pablo, Natanael, Eduardo y Damián, por ser la alegría de mis hermanas.*

*A mis abuelos, María, Juan, Marcela y Fidel†. Por ser personas admirables.*

*A toda mi familia extendida por brindarme la oportunidad de formar parte de ella.*

*A ti, por ser quien más extraño y amo, y vive presente en mi corazón†.*

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros dasométricos de los 49 sitios de estudio.....	29
Cuadro 2. Valores medios e indicadores de dispersión de las variables edafológicas de los 49 sitios de estudio. ....	31
Cuadro 3. Matriz de correlación de IS y propiedades edafológicas a la profundidad de 0 a 20 cm. ....	33
Cuadro 4. Matriz de correlación de IS y propiedades edafológicas a la profundidad de 20 a 40 cm. ....	33
Cuadro 5. Selección de variables edafológicas, por el procedimiento de "regresión por pasos", sin considerar la fuente de la planta.....	35
Cuadro 6. Análisis de la varianza de una regresión múltiple entre variables del suelo y crecimiento, sin considerar la fuente de la planta.....	36
Cuadro 7. Valores propios de la matriz de correlaciones estandarizadas. ....	37
Cuadro 8. Matriz de vectores propios.....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Localización del área de estudio. ....	22
Fig. 2 Relación entre MO y CIC en ambas profundidades.....	32
Fig. 3 Relación entre IS y contenido de arcilla en ambas profundidades .....	34
Fig. 4 Relación entre IS y contenido de aluminio .....	34
Fig. 5 Grafico de sedimentación.....	37
Fig. 6 Distribución de los grupos de planta.....	39
Fig. 7a y 7b Relación entre IS y capacidad de retención de humedad en las dos profundidades .....	41
Fig. 8a y 8b Relación entre IS y contenido de arcilla en las dos profundidades .....	41
Fig. 9a y 9b Relación entre IS y contenido de arena en las dos profundidades .....	42
Fig. 10a y 10b Relación entre IS y arcilla + limo en las dos profundidades.....	42
Fig. 11a y 11b Relación entre IS y pH en la profundidad de 0 a 20 cm, y Al de 20 a 40 cm.....	43
Fig. 12 Relación entre IS y CIC, en ambas profundidades.....	43
Fig. 13 Relación entre IS y porcentaje de saturación de aluminio en ambas profundidades .....	44
Fig. 14a y 14b Relación entre IS y relación (Mg+K/CIC) y Porcentaje de saturación de aluminio en ambas profundidades .....	44
Fig. 15 Relación entre IS y contenido de arcilla en ambas profundidades .....	45
Fig. 16 Relación entre IS y arena, e IS y arcilla + limo.....	45
Fig. 17 Relación entre IS y MO y arcilla en ambas profundidades .....	46
Fig. 18 Relación entre IS y porcentaje de saturación de aluminio e IS y limo .....	47



Características edafológicas y potencial productivo de *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis* en Huimanguillo, Tabasco.

Reyna Pérez Sandoval, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010.

## RESUMEN

Este trabajo se realizó en plantaciones establecidas por la empresa Forestaciones Operativas Mexicanas (FOMEX), en el Municipio de Huimanguillo, Tabasco, con la finalidad de encontrar relaciones entre variables del suelo superficial (0-20 y 20-40cm) y el crecimiento de plantaciones de *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis*. Como índice de crecimiento se utilizó índice de sitio (IS) y las variables edáficas estudiadas fueron: pH, materia orgánica, fósforo extractable, los cationes intercambiables: K, Ca y Mg. También se consideró la capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de bases, porcentaje de saturación de aluminio, densidad aparente, nitrógeno total, capacidad de retención de humedad a capacidad de campo y textura. Se colectaron muestras de suelo en 49 sitios con *Eucalyptus uruphylla* (con fuente de propagación por semilla, y clon) y en siete sitios de *E. grandis* (con fuente de propagación por semilla).

Los modelos de predicción para crecimiento de *Eucalyptus sp*, integran principalmente las variables: aluminio intercambiable, textura, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de aluminio, porcentaje de saturación de bases y materia orgánica. La predicción del crecimiento de *Eucalyptus sp* es mayor cuando la fuente de propagación es por semilla que cuando es por clon. Las plantaciones cuyo origen es por clon no se muestran afectadas por altos niveles de aluminio intercambiable; sin embargo, es posible que en la segunda rotación se muestren efectos negativos por aluminio, ya que el reservorio de nutrientes del suelo disminuye con el crecimiento de los árboles. El aluminio mostró un efecto positivo, lo cual es un resultado inesperado, se requiere investigar más sobre este hecho en particular. Para la especie de *E. grandis*, la variable cuya relación fue significativa con el IS es el contenido de limo.

**Palabras clave:** plantaciones forestales, suelo, productividad, *Eucalyptus*, Índice de sitio.

Soil characteristics and productivity of *Eucalyptus urophylla* and *E. grandis* in Huimanguillo, Tabasco.

Reyna Pérez Sandoval, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010.

### SUMMARY

This work was carried out in forest plantation established by Forestaciones Operativas Mexicanas (FOMEX), in the county of Huimanguillo, Tabasco, with the purpose of studying the relationship between surface soils variables (0-20 y 20-40cm) and tree growth in forest plantations of *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis*. The site index (IS) was used as a tree growth index and the soil variables studied were: soil pH, organic matter extractable phosphorous, exchangeable cations: K, Ca, and Mg. Other soil variables studied were cation exchange capacity exchangeable aluminum, base saturation, bulk density, total N, water at field capacity. Soil samples were collected from 49 sites of *Eucalyptus urophylla* (raised from seedlings and clone) and 7 sites of *E. grandis* (raised from seedlings).

Tree growth prediction models of *Eucalyptus* sp, include mainly soil variables like exchangeable aluminum, soil texture, base saturation and organic matter. Tree growth prediction from soil variables for *Eucalyptus* sp is higher when the source of the plantation was seedling instead of clone. Clone plantations did not show negative effects to high levels of exchangeable aluminum. More studies are needed for this results. However it is possible that in the second rotation some negative effects can appear as the nutrient reservoir is being depleted by tree growth. For *E. grandis*, the most significant variable was silt content.

**Keywords:** forest plantations, forest soils, soil productivity, *Eucalyptus*, Site Index.

## I. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales de las zonas tropicales proporcionan gran parte de la oferta de madera a nivel mundial; sin embargo, la demanda creciente de productos maderables indica que en el futuro se requerirá no sólo mayor superficie de plantaciones sino plantaciones con un rendimiento mayor (Laclau, 2009).

México cuenta con escenarios favorables para el establecimiento de plantaciones forestales; no obstante, es necesario adecuar políticas para facilitar el acceso a la tierra y que las plantaciones contribuyan de manera importante a resolver necesidades del sector forestal (CONAFOR, 2001). La generación de empleos, bienes y servicios ambientales son aspectos en los que las plantaciones bajo manejo sustentable pueden contribuir.

Algunos han estimado en el país un potencial de 10.7 millones de hectáreas para plantaciones comerciales; de estas, el 50% se encuentra en el sureste mexicano, específicamente en la región conocida como Golfo Sureste, la cual comprende los estados de Oaxaca, Veracruz, Tabasco y la Península de Yucatán (CONAFOR, 2003). Sin embargo, es importante considerar que estas cifras derivan de estudios de gran visión en donde la falta de información y de escalas apropiadas puede llevar a sobreestimaciones. El punto importante a considerar es que en México existe un potencial para las plantaciones forestales comerciales, el cual debe ser aprovechado de manera más eficiente por la industria con el apoyo gubernamental y de las entidades de investigación científica.

El trabajo de seleccionar sitios en función a la productividad del suelo es un método que conduce a la optimización de recursos en cada sitio (Mckenney y Pedlar, 2003; Delgado 2009). Las experiencias en estudios de plantaciones forestales muestran que el suministro de agua, nutrientes y acidez son los principales factores abióticos que afectan el crecimiento de las plantaciones en los trópicos (Gonçalves *et al.*, 1997, Fisher y Binkley, 2000, Stape *et al.*, 2004) y la medición de variables relacionadas directamente con estos factores es importante para la zonificación de productividad de las plantaciones (Laffan 1994, Coops *et al.*, 1998, Stape *et al.*, 2004). Además de las condiciones del suelo, los métodos

de preparación del suelo, la fertilización y las practicas silviculturales de la plantación, influyen en los rendimientos obtenidos (Stape *et al.*, 2004).

El presente trabajo, se diseñó para identificar las características edafológicas que deben tener las áreas idóneas para el establecimiento de las plantaciones comerciales de *Eucalyptus urophylla*, relacionando los parámetros dasométricos con las propiedades físicas y químicas del suelo. La finalidad de encontrar relaciones entre parámetros de crecimiento arbóreo y de suelo es generar herramientas de regionalización de la productividad basándose en procedimientos técnicos y científicos. Los terrenos bajo estudio son manejados por la Empresa de Forestaciones Operativas Mexicanas (FOMEX); la cual se encuentra ubicada en el Municipio de Huimanguillo Tabasco.

## II. OBJETIVOS

Asociar variables edafológicas con la productividad de plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis*, en la región de Huimanguillo Tabasco.

Relacionar las variables dasométricas de plantaciones de *Eucalyptus urophylla* cuya fuente fue semilla o clon, con las propiedades físicas y químicas del suelo.

Relacionar las variables dasométricas de plantaciones de *Eucalyptus grandis* cuya fuente fue semilla con las propiedades físicas y químicas del suelo.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake y *E. grandis*

La distribución natural del género *Eucalyptus* y la determinación de especies no se ha definido completamente, de hecho todavía hay especies en Indonesia que no han sido reconocidas por la falta de caminos e infraestructura (Wright y Osorio, 1998). Según la literatura, *E. urophylla* es nativa de una región de islas del Archipiélago de Sumba en Indonesia oriental, aunque el establecimiento de las plantaciones más grandes se encuentra en Brasil. Con relación a su distribución altitudinal, *E. urophylla* se establece de 90 a 3000 msnm, y es la más amplia de todas las especies de eucalipto (Gunn y McDonald, 1991, Wright y Osorio, 1998).

*E. urophylla*, pertenece a la familia de las mirtáceas, es un árbol de rápido crecimiento, que puede alcanzar 15 a más de 20 m de altura y 40 cm de diámetro normal. Presenta una corteza lisa, color crema o manchas rosadas. Las hojas jóvenes son pecioladas, redondeadas a ovoides. Es tolerante a suelos de baja fertilidad y de textura gruesa; no tolera suelos muy arcillosos con capa freática superficial o drenaje deficiente. Crecen mejor en suelos que conservan humedad residual en la estación seca (Nieto y Rodríguez, 2003). Se adapta a temperaturas medias anuales de 24 a 28 °C y precipitación anual de 2000 a 3000 mm. Su madera es muy dura y no se rompe fácilmente, es utilizada principalmente para pulpa y tableros. Debido a que la especie no presenta grandes requerimientos edáficos, es útil para la reforestación, tanto en suelos inundados y secos de las partes tropicales (Nieto y Rodríguez, 2003).

#### 3.2. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

La especie de *Eucalyptus grandis*, es nativa de la costa este de Australia, ubicándose desde el sur de Gales, hasta el norte de Queensland. Se le puede encontrar en laderas bajas y valles profundos y fértiles. Alcanza una altura de 43 a 45 m y un diámetro de 122 a 183 cm. Posee fustes claros, rectos y altos. La

corteza es delgada y caediza, desprendiéndose en fajas para revelar una superficie lisa marcada con unos patrones ondulantes blanco plateado. Soporta temperaturas de 24 a 40 °C, con precipitaciones de 1000 a 4000 mm y altitudes hasta 2700 msnm, tolera rangos de pH 5.5 a 7.5 y crece muy bien en suelos de textura media. La planta es sensible a la deficiencia de boro, es muy sensible al fuego y tolerante a la sal; su potencial productivo anual de madera es de 17 a 70 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. (FAO, 2000).

### **3.3 Ventajas de los clones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**

Las plantaciones producidas por clones se han introducido con éxito en Brasil, Zimbabwe, Sudáfrica, Congo, China, sureste de Asia y México, por su velocidad de crecimiento (Wright, 1997), resistencia a enfermedades fúngicas, habilidad de rebrote (Eldridge *et al.*, 1994) y variabilidad genética (House y Bell, 1994; Wright, 1997; Sánchez, 2004).

Una de las ventajas en la domesticación de la especie es la facilidad de propagación vegetativa, que permite reproducir masivamente individuos deseables en programas clonales (Eldridge *et al.*, 1994; Sánchez, 2004). Las plantaciones clonales, generan una mayor uniformidad de la madera, además permiten incorporar más rápidamente a la fase operativa los resultados del mejoramiento genético (Jayaraj *et al.*, 1996; Sánchez, 2004).

La mejora genética y las prácticas silviculturales intensivas en las plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil, han hecho que sus ecosistemas sean algunos de los más productivos (>40 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año de madera) del mundo (Hubbard, 2010).

### **3.4 Importancia de las plantaciones forestales**

Las plantaciones forestales, además de generar productos y empleos, favorecen la generación de servicios ambientales como protección del suelo, captura de carbono y regulación de procesos hidrológicos. Aunque desde el punto de vista de conservación de la biodiversidad es preferible el uso de especies nativas, el uso de especies de *Eucalyptus* ofrece algunas ventajas como son turnos de

aprovechamiento más cortos y protección del suelo en el corto plazo, que son fundamentales para desarrollar proyectos forestales financieramente y ambientalmente viables (White, 2002; Martínez *et al.*, 2006; Téllez *et al.*, 2008).

Las estimaciones de la superficie total de plantaciones forestales en el mundo oscilan de 120 y 140 millones de hectáreas. Existe un aumento de plantaciones en terrenos donde previamente no había árboles (forestación), tanto en los países templados como en los tropicales. Especialmente en los trópicos la tasa actual de plantación es de 2 a 3 millones de hectáreas anuales, el doble de la registrada en los años 60's y 70's (FAO, 1993; Martínez *et al.*, 2006).

En el trópico Mexicano, con el uso de especies nativas se obtendrían incrementos anuales del orden de 5 a 10 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en turnos mínimos de 15-20 años, mientras que con especies de *Eucalyptus* los crecimientos serían del orden de 30 a 50 m<sup>3</sup>/ha/año y los turnos se reducirían de 7-10 años (Lindenmayer y Cunningham, 2000; Martínez *et al.*, 2006).

### **3.5 Productividad forestal y su evaluación por medio del índice de sitio**

En los sistemas manejados como las plantaciones, las unidades de manejo son frecuentemente plantaciones de la misma edad establecidas en una determinada zona productiva. El silvicultor deberá prescribir, por lo general, tratamientos basándose en las características individuales de los árboles. La condición homogénea de las plantaciones ayuda a considerar la altura de los arboles como una medida del potencial productivo. Este procedimiento se conoce como el índice de sitio y se refiere a la altura máxima lograda por los arboles dominantes en un sitio dado, a una edad determinada (Clutter *et al.*, 1983). Por ello, en cada sitio es necesaria la identificación de los arboles dominantes cuyas copas se elevan por encima del nivel general del dosel superior y tienen ventaja sobre otros en la captación de luz, nutrientes y agua (Daniel *et al.*, 1982). Para (Spurr y Barnes 1980, Chen *et al.*, 1998), el índice de sitio, es la altura superior de los arboles dominantes y codominantes a una edad de referencia, el cual ha sido ampliamente utilizado, para medir la productividad potencial forestal de una



especie dada, bajo el supuesto de que el crecimiento en altura no se vea afectado por factores como la supresión y el daño debido a enfermedades o insectos.

En forma directa, la productividad de los terrenos forestales se estima mediante la máxima cosecha de madera que un bosque o plantación produzca en un tiempo determinado. Esta productividad máxima depende de las condiciones ambientales de un lugar dado y para fines forestales el conjunto de tales condiciones integra la calidad de estación de un sitio. Dentro de un cierto microclima, la calidad del sitio determina el tipo y magnitud de los problemas y oportunidades que se le presentan al silvicultor para el manejo de una plantación (Daniel *et al.*, 1982).

Según, (Spurr y Barnes, 1980), la productividad de los bosques está determinada por la radiación solar, la temperatura, el agua, los nutrientes, la aireación del suelo y las interacciones bióticas de los factores que afectan el crecimiento de las plantas vasculares. Para varios ecosistemas forestales, la identificación de atributos ambientales de la productividad y desarrollo de modelos para predecir la productividad continua siendo el mejor método (Chen, *et al.*, 1998).

La calidad del terreno es una cuestión esencial en el manejo de los rodales encaminada a la producción de varias combinaciones de productos forestales: madera, agua, forrajes, recreación y caza. No es posible tomar decisiones válidas, de tipo silvícola, si no se hace referencia a la calidad de sitio y a otras condiciones de este (Daniel *et al.*, 1982).

La calidad de sitio depende de muchos factores ambientales entre los que podemos citar: profundidad del suelo, textura, régimen hídrico y de aireación, su composición mineral, topografía, exposición y microclima, (Daniel *et al.*, 1982).

En plantaciones forestales cuyo propósito es la producción de madera, la calidad de sitio se define como su potencial para producción de madera de una especie, y se espera que las mejores calidades tengan mayores rendimientos (Clutter *et al.*, 1983; Carrero, 2008).

Particularmente, en el caso de plantaciones la productividad de un sitio, se determina principalmente por tres componentes: (1) propiedades del suelo y medio ambiente, (2) manejo de la plantación, y (3) genética de los árboles (Henri, 2001). Es importante destacar que las propiedades del suelo son una parte

compleja de interacción que define la productividad del sitio y una vez identificadas las variables principales la elección de un sitio con características edáficas adecuadas para el crecimiento de los árboles, reducirá los costos en la plantación (Henri, 2001).

Las predicciones exactas de índice de sitio, son esenciales en el manejo forestal, y en la toma de decisiones particularmente en el sitio y con especies específicas. Los modelos empíricos para cada especie proporcionan herramientas simples y eficientes para la estimación del índice de sitio, usando modelos de intercepción de crecimiento en altura para rodales jóvenes de crecimiento libre. Estos modelos, sin embargo, no son aplicables donde los árboles no están presentes (Chen, *et al.*, 1998). Un método alterativo para la predicción de índice de sitio está basado sobre relaciones entre índice de sitio y variables ambientales o nutrientes foliares (Fralish, 1994, Wang, 1995, Chan, *et al.*, 1998). Para (Carmean, 1975 y Delgado, 2009), mencionan también, que para evaluar la productividad del sitio y planear actividades es necesaria la presencia de arbolado del sitio, y ello es posible relacionando el índice de sitio con otras variables como las propiedades del suelo y de esta manera pronosticar la productividad.

Los factores ambientales varían con el tiempo, las medidas indirectas de variables ambientales pueden ser utilizadas para examinar la relación entre índice de sitio y calidad de sitio, el cual es definido como la suma de todos los factores ambientales que afectan la comunidad biótica de un ecosistema (Spurr y Barnes, 1980). Para predecir el índice de sitio, por ejemplo, se tiene a la longitud, la latitud y la elevación que pueden ser usadas como medidas indirectas de un clima regional. (Klinka, *et al.*, 1996), la posición de la pendiente, el gradiente de la pendiente, se han utilizado como medidas de clima local.

Las condiciones de humedad disponible en el suelo y nutrientes (Wang, 1995), y diversos estratos de vegetación, o clasificaciones ecológicas, pueden ser usadas como una medida de calidad general del sitio (Chen *et al.*, 1998). Las mediciones directas del piso forestal y propiedades físicas y químicas del suelo o nutrientes en follaje (Wang, 1995), se han relacionado con el índice de sitio, para explicar las variaciones en la productividad del sitio. Sin embargo, estos modelos rara vez han sido validados, y existe una incertidumbre del como las diferentes medidas de

calidad de sitio considera las variaciones de índice de sitio y el grado de eficiencia que tienen los modelos.

Es de importancia mencionar, que el índice de sitio ha sido el más utilizado para determinar la calidad de sitio en masas forestales coetáneas y se basa en los siguientes supuestos: 1) la altura mayor, en un rodal monoespecífico y coetáneo es poco influenciada por la densidad de la plantación; 2) el crecimiento en altura mayor de un rodal sigue un patrón predeterminado; y 3) la altura mayor se correlaciona bien con la producción volumétrica (Clutter *et al.*, 1983; Carrero, 2008).

La edad base es un criterio subjetivo que puede depender de la rapidez de crecimiento de la especie y/o turno de aprovechamiento. Usualmente se escogen edades próximas al turno técnico (Clutter *et al.*, 1983; Carrero, 2008) o cuando se alcanza el máximo crecimiento medio en altura para la especie (Andenmatten y Letourneau, 1998; Carrero, 2008).

Este método implica el desarrollo de un conjunto de curvas que representan patrones de crecimiento en altura en función de la edad, cada una con un valor numérico o cuantitativo asignado, de acuerdo a la altura alcanzada a la edad base Clutter *et al.*, 1983; Carrero, 2008). Dichos patrones pueden representarse con modelos matemáticos flexibles (Grey, 1989; Carrero, 2008).

### **3.6 Propiedades del suelo y su relación con el crecimiento de los árboles**

La calidad del suelo es un factor importante en la toma de decisiones para manejo forestal. El suelo determinará las especies de árboles que crecerán y producirán un mayor volumen de madera, el tiempo de cosecha y en última instancia, la inversión que debe hacer el propietario y así obtener un rendimiento económico aceptable de manejo forestal (Hamilton, 1995).

Los factores que tienen un impacto sobre la productividad de los suelos forestales son: la profundidad, textura, pH, porcentaje de saturación de bases y drenaje interno, entre otras (Hamilton, 1995). A continuación se mencionan algunas propiedades relevantes para la productividad forestal.

**3.6.1 Densidad aparente.** La densidad aparente (o peso por volumen), es la relación masa - volumen dado de suelo. A diferencia de la densidad de las partículas, que considera solamente las partículas sólidas, las mediciones de densidad aparente incluyen el espacio ocupado por el aire y por lo tanto está relacionada con la porosidad (Pritchett, 1991).

La densidad aparente da información sobre la relación suelo-agua, y de las condiciones físicas y mecánicas del suelo (Forsythe y Díaz-Romeu, 1969; Alvarado, 2005). La densidad aparente sirve como un índice de la penetrabilidad del suelo por las raíces y un valor crítico en suelos forestales va de 1.2 a 1.5, dependiendo de la textura del suelo (Fisher y Blinke, 2000).

La densidad de la fracción mineral del suelo varía de 2.60 a 2.75 Mg m<sup>-3</sup>, mientras que la densidad aparente de los horizontes orgánicos superficiales es de alrededor de 0.2 Mg m<sup>-3</sup>. Es común que los valores de la densidad aparente aumenten cuando en algún horizonte hay migración de arcilla, como ocurre en horizontes argílicos, donde la arcilla se deposita sobre los agregados del suelo reduciendo el espacio de vacíos (Alvarado, 2005). En los suelos tropicales del orden de los Oxisoles, la densidad aparente es relativamente baja y puede oscilar entre 1.0 y 1.3 Mg m<sup>-3</sup>, dependiendo del contenido de arena (Van Wambeke *et al.*, 1983; Alvarado, 2005). Un caso particular lo representan los Andosoles donde las densidades son menores a 0.9 Mg m<sup>-3</sup> y los valores de 1.0 Mg m<sup>-3</sup> podrían indicar daños al suelo (Vásquez, 2010). Según, Mishra *et al.*, (2003), la densidad aparente, disminuye conforme aumenta la edad de las plantaciones de *Eucalyptus tetericornis*, lo que se explica por el incremento de microorganismos del suelo en la fracción orgánica y la actividad biológica que dan lugar a un mejor balance entre macro y microporos del suelo.

**3.6.2 Materia orgánica.** La materia orgánica del suelo, juega un papel crítico en sus condiciones físicas: es una mezcla compleja y variada de sustancias orgánicas que favorecen una mayor capacidad de intercambio catiónico y de retención de agua en los suelos. Los componentes son responsables de la formación y estabilización de los agregados del suelo. Contiene grandes cantidades de nutrientes para las plantas y actúa como un almacén de liberación de ellos, especialmente nitrógeno (Brady, 2000). Existe una relación directa entre

la cantidad de materia orgánica y el N total del suelo, se estima que en la materia orgánica existe 5% de N total, pero también otros elementos esenciales para las plantas, tales como fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes (Graetz, 1997; Julca, 2006).

Los residuos vegetales y los microorganismos del suelo constituyen la fracción celular de la materia orgánica. A medida que avanza la descomposición, se incrementa la materia orgánica (humus) resultante de la actividad microbiana (Schlesinger, 1997). La estructura del humus es poco conocida, pero contiene numerosos anillos aromáticos fenólicos ( $\text{C}=\text{C}-\text{OH}$ ) y grupos de ácidos orgánicos ( $\text{C}=\text{C}-\text{COOH}$ ) (Flaig *et al.*, 1975; Stevenson, 1986 y Schlesinger, 1997).

El humus tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose las arcillas y formando el complejo de cambio, favoreciendo la adsorción del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso (Graetz, 1997; Julca, 2006).

En cuanto a las propiedades químicas, aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal y la capacidad tampón del suelo favorece la acción de los abonos minerales y facilita la absorción a través de la membrana celular de las arcillas. En cuanto a su efecto en las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización ya que es el sustrato básico de los microorganismos, el desarrollo de la cobertura vegetal, sirve de alimento a los microorganismos y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado (Graetz, 1997; Julca, 2006).

Cuando el suelo se encuentra bajo cultivo, el contenido de materia orgánica disminuye. Las pérdidas de materia orgánica de muchos suelos es de alrededor de 20 a 30% en las primeras décadas (Mann, 1986; Schlesinger, 1997). Las pérdidas de materia orgánica resultan por la erosión y la oxidación de  $\text{CO}_2$  y la liberación a la atmósfera. Cerca del 10% de los suelos del mundo están bajo cultivo, la tasa actual de liberación de carbono de estos suelos es de alrededor de  $0.8 \times 10^{15}$  g C/año lo que depende de la tasa de respiración de los ecosistemas naturales. Especialmente cuando se hace cambio de uso de suelo de forestal a agrícola en los trópicos (Schlesinger, 1997).

Según Mustín (1987), la materia orgánica representa del 95 al 99% del total del peso seco de los seres vivos, pero en la mayoría de los suelos la materia orgánica representa alrededor del 2%. El nivel deseable de materia orgánica en los suelos de textura media es del 2%, del 1.65% en suelos arcillosos y en arenosos de 2.5% (Julca, 2006).

Lima *et al.*, (2006) encontraron que después de la conversión de pastos a plantaciones de eucalipto en dos regiones del sureste de Brasil, la proporción de materia orgánica en el suelo incremento en un 20%, probablemente como resultado de la descomposición de raíces y la interacción órgano-mineral.

Por su parte Vogt *et al.*, (1986), mencionan que la senescencia de las raíces, contribuye a que haya más descomposición de la materia orgánica y mineralización del nitrógeno, fosforo y azufre.

**3.6.3 Agua en el suelo.** El aprovisionamiento de humedad en el suelo determina en gran medida por las condiciones físicas y la demanda de la vegetación existente influyen en el balance hídrico (Pritchett, 1991). Al igual que los suelos arenosos, los suelos con muchos agregados alcanzan la capacidad de campo en tensiones relativamente bajas (Uehara, 1981). Los suelos que contienen de 60 a 80% de arcilla retienen más agua aprovechable que los suelos arenosos. Aunque el límite crítico de agua aprovechable es a -1.5 MPa, la mayoría de las plantas, elimina el agua disponible en el momento que la presión está a -0.6 MPa de presión (Uehara, 1981).

Mishra *et al.*, (2003), evaluaron los cambios de características físicas y químicas de suelos sódicos en plantaciones de *E. tetericornis* de 3, 6 y 9 años de edad, en la India. Los resultados muestran una mejora física y química en el suelo por la acción de las raíces y procesos de incorporación de materia orgánica. Además, encontraron que la porosidad, la retención de agua y la capacidad de campo del suelo aumentaron con la edad de la plantación, es decir, con el tiempo de la interacción.

**3.6.4 Textura del suelo.** La textura del suelo se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo. Esta propiedad ayuda a determinar la facilidad

de abastecimiento de nutrientes, agua y aire que son fundamentales para la planta (Schoenholtz *et al.*, 2000). La relación entre superficie específica y tamaño de partículas de suelo hace que hasta cierto punto haya una relación entre el grado de fertilidad y la textura del suelo. Las texturas de media a fina de suelos ricos en materia orgánica favorecen su fertilidad.

**3.6.5 Zona de intercambio catiónico en el suelo.** Se considera que el intercambio catiónico es de mayor importancia que el intercambio iónico, debido a que la mayor parte de los minerales esenciales son absorbidos por las plantas en forma de cationes (Pritchett, 1991). Los cationes como calcio, magnesio, potasio, amonio, sodio, aluminio, hierro e hidrógeno, están cargados positivamente y son atraídos hacia la superficie cargadas negativamente de las partículas coloidales del suelo, tanto minerales como orgánicas. La carga negativa en la materia orgánica se genera en los grupos carboxilo e hidroxilo ( $-\text{COOH}$  y  $\text{OH}$ ), mientras que en la fracción mineral las cargas negativas se derivan principalmente de la sustitución isomórfica (Pritchett, 1991).

La densidad de cargas del suelo se expresa en miliequivalentes por 100 g de suelo seco o bien en centímoles carga por kilogramo de suelo seco ( $\text{Cmolc/kg}$ ), ambos indicadores son numéricamente equivalentes. A esta característica se le llama capacidad de intercambio catiónico (CIC). La CIC de un suelo se determina por lo general por el desplazamiento de la masa de los diversos cationes en una solución salina acuosa (como el acetato de amonio). Los iones de amonio, que saturan los sitios de intercambio, son extraídos por una sal diferente, como el cloruro de potasio. La cantidad de iones de amonio desplazados en la suspensión por una segunda sal, es una medida de la capacidad de intercambio catiónico del suelo que se trate. Cabe señalar que la capacidad de intercambio catiónico de un suelo no es una cantidad fija, si no que depende del pH y de la solución extrayente que utilice (Pritchett, 1991).

La carga total sobre los coloides del suelo consta de dos componentes: una carga permanente y una carga que depende del pH. Se considera que la primera proviene de una sustitución isomórfica en la estructura mineral de las arcillas. En tanto que se considera que en la segunda es el resultado de los grupos carboxilo sobre la materia orgánica del suelo y de ionización del hidrógeno de los grupos

OH a lo largo de las orillas irregulares de las rejillas de arcilla (Coleman y Thomas, 1967).

La capacidad de intercambio de cationes en los suelos forestales depende en gran medida de las cargas en la materia orgánica las cuales son dependientes del pH. Esto ocurre especialmente en muchos suelos forestales cuya fracción coloidal se compone sobre todo de material orgánico y minerales arcillosos en una proporción 1:1 como consecuencia, de la capacidad real de intercambio catiónico de aquellos suelos puede ser mucho menor que la que se mide en el acetato de amonio normal neutral (Pritchett, 1991).

La característica que hace que los suelos tropicales sean diferentes de los templados, son los procesos intensos de lavado que conducen a una pérdida intensa de cationes en la zona de intercambio. Además el mayor intemperismo químico en el trópico conduce a la formación de suelos con baja CIC. La capacidad de intercambio catiónico, es usualmente usado como un índice de fertilidad del suelo (Uehara y Gavin, 1981).

**3.6.6 Porcentaje de saturación de bases.** El grado en que todos los sitios de intercambio catiónico del suelo son ocupados por las “bases”, como el calcio, magnesio, potasio y sodio, se llama porcentaje de saturación de bases (Pritchett, 1991). La mayor parte de los suelos forestales poseen un grado bajo de saturación de bases, pero esto depende del clima y de los materiales a partir de los cuales se formaron los suelos, así como la vegetación que sostiene. Por regla general, el pH y el nivel de fertilidad de un suelo determinado aumentan en la misma medida que aumenta el grado de saturación de bases. Esto es consecuencia no solamente del aumento cuantitativo en las bases de suelo, también de la facilidad con que las bases son liberadas por el suelo y absorbidas por las plantas (Pritchett, 1991).

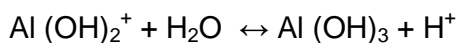
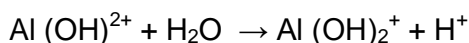
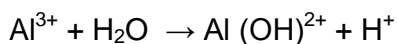
Rhoades y Binkley, (1996), analizaron la relación del porcentaje de saturación de bases y pH en Eucalipto en Hawaiian, y encontraron un porcentaje de variabilidad total del 70%. La conexión entre la saturación de bases y el pH se deriva del hecho de que la saturación de base es un índice parcial de la disociación del ácido (Brady, 1984).



La relación entre el porcentaje de saturación de base y la disponibilidad de cationes está influenciada por el tipo de coloides del suelo. Los suelos que tienen un alto porcentaje de coloides orgánicos y arcillas de tipo 1:1 pueden proporcionar cationes básicos a las plantas en un nivel inferior de saturación de bases que los suelos que contienen un alto nivel de coloides de tipo 2:1, una situación afortunada para la mayor parte de los árboles de los bosques (Pritchett, 1991). La explicación es, nuevamente, por la superficie específica mayor en arcillas 2:1.

**3.6.7 Aluminio en el suelo.** El aluminio es uno de los metales más abundantes y no se encuentra en la naturaleza en forma de elemento libre, si no formando parte de minerales. Combinado con el silicio se encuentra en feldespatos, micas y caolín. La solubilidad, y por lo tanto las formas químicas del aluminio en el suelo, se encuentran estrechamente relacionadas con el valor de pH del medio. La forma iónica de aluminio  $\text{Al}^{3+}$  es considerada tóxica para la raíz y la asociación con micorrizas, y se encuentra en la solución en el suelo a valores de pH menores a 5 (Alcántar y Téllez, 2009).

En el trópico húmedo, los suelos altamente degradados, están dominados por minerales de hidróxido de aluminio, que prácticamente, no ofrecen capacidad de intercambio catiónico en la fracción mineral bajo su condición natural de pH (Schlesinger, 1997). Los suelos son amortiguados por varias reacciones geoquímicas incluyendo el aluminio. El aluminio no es un catión base, en la medida que se conduce a la liberación del suelo hay formación de  $\text{H}^+$ , el  $\text{Al}^{3+}$  es precipitado como hidróxido de aluminio:



Esta cantidad de reacciones, ocurren en los suelos del trópico húmedo y las reacciones son reversibles (Schlesinger, 1997). Las especies de Al monohidróxido [ $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  y  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ], presentes en la solución del suelo a valores de pH entre 5 y 6.2, no son tóxicos para las plantas (Alcántar y Téllez, 2009).

La capacidad de adsorción de aniones, en contraste permanente, de la carga negativa de los suelos de las zonas templadas, los suelos tropicales se encuentran dominados por óxidos y óxidos de hidruros de hierro y aluminio y

muestran carga variable, dependiendo del pH del suelo (Sollins *et al.*, 1988; Schlesinger, 1997).

El aluminio es el principal componente de la acidez intercambiable que afecta el desarrollo de las plantas. En los suelos minerales ácidos, existe muy poco hidrógeno intercambiable y solamente en suelos ácidos con un alto contenido de materia orgánica se encuentra algo de él (Estrada, 2004). Los problemas de la acidez del suelo están asociados con niveles de pH menores de 5,5 y la presencia de aluminio intercambiable (Castillo, 1999).

La fitotoxicidad por aluminio en los suelos ácidos puede ser controlada a través del encalado, aunque ello no es factible en algunas regiones tropicales por el costo que representa, por algunos efectos de degradación de corto término y la aparición de deficiencias en microelementos (Wong *et al.*, 1995; Castillo, 1999).

Esto hace necesaria la búsqueda de otras alternativas, según Hue y Amien, (1989) y Castillo, (1999) las enmiendas orgánicas pueden reaccionar con el aluminio y disminuir su actividad en los suelos ácidos. (Kamprath, 1970; Wong *et al.*, 1995; Castillo, 1999) encontraron que el aluminio de la solución del suelo disminuye conforme aumenta la materia orgánica, debido a que ésta forma complejos muy fuertes con el aluminio, ya que un metal quelado se encuentra impedido de exhibir sus propiedades usuales.

En la determinación de aluminio en el suelo, son empleados los parámetros aluminio intercambiable y porcentaje de saturación de aluminio (PSA). El aluminio intercambiable es la cantidad de los sitios de intercambio catiónico que son ocupados por el aluminio. En el porcentaje de saturación de aluminio, el intercambiable es expresado en función del porcentaje que representa dentro del complejo de intercambio catiónico. En la literatura se reportan indicadores de saturación de aluminio con respecto a la CIC determinada a pH 7 y con respecto a la CIC a pH natural del suelo. Este último indicador de CIC se conoce como Capacidad de intercambio de cationes efectiva. Los suelos tropicales con pH menor a 4.5 tienen porcentajes de saturación mayores al 30% que es una condición desfavorable para el crecimiento de la mayoría de las plantas (Schlesinger, 1997).

El síntoma más visible de la toxicidad provocada por el aluminio en las plantas es la inhibición del crecimiento de las raíces y parte aérea, siendo patente de manera más rápida en las raíces (Alcántar y Téllez, 2009).

En algunos casos la toxicidad por aluminio puede inducir la deficiencia de calcio, o reducir el transporte del mismo. El exceso de aluminio induce también deficiencia de hierro, inhibición en la absorción de otros nutrimentos ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ ) a través de las puntas de las raíces. Con raíces más pequeñas, la superficie de contacto con el suelo y la solución del mismo conduce baja adquisición de nutrientes (Alcántar y Téllez, 2009).

Las especies de plantas difieren dentro de sus genotipos en su capacidad para tolerar el aluminio, existen varias hipótesis para explicar esta tolerancia (Ma, 2001; Ryan *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2004). En general los mecanismos de tolerancia se separan en dos grandes clases (Taylor, 1991; Kochian, 1995; Silva *et al.*, 2004): (1) prevención de la absorción por las raíces de aluminio, y (2) desintoxicación interna de aluminio. Uno de los mecanismos más ampliamente aceptados de la tolerancia al aluminio consiste en la producción y la exudación de sustancias quelantes, principalmente de bajo peso molecular como los ácidos orgánicos (AO), que forman complejos estables con aluminio no tóxico, con lo que hay una desintoxicación de aluminio en la rizósfera de plantas (Silva *et al.*, 2001; Kochian *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2004).

Aunque las investigaciones sobre los mecanismos de tolerancia al aluminio se han centrado en los cultivos agrícolas, se sabe que algunas especies forestales son tolerantes a la toxicidad por aluminio y que ésta es mayor que en los cultivos anuales (Schaedle *et al.*, 1989; Vale *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 2004). Algunas especies de eucalipto que son tolerantes pueden beneficiarse ante la presencia de aluminio (Vale *et al.*, 1984). La capacidad de hacer frente a la alta concentración de aluminio, permite a los eucaliptos prosperar en los suelos ácidos con poca o ninguna respuesta al encalado (Barros y Novais, 1996; Vale *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 2004).

Pese a los esfuerzos por aclarar los posibles mecanismos de tolerancia de toxicidad al aluminio de los eucaliptos, su base fisiológica sigue siendo difícil de entender. La alta tolerancia no se encuentra relacionada con la capacidad de

intercambio catiónico de las raíces (Vale *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 2004) ni tampoco las raíces pueden provocar cambios en la solución del suelo del pH, que hiciera disminuir la toxicidad del aluminio (Neves *et al.*, 1982; Vale *et al.*, 1996., Silva *et al.*, 2004).

Schaedle *et al.*, (1989), clasificaron los árboles de clima templado en grupos según su grado de sensibilidad a Al soluble: (1) sensible a la toxicidad si se observa  $[Al] < 200 \mu M$ ; (2) intermedio entre 200 y 1000  $\mu M$ , y (3) los efectos negativos de la tolerancia de  $[Al] > 1000 \mu M$ .

Silva *et al.*, (2004), encontraron que en los clones de eucaliptos resultaron tolerantes al aluminio, y en función de respuesta de crecimiento de raíces, el *E. grandis* y *E. cloeziana*, fueron más sensibles a la toxicidad de aluminio y *E. globulus* y *E. urophylla* menos sensibles.

Por otra parte, la explotación y rotaciones cortas de eucaliptos, conlleva a una reducción de calcio intercambiable (Ca) y magnesio (Mg), incrementando el aluminio intercambiable en el suelo (Leite, 2001; Silva *et al.*, 2004).

**3.6.8 pH del suelo.** Los efectos en las plantaciones forestales sobre la acidificación del suelo son importantes, debido a que afecta en la productividad (Russel, 1973; Brady, 1984; Rhoades y Binkley, 1996). Un valor bajo en el pH se asocia con una deficiencia de nutrientes o condiciones tóxicas del suelo (Rhoades y Binkley, 1996). Lo anterior se explica porque la solubilidad de varios nutrientes es dependiente del pH. El caso más común son las formas asimilables de fósforo, las cuales precipitan con valores extremos de pH.

El suelo se equipara a un sistema de solución de ácido débil influenciado por (1) la cantidad del ácido, (2) el grado de neutralización, y (3) la fuerza del ácido. El enfoque ofrece una alternativa a la ecuación de Henderson-Hasselbalch, la cual calcula el pH de las soluciones del ácido débil, dada la fortaleza del ácido y las concentraciones de ácidos disociadas y no disociadas (Rhoades y Binkley, 1996). Henderson-Hasselbalch derivó las soluciones contenidas en una sola fuente de  $H^+$  (sistemas de ácidos monopróticos), porque los sistemas múltiples búfer encontrados en los suelos, no son capaces de calcular el pH del suelo. El suelo contiene combinaciones de ácidos que resultan de las distintas fuerzas de los

diferentes tipos de materia orgánica y minerales arcillosos que constituyen el complejo de intercambio (Rhoades y Binkley, 1996). El grado del potencial a largo plazo de rotaciones múltiples de las plantaciones forestales depende de las especies de árboles y las condiciones de sitio del suelo y aplicación de actividades de manejo para la productividad sustentable del suelo (Rhoades y Binkley, 1996).

Mishra *et al.*, (2003), mencionan que los valores de pH disminuyen con la edad en las plantaciones de *E. tetericornis* en un suelo sódico, debido a la descomposición de hojarasca en el suelo, los exudados de la raíz y al aumento de la actividad biológica.

Ponnamperuma (1972), reportó que el pH de los suelos alcalinos fue altamente sensible a los cambios de presión parcial de CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> liberado por parte de las raíces ante el crecimiento de las plantas, facilita la sustitución de sodio adsorbido en suelos calcáreos por solubilización del CaCO<sub>3</sub> natural y por lo tanto se mejora la recuperación de los suelos (Mishra *et al.*, 2003). Gill y Abrol (1986), reportaron una disminución en el valor pH y el aumento en la cantidad de materia orgánica en la capa superficial en plantaciones de *E. tereticornis* (Mishra *et al.*, 2003).

**3.6.9 Nitrógeno total.** El nitrógeno es un componente integral de muchas plantas. Forma parte importante de todos los aminoácidos, que son los componentes básicos de las proteínas, incluyendo las enzimas que controlan prácticamente los procesos biológicos. Además, es componente de los ácidos nucleídos, en lo que se refiere al control hereditario y también de la clorofila, que es el corazón de la fotosíntesis (Brady, 2000).

Las plantas pueden tomar el nitrógeno de la solución del suelo principalmente como nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y amonio NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Aunque ciertas plantas crecen mejor cuando se canalizan a una de estas formas, una mezcla relativamente igual de los dos iones proporciona mejores resultados para la mayoría de las plantas. Estos dos iones tienen diferente efecto en el pH de la rizósfera. Los iones de nitrato (iones de cargas negativa), se mueven con facilidad a la raíz por medio del agua en el suelo y el intercambio en la superficie de la raíz con HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> o iones OH<sup>-</sup>, que a su vez conducen a un incremento de pH en la solución del suelo inmediatamente alrededor de la raíz.

La deficiencia de nitrógeno en las plantas, tiende a generar un color pálido amarillo (clorosis), y se desarrollan tallos delgados de aspecto raquítico. El nitrógeno es un elemento móvil (facilmente traslocable) cuando es inadecuada la absorción, es transferido al follaje nuevo, provocando que las hojas del follaje viejo presenten clorosis pronunciada y se caigan (Brady, 2000).

Cuando se aplica mucho nitrógeno, se presenta un crecimiento excesivo en la vegetación sobretodo en la porción superior de la copa y están propensas a caerse por lluvias o en época de invierno. También, puede retrasar la madurez de la planta y hacerlas susceptibles a enfermedades (especialmente por hongos) y plagas de insectos.

El nitrógeno constituye aproximadamente el 78% de la atmosfera (en volumen), el cual no está disponible para las plantas superiores. Una pequeña parte de estas reservas queda disponible solamente mediante la fijación de nitrógeno por parte de los microorganismos del suelo y por medio de las descargas eléctricas, (Pritchett, 1991). Las cantidades totales de N en el suelo no necesariamente representan la fracción disponible, la cual depende del proceso de mineralización. Generalmente se mineraliza anualmente entre 2-5% del nitrógeno total dependiendo de las condiciones climáticas (Fisher y Binkley, 2000).

En plantaciones de Eucalipto en Tasmania, se tiene una tasa de mineralización anual de nitrógeno en el suelo de ( $18$  a  $182 \text{ kg}^{-1} \text{ N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), en la capa de  $0$  a  $10 \text{ cm}$  (Moroni *et al.*, 2002; P. Smethurst *et al.*, 2004) y las tasas potenciales en el subsuelo a  $120 \text{ cm}$  de profundidad un intervalo de  $54$ – $910 \text{ kg}^{-1} \text{ N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Moroni, 2001; P. Smethurst *et al.*, 2004).

Las plantaciones con una alta productividad, cuentan con una tasa de captación de  $200 \text{ kg}^{-1} \text{ N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , cuando se acercan al cierre de copa (Periera *et al.*, 1996; P. Smethurst *et al.*, 2004). Por lo tanto las plantaciones de eucalipto de Tasmania, cuenta con rangos de N de deficientes hasta óptimos (Smethurst *et al.*, 2004). Existen evidencias de que el *E. nitens* y *E. globus* tienen preferencia por el N en forma de amonio ( $\text{NH}_4$ ) (Shedley *et al.*, 1993; Garnett *et al.*, 2001; Smethurst *et al.*, 2004).

La tasa y el tiempo de la fertilización son dos factores importantes que deben ser considerados en el manejo de la fertilización del N, porque al momento de las

aplicaciones puede tener efectos positivos o negativos en la eficiencia de fertilización y la economía (Smethurst *et al.*, 2004). La producción intensiva de eucalipto en sitios de baja disponibilidad de N, requieren de aplicaciones de 30 a 40 kg<sup>-1</sup> N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, en rotaciones superiores de 15 a 20 años (Smethurst *et al.*, 2004). A largo plazo las entradas de este orden, puede dar lugar a una saturación de N, el cual es caracterizado por un alto riesgo de lixiviación de NO<sub>3</sub>, pérdidas de cationes de las bases, incremento de la acidez del suelo y toxicidad por aluminio (Magill *et al.*, 1997; Smethurst *et al.*, 2004).

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Localización del área de estudio

Las plantaciones bajo estudio se ubican en terrenos de la Empresa de Forestaciones Operativas Mexicanas (FOMEX); la cual se localiza en el Municipio de Huimanguillo Tabasco. La ubicación geográfica del municipio es entre los paralelos 17° 19´ de latitud Norte y 93° 23´ de longitud Oeste (Figura 1).

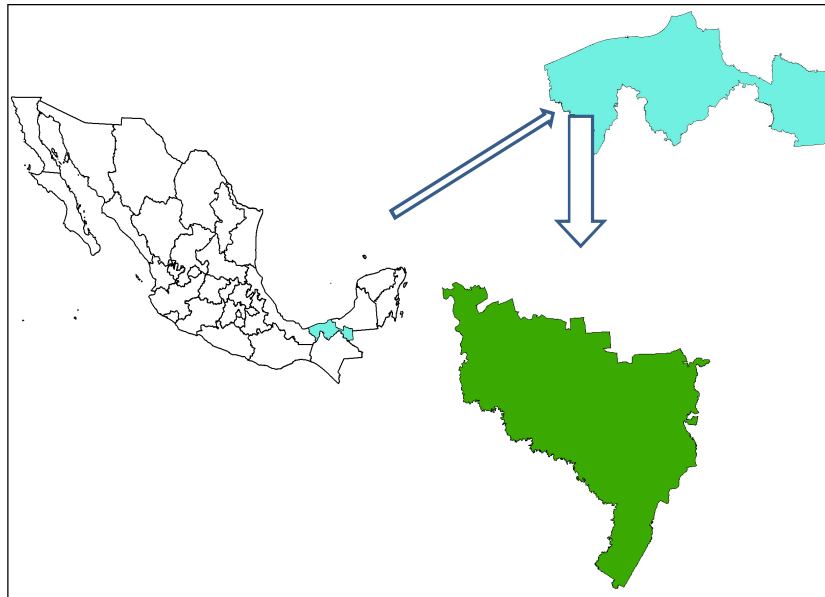


Fig. 1 Localización del área de estudio.

### 4.2 Material biológico

Las plantaciones estudiadas se establecieron con plántulas de *Eucalyptus urophylla* obtenidas en algunos casos por semillas (65%) y en otros por clones (35%) producidos en vivero.

Para la presente investigación, se consideraron 49 sitios, distribuidos en 23 predios, de los cuales 9 sitios son propagados por semilla, 19 sitios de clones y 21 de mezcla (semilla y clon). Las edades representadas en estos sitios son: 4, 6, 7, 9, 10, 12 y 13 años. El criterio para elegir los sitios fue que tuviesen información dasométrica histórica e información edafológica considerada en los análisis



básicos de laboratorio. Para *E. grandis*, se cuenta con 7 sitios, con edad de 11 años y propagación por semilla.

### **4.3 Clima**

El clima es cálido húmedo Am (f) con abundantes lluvias en verano con cambios térmicos en los meses de diciembre y enero; su temperatura media anual es mayor de 22°C, siendo la máxima media mensual en mayo con 30.6°C; a la vez, la máxima y mínima absoluta alcanzan los 45°C y 14°C, respectivamente y con una precipitación de 2000 a 2500 mm (CONABIO, 1998).

### **4.4 Orografía**

Se presentan dos características de relieve: la primera corresponde a la zona occidental y abarca aproximadamente el 2% de la superficie; la segunda corresponde a zonas semiplanas, y abarca el 11%; y la tercera corresponde a zonas planas, con el 87% (Méndez, 2008).

### **4.5 Hidrografía**

La zona es abastecida por importantes ríos: el Mezcalapa, proveniente del estado de Chiapas; el Blasillo, localizado en la parte norte del municipio de Huimanguillo; el Tancochapa, que sirve como límite con el estado de Veracruz y toma el nombre de río Tonalá (Méndez, 2008).

### **4.6 Principales Ecosistemas**

La vegetación original se representa por selva alta perennifolia con árboles mayores de 30 m de altura y algunos de selva media perennifolia de 15 a 30 m de altura, como el cedro (*Cedrela odorata*), la caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el tatuán (*Columbrina ferruginosa*), aunque las áreas con vegetación original son reducidas. Selva secundaria. Los popales, son suelos bajos inundables, en donde se cultivan maíz, frijol y calabaza y las Sabanas (140,000 has), son utilizadas para la ganadería principalmente (Méndez, 2008).

## **4.7 Requerimientos ecológicos de *Eucalyptus urophylla***

### **4.7.1 Clima**

*E. urophylla* promete mucho en aéreas húmedas o subhúmedas, tropicales o subtropicales. Las plantaciones se desarrollan mejor en aéreas con un rango de precipitación media anual de 1,300 y 2,500 mm y una estación seca de 1 a 5 meses en la época más fría del año. La temperatura media anual varía de 24 a 35 °C, la temperatura óptima del mes más frío es de 10°C, sin bajar de los 5°C y las temperaturas del mes más caliente varían de 32 a 35°C (FAO, 1981; FAO, 2000; Delgado, 2009).

### **4.7.2 Suelo**

Su mejor crecimiento es en suelos húmedos y bien drenados con profundidad mayor a un metro, pero puede crecer bien en suelos con profundidades entre 50 a 100 cm si hay buenas condiciones de fertilidad. La textura óptima para el buen desarrollo de las plantaciones es de media a fina, aunque también puede desarrollarse en texturas más gruesas con crecimientos menores. El pH favorable debe estar entre 5.5 y 6.5 y no debe ser menor a 5 ni mayor a 7.5 por los efectos en la disponibilidad de nutrientes (FAO, 1981; FAO, 2000; Delgado, 2009).

### **4.7.3 Topografía**

El mejor desempeño de las plantaciones se da en altitudes de 500 a 1,400 m (FAO, 1981), pero pueden funcionar en altitudes de 0 a 2,700 m (FAO, 2000). Los lugares óptimos son tierras planas y pendientes inferiores de los valles menores al 30 por ciento (FAO, 1981; Delgado, 2009).

## **4.8 Muestreo de suelo**

El muestreo en campo se realizó procurando seguir una línea en zig-zag, de acuerdo al tamaño de las parcelas. La distancia entre sitios fue de 100 m, y a dos profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm para generar una muestra compuesta para cada profundidad.

#### **4.9 Análisis de laboratorio de las muestras de suelo**

La determinación en laboratorio de propiedades físicas y químicas del suelo se hicieron como lo indica la norma NOM-021-RECNAT-2000. Las determinaciones se llevaron a cabo en los laboratorios especializados del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados.

Las determinaciones realizadas en laboratorio fueron: pH (1:2.5 suelo:agua), materia orgánica del suelo (MOS) por el método de Walkley y Black (1932), Nitrógeno-total (semi-micro Kjeldahl), P disponible por el método de Olsen y Dean (1965), Capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de acetato de amonio (1.0 M, pH 7.0) de Bigham and Bartels (1996) y bases intercambiables (BI) por extracción con acetato de amonio 1.0 M: el potasio (K) se cuantificó por espectrometría de emisión de flama; el calcio (Ca) y magnesio (Mg) por espectrometría de absorción atómica (CSTPA, 1980). La acidez intercambiable por el método de Barnhisel y Bertsch, que utiliza cloruro de potasio. Para la densidad aparente, se impregnaron terrones con parafina y se pesaron en medio líquido. La textura, por medio del método de Bouyoucos. También se tomaron las constantes de humedad, por medio de membrana y ollas de presión.

#### **4.10 Determinación del porcentaje de saturación de bases y aluminio**

El porcentaje de saturación de aluminio, se estimó con respecto a la CIC a pH 7. El aluminio intercambiable se dividió entre la suma de los principales cationes intercambiables (Ca, K, Mg, y Al), y se expresó como porcentaje.

La determinación del porcentaje de saturación de bases, se realizó de acuerdo a la literatura, la cual considera a los cationes solubles (Ca, K y Mg), divididos entre la capacidad de intercambio catiónico. No se consideró Na dado que por ser suelos ácidos las cantidades de éste son muy bajas o no detectables.

#### **4.11 Estimación del índice de sitio en las plantaciones**

Con información de la empresa FOMEX, De los Santos y Méndez (modelo no publicado) elaboraron modelos de índice de sitio considerando la fuente del árbol (Semilla o clon) y los parámetros de diámetro normal, edad y altura total. Se

buscó en la base de datos correspondientes a cada sitio a los cinco árboles dominantes y/o codominantes y a partir de sus dimensiones se estimó el índice de sitio.

De los Santos y Méndez (modelo no publicado) utilizaron el modelo de Schumacher generalizado a tres parámetros para obtener el ajuste promedio de los datos de la forma:

$$A = 35.88 \times \exp\left(-\frac{1.702389}{E^{0.735836}}\right)$$

Donde:  $A$  es la altura dominante promedio por sitio en metros;  $E$  es la edad en años.

Para estimar el índice de sitio ( $IS$ ) se opta por una ecuación anamórfica ya que al comparar las familias de curvas con los datos, este tipo de familias de  $IS$  representaron de manera adecuada el patrón de dispersión observado. Las familias anamórficas de  $IS$  tienen la siguiente expresión matemática

$$IS = A_R \times \exp\left(1.702389 \times \left(\frac{1}{E_R^{0.735836}} - \frac{1}{E_B^{0.735836}}\right)\right)$$

Donde:  $A_R$  es la altura dominante promedio del sitio/rodal a evaluar para  $IS$  en metros;  $E_R$  es la edad en años del sitio/rodal a evaluar,  $E_B$  es la edad base en años, en este caso 14.

#### 4.12 Modelos para la estimación de volumen

Para la estimación del volumen, se utilizaron los modelos no publicados por De los Santos y Méndez. (Anexo 1).

Para el caso de mezclas, se utilizó el modelo general; debido al desconocimiento de procedencia (clon o semilla) de la fuente, pero si se conocía la edad (ajustado con el ahusamiento).

$$V = \alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2} E^{\alpha_3}$$

Donde:

$$\alpha_0 \quad 0.000084$$

$$\alpha_1 \quad 1.731858$$

$$\alpha_2 \quad 0.955688$$

$$\alpha_3 \quad 0.018002$$

D = diámetro, H =altura y E =edad

En el caso de que la fuente fuera semilla, se utilizó el modelo de volumen comercial con corteza para árboles de semilla

$$V = 0.000067 \times D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.038023}$$

Finalmente, para la fuente por clones, se utilizó el modelo de volumen comercial con corteza siguiente:

$$V = 0.0000618 \times D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.127879}$$

#### 4.13 Análisis estadístico

Las variables del suelo, fueron correlacionadas en las dos profundidades con el índice de sitio usando análisis de correlación y también con procedimientos de selección de variables para encontrar un modelo simplificado y predecir IS en función de variables del suelo. Una vez generado el modelo, se aplicaron componentes principales y se graficaron las variables para observar los patrones de tendencia.

Debido a que las fuentes de las plantaciones podrían ser por semilla, clones y la combinación de estas dos fuentes, el análisis estadístico se realizó de la siguiente manera:

(1) Considerando todos los sitios con *E. urophylla* (49) e independientemente del origen de los árboles (semilla, clon o mezcla).

(2) Analizando sólo el grupo de plantaciones de *E. urophylla* por semilla.

- (3) Considerando sólo el grupo de plantaciones *E. urophylla* por clones.
- (4) Incluyendo las plantaciones de *E. urophylla* establecidas como una mezcla de semilla y clon.
- (5) Comparando las especies de *E. urophylla* y *E. grandis* con origen por semilla.

En cada caso se realizó el procedimiento de Stepwise (selección de variables por pasos) y se obtuvo una ecuación de IS. El paquete estadístico empleado fue el Statistical Analysis System para Windows 9.0 (SAS, 2004).

## V. RESULTADOS

### 5.1 Características dasométricas de los sitios de estudio

El Cuadro 1 resume los parámetros dasométricos de los 49 sitios estudiados. La variación de edades es de 4 a 13 años y el IS de 10 a 35 m. El área basal varía de 2 a 25 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y el volumen total de 14 a 264 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. En cuanto al incremento medio anual en volumen la variación es de 1.96 a 37.7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

**Cuadro 1. Parámetros dasométricos de los 49 sitios de estudio.**

Predio	Sitio	Origen	Edad (Años)	Diámetro (cm)	Altura (m)	IS (m)	IMA (m)	IMA (cm)	AB (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	I. Periódico (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
L00005	1	M	9	22.98	23.8	26.1	2.64	2.55	23.1	194.48	21.61
L02001	1	S	7	26.82	28.64	33.7	4.09	3.83	25.7	264.2	37.74
L02001	2	S	7	27.52	28.72	33.8	4.1	3.93	25.2	257.92	36.85
L02002	1	S	7	22.42	27.46	32.3	3.92	3.2	15.8	147.52	21.07
L02002	2	S	7	25.58	29.9	35.2	4.27	3.65	20.6	198.63	28.38
L02003	1	C	7	21.8	23.36	27.5	3.34	3.11	19.5	171.95	24.56
L02003	2	C	7	19.88	21.74	25.6	3.11	2.84	13.8	112.94	16.13
L02003	3	C	7	22.4	24.64	29	3.52	3.2	14.5	139.31	19.90
L03002_1	1	M	6	18.84	22.8	28.2	3.8	3.14	12	105.37	17.56
L03002_1	2	M	6	19.86	24.48	30.2	4.08	3.31	14.3	124.14	20.69
L03002_1	3	M	6	15.16	17.58	21.7	2.93	2.53	11.3	83.27	13.88
L03002_1	4	M	6	17.8	21.28	26.3	3.55	2.97	8.84	73.2	12.20
L03002_2	1	M	6	20.96	20.66	25.5	3.44	3.49	10.8	79.15	13.19
L03002_2	2	M	6	18.42	19.86	24.5	3.31	3.07	13	102.56	17.09
L03002_2	3	M	6	16.6	18.4	22.7	3.07	2.77	10.3	79.34	13.22
L03002_3	1	M	6	13.96	12.12	15	2.02	2.33	2.72	14.73	2.46
L03002_3	2	M	6	19.24	16.88	20.9	2.81	3.21	5.87	39.55	6.59
L03002_3	3	M	6	17.12	16.32	20.2	2.72	2.85	10.1	66.93	11.16
L03002_4	1	S	6	18.7	18.92	23.4	3.15	3.12	8.95	60.39	10.07
L03002_4	2	S	6	20.52	19.98	24.7	3.33	3.42	13.1	90.13	15.02
L03003	1	C	6	14.32	11.82	14.6	1.97	2.39	3.66	18.54	3.09
L03003	2	C	6	10.72	8.76	10.8	1.46	1.79	4.95	20.51	3.42
L03003	3	C	6	15.8	16.86	20.8	2.81	2.63	10.6	76.81	12.80
L03005	1	S	6	21.42	22.4	27.7	3.73	3.57	17.6	131.33	21.89
L05001	1	M	4	19.48	21.04	30.5	5.26	4.87	12.4	102.69	25.67
L05001	2	M	4	14.72	12.12	17.5	3.03	3.68	8.16	41.91	10.48
L05001	3	M	4	18.62	18.48	26.7	4.62	4.66	13.3	92.61	23.15
L05001	4	M	4	15.35	16.48	23.9	4.12	3.84	10.4	64.47	16.12
L05001	5	M	4	20.36	18.3	26.5	4.58	5.09	11.4	75.69	18.92

**Cuadro 1. Continuación**

Predio	Sitio	Origen	Edad	Diámetro	Altura	IS	IMA	IMD	AB	Volumen	I. Periódico
			(Años)	(cm)	(m)	(m)	(m)	(cm)	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
L05001	6	M	4	17.94	17.14	24.8	4.29	4.49	11.5	83.35	20.84
L05001	7	M	4	15.82	16.34	23.7	4.09	3.96	13.6	97	24.25
L05001	8	M	4	18.46	18.14	26.3	4.54	4.62	15.7	118.42	29.61
L05014_1	1	C	4	19.96	19.02	27.5	4.76	4.99	12.6	83.21	20.80
L05014_2	1	C	4	18.84	21.76	31.5	5.44	4.71	14.4	111.21	27.80
L05014_3	1	C	4	17.88	17.49	25.3	4.37	4.47	13.3	89.56	22.39
L96029	1	C	13	15.56	14.4	14.6	1.11	1.2	6.43	42.72	3.29
L96031	1	C	13	13	13.14	13.3	1.01	1	4.01	25.53	1.96
L96035	1	C	13	17.38	18	18.3	1.38	1.34	10.6	83.41	6.42
L96035	2	C	13	17.44	19.02	19.3	1.46	1.34	9.66	75.1	5.78
L96035	3	C	13	18.64	19.36	19.6	1.49	1.43	8.04	66.73	5.13
L96035	4	C	13	17.64	21.86	22.2	1.68	1.36	11.3	101.39	7.80
L96037	1	C	13	15.28	15.94	16.2	1.23	1.18	16.4	115.57	8.89
L96037	2	S	13	17.38	23.62	24	1.82	1.34	19.3	169.52	13.04
L98003	1	M	11	16.76	20.1	21.1	1.83	1.52	15.8	125.91	11.45
L98003	2	M	11	17.14	19.02	19.9	1.73	1.56	15	116.7	10.61
L99003	1	C	10	19.02	16.9	18.1	1.69	1.9	14.2	98.28	9.83
L99006	1	C	10	16.94	17.04	18.3	1.7	1.69	5.59	41.62	4.16
L99006	2	C	10	14.7	15.2	16.3	1.52	1.47	9.76	66.75	6.68
L99009	2	S	10	28.18	27.28	29.2	2.73	2.82	16.8	155.45	15.55

S=semilla; C=clon; M =Mezcla

IMA=Incremento medio anual; IMD = Incremento medio anual en diámetro; I periódico.= Incremento periódico anual.

Para facilitar la presentación de resultados se decidió usar el subíndice "global" cuando se consideran todos los 49 sitios del estudio sin importar la fuente de la planta (semilla, clon, mezcla). Se usó el subíndice "semilla" cuando el análisis corresponde sólo a sitios con fuente por semilla. Se usó el subíndice "clon" cuando el análisis corresponde sólo a sitios con fuente por clon. Se usó el subíndice "mezcla" cuando el análisis corresponde sólo a sitios con fuente por mezcla semilla-clon. Cuando se hace un análisis particular para *E. grandis* se emplea el subíndice "grandis". Por ejemplo  $CIC_{global}$ , denota que se hace referencia a la variable CIC considerando todas las formas de producción de planta.



## 5.2 Características edafológicas de los sitios de estudio

Los valores promedios de las variables edafológicas en los sitios de estudio se resumen en el Cuadro 2. La media de las variables de MO, K, Ca, Mg, CIC, PSB, N y contenido de arena son mayores en las profundidades de 0 a 20 cm con respecto a la profundidad 20-40 cm. En la profundidad de 20 a 40 cm las variables de porcentaje de saturación de aluminio y contenido de arcilla fueron mayores con relación a la primera capa. Las variables restantes son similares en ambas profundidades.

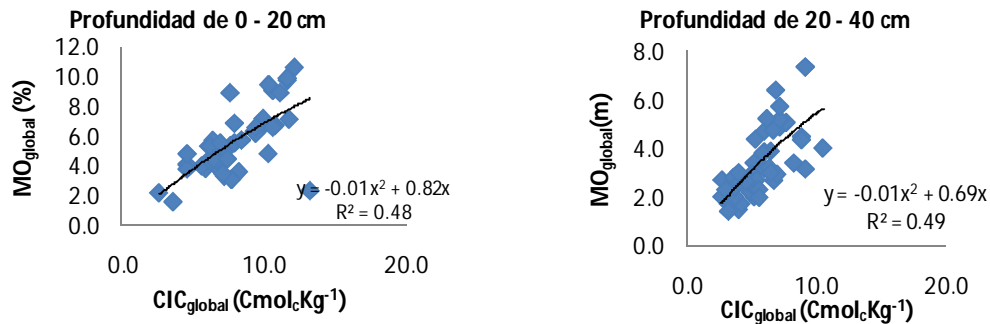
**Cuadro 2. Valores medios e indicadores de dispersión de las variables edafológicas de los 49 sitios de estudio.**

Variable	Profundidad del suelo (cm)							
	0 - 20 cm				20 - 40 cm			
	Media	Mín	Máx	Des. Est.	Media	Mín	Máx	Des. Est.
pH	4.8	3.7	5.6	0.3	4.8	3.9	6.0	0.3
MO (%)	5.6	1.6	10.6	2.1	3.5	1.4	7.4	1.4
P(mg kg <sup>-1</sup> )	2.9	0.4	13.6	2.2	2.7	0.1	12.8	3.0
K(Cmol <sub>c</sub> Kg <sup>-1</sup> )	0.1	0.0	0.4	0.1	0.1	0.0	0.4	0.1
Ca(Cmol <sub>c</sub> Kg <sup>-1</sup> )	0.9	0.0	3.2	0.7	0.5	0.0	2.8	0.5
Mg(Cmol <sub>c</sub> Kg <sup>-1</sup> )	0.3	0.1	0.6	0.2	0.2	0.0	0.6	0.2
CIC(Cmol <sub>c</sub> Kg <sup>-1</sup> )	8.0	2.6	13.2	2.4	5.7	2.6	10.5	1.9
PSB (%)	15.8	1.0	47.3	11.1	13.7	0.6	65.1	10.9
Al (Cmol <sub>c</sub> Kg <sup>-1</sup> )	0.6	0.1	1.1	0.2	0.5	0.1	2.1	0.4
PSAI (%)	38.5	12.0	87.5	19.9	44.4	4.2	90.9	20.9
Dap g/cm <sup>3</sup>	0.6	0.4	1.6	0.3	0.6	0.4	1.4	0.2
N (%)	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.0	0.4	0.1
HCC (%)	22.6	10.0	34.0	5.4	22.3	13.0	35.0	5.2
Arcilla (%)	25.8	9.0	45.0	8.0	32.0	15.0	64.0	10.4
Limo (%)	16.3	2.0	60.0	9.3	14.5	7.0	26.0	4.3
Arena (%)	57.7	11.0	75.0	12.2	53.6	25.0	73.0	11.9

*n =49; MO=Materia orgánica; P=Fósforo; K=Potasio; Ca=Calcio; CIC=Capacidad de intercambio catiónico; PSB =Porcentaje de saturación de bases; Al= Aluminio; PSAI=Porcentaje de saturación de aluminio; Dap= Densidad aparente; N= Nitrógeno total; HCC= Capacidad de retención de humedad.*

En general existe correlación entre las variables del suelo y destaca en particular la correlación positiva de variables de la segunda capa, entre CIC y capacidad de retención de humedad, y entre capacidad de retención de humedad y contenido de arcilla, cuyos coeficientes de correlación son 0.63 y 0.69, respectivamente; a un nivel de significancia menor a 0.0001, en ambas capas. Se observa una correlación positiva de 0.68 y 0.69 para la materia orgánica y la CIC en ambas

profundidades de suelo (Cuadro 3 y Cuadro 4), a un nivel de significancia menor a 0.0001 en ambas profundidades. Así como una variación explicada del 48% y 49% (Figura 2).



**Fig. 2** Relación entre MO y CIC en ambas profundidades.

### 5.3 Relación entre variables del suelo y variables de crecimiento sin considerar la fuente

Sin considerar la fuente de la planta (semilla o clon), los resultados muestran correlaciones significativas entre las mismas variables del suelo y entre edafológicas y el IS, las cuales se resumen en el Cuadro 3 y Cuadro 4. Resalta principalmente el contenido de arcilla como una variable para explicar los cambios de IS.

**Cuadro 3. Matriz de correlación de IS y propiedades edafológicas a la profundidad de 0 a 20 cm.**

	IS	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CIC	PSB	Al	Dap	N	HCC	PSAI	Arcilla	Limo	Arena
IS	1																
pH	-0.2	1															
MO	-0.1	0.1	1														
P	0	0	-0.2	1													
K	0.1	0.4	-0.2	-0.2	1												
Ca	0.2	0.4	-0.3	0	0.7	1											
Mg	<b>0.3</b>	0.1	-0.4	-0.1	0.6	0.6	1										
CIC	0.2	0.2	<b>0.7</b>	-0.1	-0.1	0.1	0	1									
PSB	0.1	0.4	-0.5	-0.1	0.8	0.9	0.7	-0.3	1								
Al	<b>0.3</b>	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	0	0.4	0	1							
Dap	0.1	0	0.1	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	0.1	-0.3	0.2	1						
N	-0.2	0.2	0.3	-0.2	0.1	0	-0.1	0.2	-0.1	0	-0.2	1					
HCC	-0.1	0.3	0.4	-0.3	0	0.1	-0.1	0.4	0	0.2	-0.3	0.3	1				
PSAI	-0.2	-0.3	0.4	0.2	-0.6	-0.7	-0.7	0.1	-0.8	0.4	0.4	0	0.1	1			
Arcilla	<b>0.6</b>	0	-0.2	-0.1	0.1	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0	-0.3	0.1	-0.3	1		
Limo	0.1	-0.3	0	0	-0.2	-0.2	0.1	0	-0.1	0.1	0.2	-0.2	0	0.2	0	1	
Arena	<b>-0.4</b>	0.2	0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	0.3	-0.1	0.1	-0.6	-0.8	1

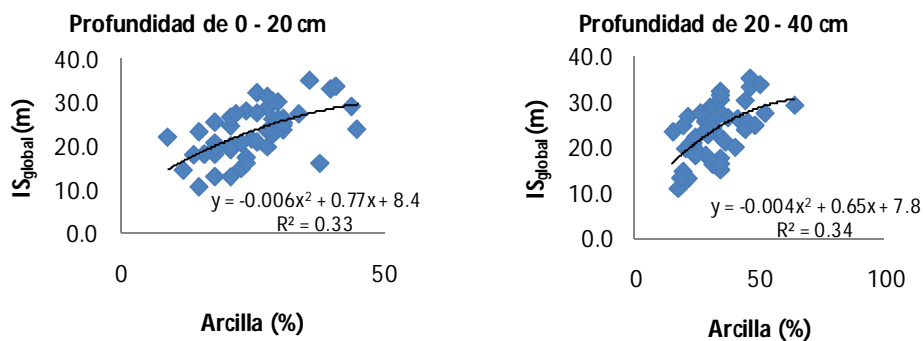
Las correlaciones más altas se reportan en negritas. Respecto a los grados de libertad, una correlación mayor a 0.28 es significativa. En este caso la relación IS y Variables edafológicas son: Mg, con un nivel de significancia de 0.0384; Aluminio= 0.0639; Arcilla= <.0001; arena= 0.0044.

**Cuadro 4. Matriz de correlación de IS y propiedades edafológicas a la profundidad de 20 a 40 cm.**

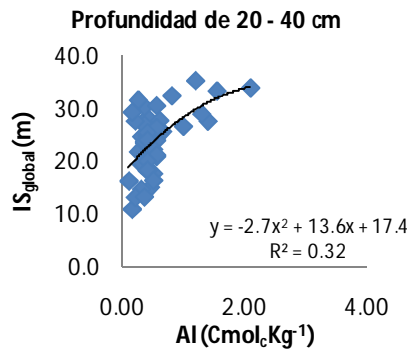
	IS	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CIC	PSB	Al	Dap	N	HCC	PSAI	Arcilla	Limo	Arena
IS	1																
pH	-0.2	1															
MO	0	0.3	1														
P	0.2	0.2	0.3	1													
K	-0.1	0	-0.2	-0.1	1												
Ca	0.2	0.3	-0.2	0.1	0.3	1											
Mg	0.1	0.1	0.1	0	0.2	0.6	1										
CIC	<b>0.4</b>	0.3	<b>0.7</b>	0.5	-0.1	0.1	0.3	1									
PSB	0	0.1	-0.4	-0.2	0.4	0.9	0.6	-0.2	1								
Al	<b>0.6</b>	-0.3	-0.1	0.2	-0.2	0	-0.1	0.2	-0.2	1							
Dap	0.1	-0.1	0	0	-0.1	-0.2	-0.2	0.2	-0.3	0.3	1						
N	-0.2	0	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	1					
HCC	<b>0.3</b>	0.2	0.5	0.1	-0.2	0.1	0.4	0.6	-0.1	0.3	-0.1	-0.2	1				
PSAI	0.1	-0.2	0.1	0	-0.5	-0.6	-0.6	0	-0.7	0.6	0.4	0.2	0	1			
Arcilla	<b>0.6</b>	-0.1	0.2	0	-0.2	0.1	0.3	0.4	-0.1	0.4	0	-0.1	0.7	0.1	1		
Limo	<b>0.3</b>	0	-0.2	-0.1	0.2	0	0.1	0	0	0.3	0	-0.2	0.2	0	0.2	1	
Arena	<b>-0.6</b>	0.1	-0.1	0	0.1	0	-0.3	-0.4	0.1	-0.5	0	0.1	-0.7	-0.1	-0.9	-0.5	1

Las correlaciones más altas se reportan en negritas, respecto a los grados de libertad, una correlación mayor a 0.28 es significativa. En este caso la relación IS y Variables edafológicas son: CIC, con un nivel de significancia de 0.0113; Aluminio= <.0001; Capacidad de retención de humedad = 0.0765; Arcilla= <.0001; arena= <.0001

La correlación entre contenido de arcilla e IS en ambas profundidades fue positiva. Es decir, cuando aumenta una variable aumenta la otra. Para la primera y segunda profundidad la correlación fue de 0.6, con un nivel de significancia menor a 0.0001. El contenido de arena mostró una correlación negativa con IS en ambas profundidades. Para la primera profundidad se obtuvo un valor de -0.4, con un nivel de significancia de 0.0044 y la correlación para la segunda capa fue de -0.6, con un nivel de significancia menor a 0.0001. En el caso CIC, la correlación fue positiva con valores de 0.2 y 0.4 para la capa superior e inferior, respectivamente. A niveles de significancia de 0.1460 y 0.0113.



**Fig. 3** Relación entre IS y contenido de arcilla en ambas profundidades



**Fig. 4** Relación entre IS y contenido de aluminio

El análisis, se realizó a través de la selección de modelos usando el procedimiento de regresión por pasos, la cual permitió la obtención de una ecuación de regresión múltiple con las principales variables que explican el crecimiento. Con dicho procedimiento, se detectaron seis variables importantes, las cuales se listan en el Cuadro 5. La condición fue escoger aquél modelo que contara un  $R^2$  bastante alto con el menor número de variables predictoras

posibles y también se considero un modelo con k variables si al incluir una variable adicional el  $R^2$  no se incrementa sustancialmente (5%).

**Cuadro 5. Selección de variables edafológicas, por el procedimiento de “regresión por pasos”, sin considerar la fuente de la planta.**

Var. Entrante	Var. Remov	Nombre	No. De variables	R- Cuadrada parcial	R- cuadrada Modelo	C(p)	Valor de F	Pr > F
		Arena <sub>2</sub>	1	0.318	0.318	174332	22.38	<.0001
		Al <sub>2</sub>	2	0.088	0.406	112175	6.99	0.0111
		PSAI <sub>1</sub>	3	0.066	0.472	70802	5.75	0.0206
		CIC <sub>2</sub>	4	0.032	0.505	60346	2.98	0.0913
		HCC <sub>2</sub>	5	0.051	0.556	32209	5.14	0.0284
		Ca <sub>1</sub>	6	0.033	0.589	21468	3.47	0.0695
		Arcilla <sub>1</sub>	7	0.033	0.623	0.9913	3.79	0.0583
	Arena <sub>2</sub>	Arena <sub>2</sub>	6	0.004	0.619	-0.6087	0.48	0.4922

*Sub<sub>1</sub>, profundidad de 0 a 20 cm y sub<sub>2</sub>, profundidad de 20 a 40 cm.*

*Al= Aluminio; PSAI=Porcentaje de Saturación de aluminio; CIC =Capacidad de intercambio catiónico; HCC= Capacidad de retención de humedad; Ca= Calcio.*

Como puede observarse, hay un balance en la representatividad de las variables, ya que tres corresponden a la primera capa del suelo y tres a la segunda, indicando que los dos niveles de profundidad de muestreo son importantes. La arena fue la primer variable en entrar al modelo, sin embargo, al final es removida, debido a que su adición no mejoraba el modelo. Las variables que más explican variación de IS para la primera capa son: son el porcentaje de saturación de aluminio, el calcio y arcilla; en la segunda capa: el aluminio, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de humedad. La utilidad de los modelos, será para predecir cuales son las variables edafológicas que están influyendo en el potencial de crecimiento y así conocer los sitios idóneos para las plantaciones comerciales

El análisis de varianza para el modelo de regresión encontrado se resume en el Cuadro 6.

**Cuadro 6 Análisis de la varianza de una regresión múltiple entre variables del suelo y crecimiento, sin considerar la fuente de la planta.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	6	986.78144	16.446357	11.67	<.0001
Error	43	606.1523	14.09657		
Total Corregido	49	1592.93374			
	Raíz MSE	3.75454	R-cuadrada	0.6195	
	Media depen	23.6454	Adj R-Sq	0.5664	
	Coeff Var	15.87852			

Los resultados indican que el modelo explicó el 62% de la variabilidad total del IS, con un nivel de significancia menor a 0.0001.

La ecuación correspondiente para la predicción de IS a partir de variables del suelo sin considerar la fuente de la planta es de la siguiente forma:

$$IS_{global} = 22.47 + 7.56 (Al_2) - 0.16 (PSAI_1) + 0.38 (CIC_2) - 0.35 (HCC_2) - 4.36 (Ca_1) + 0.30 + (Arcilla_1) \dots \dots \dots (1)$$

Donde:  $Al_2$  =Aluminio en la profundidad de 20 a 40 cm;  $PSAI_1$ =Porcentaje de saturación de aluminio en la profundidad de 0 a 20 cm;  $CIC_2$ =Capacidad de intercambio catiónico en la profundidad de 20 a 40 cm;  $HCC_2$ =Capacidad de retención de humedad en la profundidad de 20 a 40 cm;  $Ca_1$ =Calcio en la profundidad de 0 a 20 cm y  $Arcilla_1$  = Arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm.

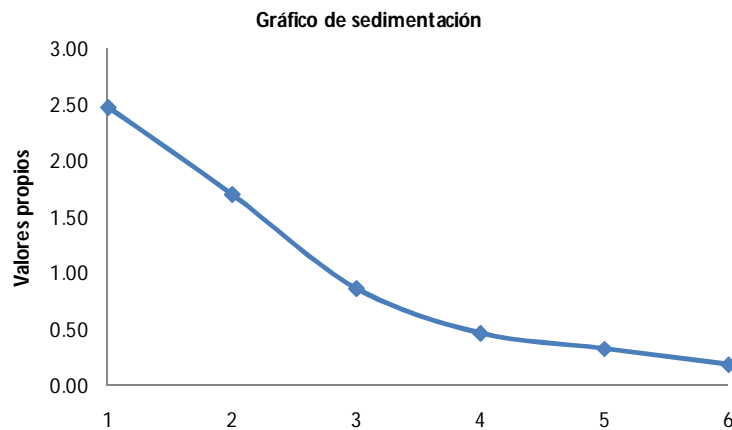
Para encontrar una relación entre las variables de la ecuación (1) y su asociación con respecto a la fuente de la planta se empleó la técnica de componentes principales. Los resultados indican que las primeras dos componentes explican el 69% de la variabilidad del conjunto de los datos. Cabe señalar que se trabajó con la matriz de correlaciones estandarizada para minimizar los efectos por la diferencia de unidades entre las variables (Cuadro 7).

**Cuadro 7. Valores propios de la matriz de correlaciones estandarizadas.**

Variable	Valores propios	Diferencia	Varianza Explicada	Acumulativa
Al <sub>2</sub>	2.47	0.78	0.41	0.41
PSAl <sub>1</sub>	1.70	0.84	0.28	0.70
CIC <sub>2</sub>	0.86	0.40	0.14	0.84
HCC <sub>2</sub>	0.46	0.14	0.08	0.92
Ca <sub>1</sub>	0.32	0.14	0.05	0.97
Arcilla <sub>1</sub>	0.18		0.03	1

*Al<sub>2</sub> = Aluminio en la segunda capa ; PSAl<sub>2</sub>=Porcentaje de saturación de aluminio en la primera capa; Ca<sub>1</sub>= calcio en la primera capa; CIC<sub>2</sub>= Capacidad de intercambio catiónico en la segunda capa; HCC<sub>2</sub>= Capacidad de retención de humedad en la segunda capa;*

Posteriormente, se obtuvo el gráfico de sedimentación (Figura 5). El cuál permitió visualizar el punto de corte de elección del número de componentes principales a considerar.



**Fig. 5** Gráfico de sedimentación

Para fines dimensionales, se considero a dos componentes principales. Existe una correlación significativa entre las variables y las dos componentes, destacando la textura del suelo (Cuadro 8)

**Cuadro 8. Matriz de vectores propios.**

Variable	ab1	ab2
Al <sub>2</sub>	0.3	0.34
PSAI <sub>1</sub>	-0.29	<b>0.61</b>
CIC <sub>2</sub>	0.40	0.35
HCC <sub>2</sub>	<b>0.44</b>	0.36
Ca <sub>1</sub>	0.41	<b>-0.49</b>
Arcilla <sub>1</sub>	<b>0.53</b>	-0.03

*Al= aluminio; PSAI=Porcentaje de saturación de aluminio;CIC=Capacidad de intercambio catiónico;HCC=Capacidad de retención de humedad; Ca=Calcio.*

El Cuadro 8 muestra que, con respecto a la primera componente principal, las variables que más influyen en la distribución de los datos, son las propiedades físicas como: la arcilla a una profundidad de 0 a 20 cm y la capacidad de retención de humedad a la profundidad de 20 a 40 cm y para la segunda componente intervienen las propiedades químicas como: el porcentaje de saturación de aluminio y el calcio intercambiable ambas en la profundidad de 0 a 20 cm.

Por otra parte, el análisis gráfico muestra una tendencia clara de ubicación de los sitios de acuerdo a la fuente de la planta (Figura 6). Conforme se avanza de izquierda a derecha, aumentan los valores de las variables influyentes de la componente 1, mientras que conforme se va de abajo hacia arriba aumentan los valores de las variables que determinan el componente 2. Hay una tendencia evidente de la agrupación por fuente de la planta, lo que indica que las variables correlacionadas con las componentes son las más relevantes para explicar las variaciones de IS.



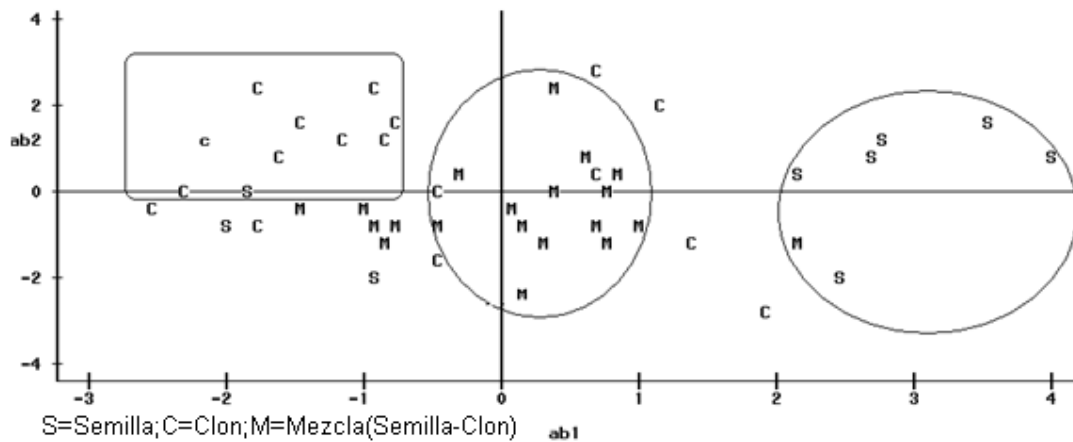


Fig. 6 Distribución de los grupos de planta.

## 5.4 Generación de modelos por fuente

**5.4.1 Semilla.** El modelo generado con la regresión por pasos (Stepwise) para los casos donde la fuente de la planta fue semilla, se conformo de tres variables y explico una variabilidad del 96% del IS, con un nivel de significancia menor a 0.0001. El modelo es como se indica a continuación.

$$IS_{Semilla} = 26.86 - 2.21 (pH_1) + 1.2 (CIC_2) + 0.11 (PSAl_2) \dots \dots \dots (2)$$

Donde:  $pH_1$ =Potencial de hidrógeno a la profundidad de 0 a 20 cm;  
 $CIC_2$ =Capacidad de intercambio catiónico en la profundidad de 20 a 40 cm y  $PSAl_2$   
 = Porcentaje de saturación de aluminio en la profundidad de 20 a 40 cm.

**5.4.2 Clon.** Para el caso de clones, la ecuación de regresión generada para predecir IS, explica sólo un 17% de la variabilidad total con un grado de significancia moderado de 0.076.

$$IS_{Clon} = 13.58 + 0.32 (Arcilla_1) \dots \dots \dots (3)$$

Donde:  $Arcilla_1$ = Arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm.

**5.4.3 Mezcla.** Finalmente, para los sitios con origen combinado de semilla y clon, la ecuación de regresión para IS explica un 58% de la variabilidad total con un nivel de significancia de 0.0054.

$$IS_{Mezcla} = -14.99 + 0.56 (Arcilla_1) + 3.46 (MO_2) + 0.61 (PSB_2) + 0.109(PSAl_2) \dots \dots \dots (4)$$

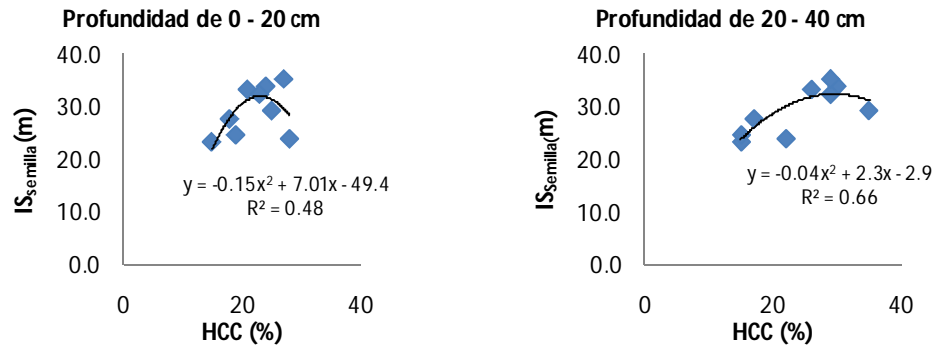
Donde: Arcilla<sub>1</sub> = Arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm; MO<sub>2</sub> = Materia orgánica a la profundidad de 20 a 40 cm; PSB<sub>2</sub> = Porcentaje de saturación de bases a la profundidad de 20 a 40 cm y PSAl<sub>2</sub> Porcentaje de saturación de aluminio a la profundidad de 20 a 40 cm.

### **5.5 Análisis gráfico de la relación IS y variables edafológicas por fuente**

Para observar la asociación gráfica de IS y variables del suelo en forma individual, se procedió a graficar las relaciones más relevantes en cada grupo por separado (semilla, clones y mezclas).

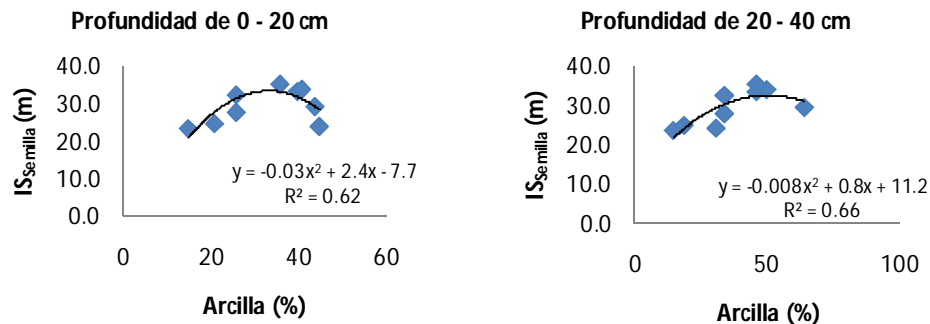
#### **5.5.1 Relación de IS con variables de suelo en el grupo de semilla**

En el caso de semilla resaltan características de textura del suelo y de capacidad de retención de humedad. Sin embargo, en varios casos se muestra una relación en la que existe un óptimo para una característica determinada y después de ese valor crítico el IS disminuye. La tendencia en ambas profundidades muestra que cuando la capacidad de retención de humedad se acerca a valores de 30% y 40% respectivamente, existe un punto de inflexión a partir del cual el crecimiento tiende a disminuir. La capacidad de retención de humedad por si sola explica el 48% y 66% de la variabilidad de IS en la capa superior e inferior, respectivamente (Figura 7a y 7b).



**Fig. 7a y 7b** Relación entre IS y capacidad de retención de humedad en las dos profundidades

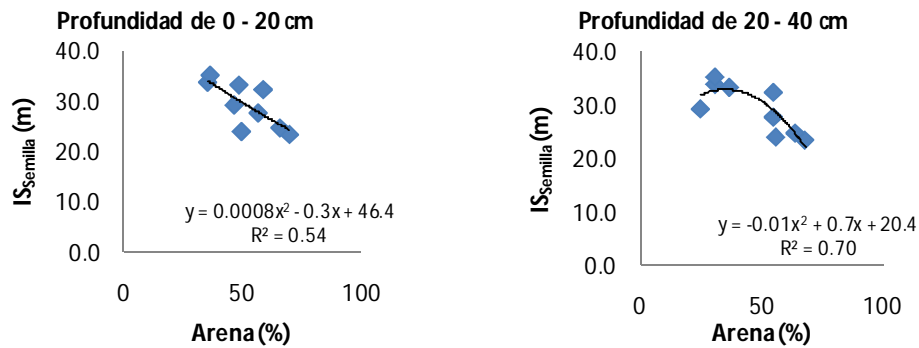
Dado que existe una relación con la textura y la capacidad de retención de humedad, el contenido de arcilla en las dos profundidades mostró una relación similar a la de capacidad de retención de humedad (Figura 8a y 8b).



**Fig. 8a y 8b** Relación entre IS y contenido de arcilla en las dos profundidades

Los resultados indican que el crecimiento tiende a disminuir cuando el porcentaje de arcilla se acerca al 35%, en la profundidad de 0 a 20 cm. Para la segunda profundidad, el crecimiento disminuye cuando el contenido de arcilla es mayor a 50%. La variación explicada de IS y la variable contenido de arcilla es de 62% y 66% para la primera y segunda capa, respectivamente.

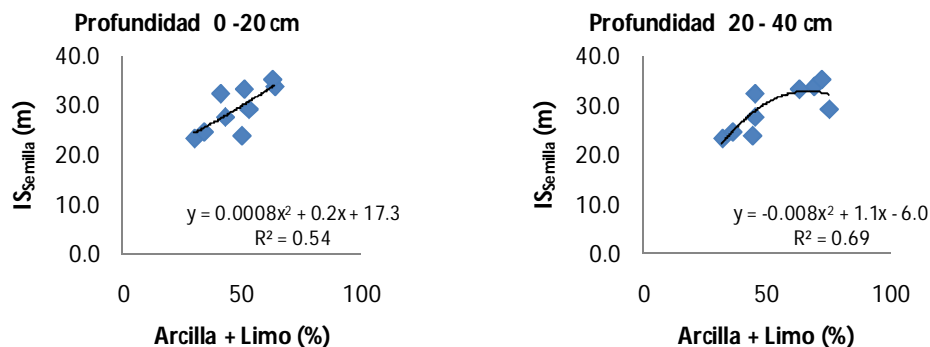
La textura se mostró consistentemente como una variable relevante para explicar el IS. En el caso de partículas gruesas como la arena la relación con IS es negativa (Figura 9a y 9b).



**Fig. 9a y 9b** Relación entre IS y contenido de arena en las dos profundidades

Al aumentar el contenido de arena en ambas profundidades, con valores mayores a 40 y 60%, respectivamente el crecimiento disminuye. La variación del IS que explica el contenido de arena es del 54% y 70%, para la primera y segunda capa, respectivamente.

Los datos muestran evidencia de que la proporción de partículas fina como son limos y arcillas explican razonablemente la variación del IS. Esto se refleja al considerar la suma de limo y arcilla como una sola variable (Figura 10a y 10b).



**Fig. 10a y 10b** Relación entre IS y arcilla + limo en las dos profundidades

Para la segunda profundidad, se tiene que a un porcentaje mayor al 70% de la suma arcilla+limo, el crecimiento disminuye, e decir hay un valor crítico para la presencia de material fino del suelo. La variación explicada del IS a partir de la suma arcilla+limo, es del 54% y 69%, para la primera y segunda capa respectivamente.

En la profundidad de 20 a 40 cm, al aumentar el pH el crecimiento tiende a aumentar. En el caso de la profundidad de 20 a 40 cm, los valores de crecimiento aumentan y en proporción a la cantidad de aluminio intercambiable. El pH explica 57 y 64% de la variación del IS en la primera y segunda capa, respectivamente (Figuras 11a y 11b).

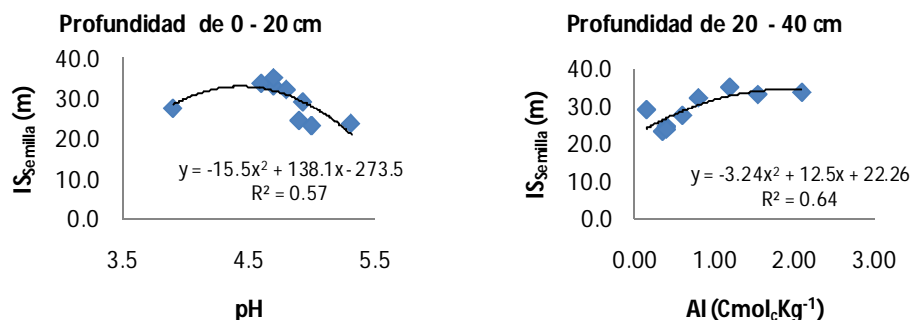


Fig. 11a y 11b Relación entre IS y pH en la profundidad de 0 a 20 cm, y Al de 20 a 40 cm

La Figura 12, muestra que como respuesta a una mayor CIC, el crecimiento tiende a aumentar. Por si sola la variable CIC explica 59 y 52% de la variación de IS, en las profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm, respectivamente. Sin embargo, los datos sugieren que ya no hay una ganancia incremental de IS cuando la CIC de la segunda capa llega a 15 Cmol<sub>c</sub>Kg<sup>-1</sup>.

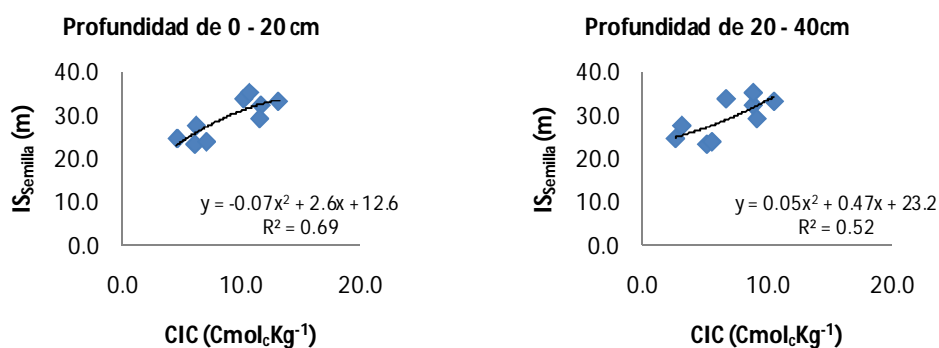
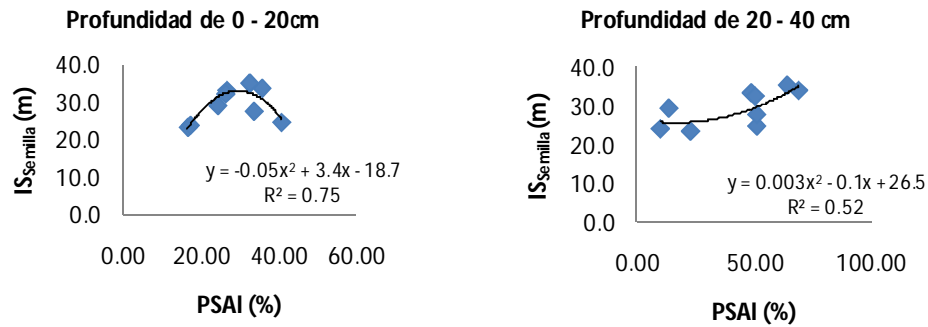


Fig. 12 Relación entre IS y CIC, en ambas profundidades.

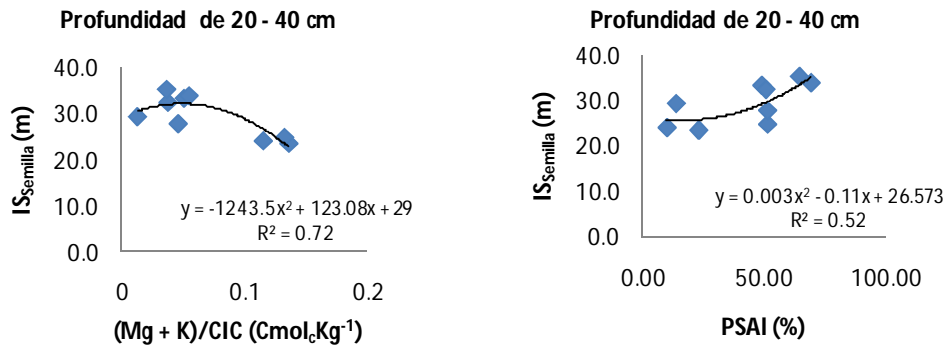
La variable de porcentaje de saturación de aluminio muestra tendencias no esperadas. En la primera profundidad, hay una relación cuadrática entre el

porcentaje de saturación de aluminio y el IS, indicando que el porcentaje crítico es en aproximadamente 30%. Para la segunda capa, se muestra incremento en IS al aumentar el porcentaje de saturación de aluminio. La variación de IS explicada por el porcentaje de saturación de aluminio es de 75% y 52%, para las profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm.



**Fig. 13** Relación entre IS y porcentaje de saturación de aluminio en ambas profundidades

La figura, 14a y 14b, muestran la relación IS y relación (Mg+K/CIC), en la profundidad de 20 a 40 cm, y la relación explicada con el crecimiento es del 72%. En el caso del porcentaje de saturación de aluminio, para la profundidad de 20 a 40 cm, la relación explicada con el crecimiento es del 52%.



**Fig. 14a y 14b** Relación entre IS y relación (Mg+K/CIC) y Porcentaje de saturación de aluminio en ambas profundidades

### 5.5.2 Relación de IS con variables de suelo en el grupo de clon

En el caso de clones, las variables edafológicas que se relacionan con el IS, son la arcilla en ambas profundidades. La variable arena a la profundidad de 20 a 40 cm, y la suma de arcilla+limo.

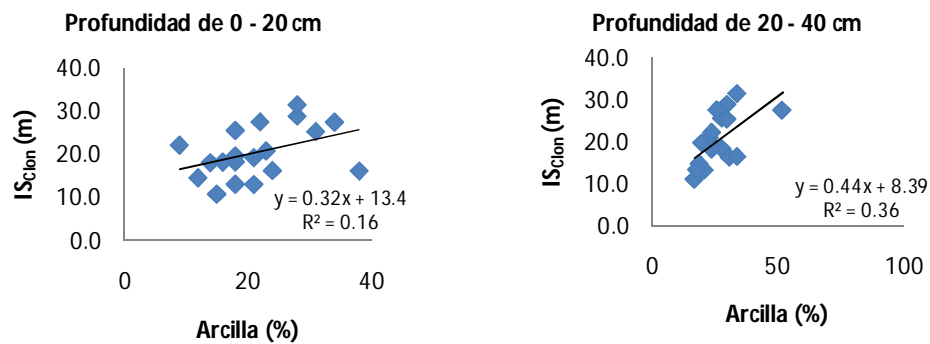


Fig. 15 Relación entre IS y contenido de arcilla en ambas profundidades

Al disminuir el contenido de arcilla en un 35% y un 70% respectivamente, el crecimiento aumenta. La relación explicada de IS y arcilla es del 17 y 36%.

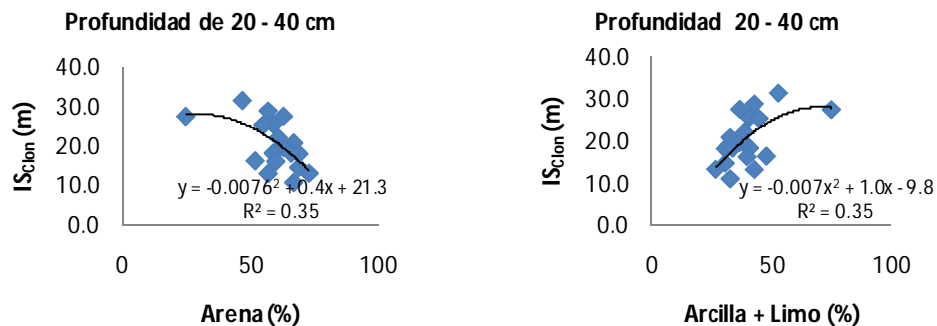


Fig. 16 Relación entre IS y arena, e IS y arcilla + limo

La relación muestra que a valores mayores a 50% de arena en el suelo, el crecimiento disminuye. En relación a la suma arcilla+limo con IS, el crecimiento es mayor a concentraciones de 50%. La relación explicada de IS y arena, es del 35%. Y para arcilla y limo de 35%.

### 5.5.3 Relación de IS con variables de suelo en el grupo de mezcla

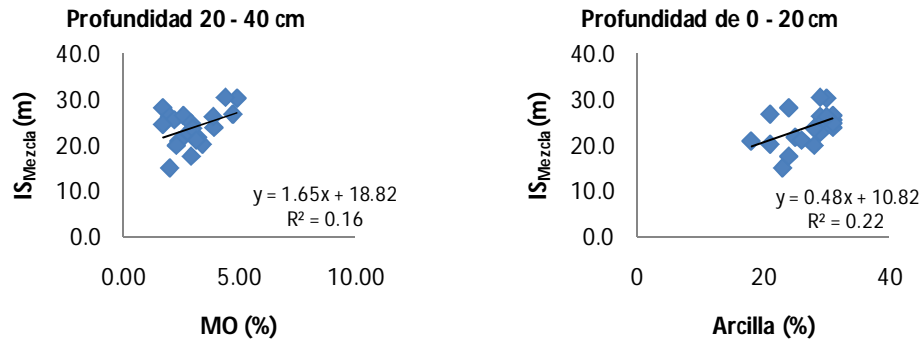


Fig. 17 Relación entre IS y MO y arcilla en ambas profundidades

Para la profundidad de 20 a 40 cm, se tiene que ante un incremento en la materia orgánica, el crecimiento aumenta. Y a valores de 35% de arcilla el crecimiento aumenta. La relación explicada de IS y materia orgánica, es del 16%, y del 22%, para la arcilla.

### 5.6 Generación de modelo de IS y análisis grafico para *E. grandis*

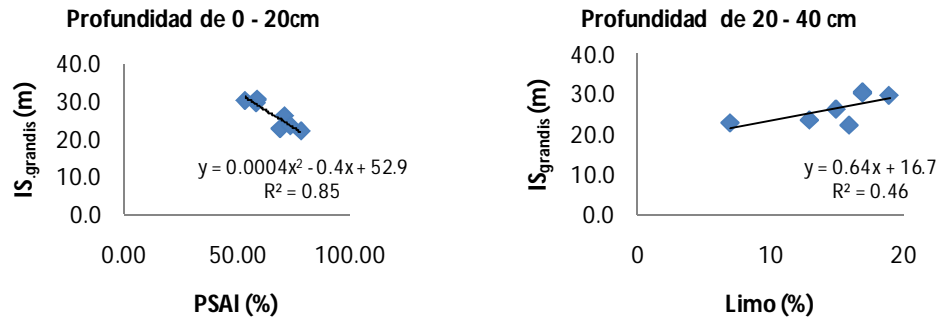
La selección de modelos, también se realizó por el procedimiento de regresión por pasos (Stepwise), se procedió a generó el IS para el caso de semillas en *E. grandis*. El modelo generado, cuenta con un porcentaje de variabilidad total del 94% en un nivel de significancia de 0.0029.

$$IS_{grandis} = 42.41 - 0.31 (PASAI_1) + 0.32 (Limo_2) \dots \dots \dots (5)$$

Donde: PASAI<sub>1</sub> = Porcentaje de saturación de aluminio en la profundidad de 0 a 20 cm y Limo<sub>2</sub> = Limo en la profundidad de 20 a 40 cm.

El análisis grafico, de relación IS con las variables de suelo, en *E. grandis*, la variable mas explicativa es el porcentaje de saturación de aluminio, seguida por el limo, como se muestra en la Figura 18.





**Fig.18** Relación entre IS y porcentaje de saturación de aluminio e IS y limo

La relación explicada para la profundidad de 0 a 20 cm, es del 85% y se tiene que ante un incremento en el porcentaje de saturación de aluminio, el IS disminuye. La relación explicada de IS y limo, es del 46% y ante un incremento en limo hay un incremento de IS.

## VI. DISCUSIÓN

### 6.1 Relaciones generales para todos los sitios

Las diferencias en parámetros dasométricos y de productividad encontrados (Cuadro 1), son atribuibles a las diferencias en edad de las plantaciones y a las dimensiones particulares de los árboles en cada sitio. El incremento medio anual más alto en este estudio fue de  $37.74 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , el cual se considera relativamente alto para esta zona, aunque es un valor común en plantaciones tropicales productivas (Lugo *et al.*, 1998). Sin embargo, todavía bajo un sistema intensivo se reportan productividades mayores. Por ejemplo, Stape *et al.*, (2006), reportaron productividades de  $62 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para plantaciones de *Eucalyptus* manejadas intensivamente en Brasil. Proveyendo de irrigación a las plantaciones de eucalipto se puede lograr una productividad de  $65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Stape *et al.*, 2010). Las condiciones ambientales influyen directamente en la productividad, Almeida *et al.*, (2004), reportaron productividades entre  $10$  y  $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , durante la estación seca con  $788 \text{ mm}$  de precipitación y en la estación más húmeda con  $1358 \text{ mm}$  de precipitación una productividad de  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , en plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil.

Los valores promedios de pH encontrados indican que los suelos del área de estudio son muy ácidos, por lo tanto con altas probabilidad de presentar baja disponibilidad de fósforo. El pH favorable para *E. urophylla* fluctúa entre  $5.5$  y  $6.5$  y no debe ser menor a  $5$  ni mayor a  $7.5$  por los efectos en la disponibilidad de nutrientes (FAO, 1981; FAO, 2000; Delgado, 2009). En un estudio realizado por (Henri, 2001) de productividad del sitio en *E. urophylla* al noreste de Venezuela, se reportan valores de pH máximos de  $5.8$  y mínimos de  $4.5$ . Aggangan *et al.*, (1996), reportaron niveles de pH de  $4.6$  a  $6.6$ , para el crecimiento de plántulas de *E. urophylla*. De acuerdo a los resultados de este trabajo, el pH de los suelos es apropiado para las plantaciones estudiadas.

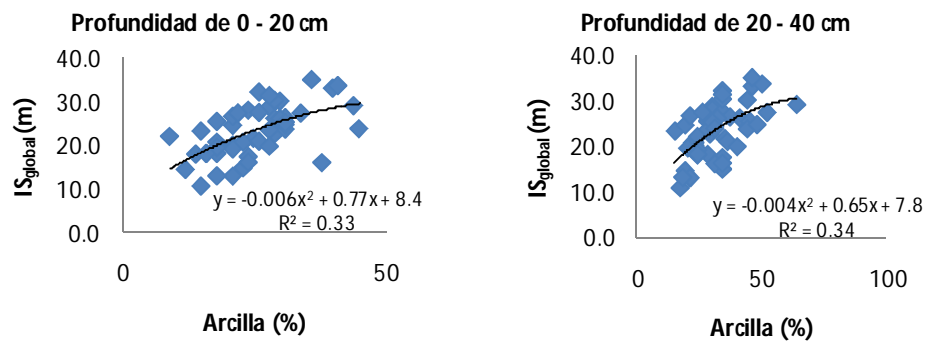
Los valores de materia orgánica encontrados en ambas profundidades, son moderados. Para Julca (2006), el nivel deseable de materia orgánica en los suelos de textura media es del  $2\%$ , del  $1.65\%$  en suelos arcillosos y en arenosos de  $2.5\%$ , de tal forma que los datos encontrados en este estudio son adecuados.

Sin embargo el manejo de las plantaciones conservando niveles adecuados de materia orgánica del suelo es importante. Gill y Abrol (1986), reportaron un decremento en los valores de pH y un incremento en la cantidad de materia orgánica en la capa superficial en plantaciones de *E. tereticornis*, después de 9 años de haber sido establecida la plantación. Además de la importancia de la materia orgánica y pH, la fracción orgánica del suelo es importante para mantener la fertilidad del suelo.

Los valores encontrados de fósforo son bajos, debido a que los valores moderados son de 10 a 20 mg Kg<sup>-1</sup>. Hasta cierto punto, a niveles de pH altos más fosforo disponible, sin embargo a un pH de 7 la disponibilidad de fósforo vuelve a disminuir. Los resultados de CIC son bajos (Brady y Weil, 2002), es decir, la fertilidad de estos suelos es vulnerable al mal manejo. Por lo tanto, la restauración de nutrientes por medio de la fertilización y el manejo de residuos de cosecha son factores críticos. En un estudio, realizado en la India, por (Mishra, *et al.*, 2003), en plantaciones de *E. tereticornis*, se encontró que la CIC incrementa significativamente con la edad de las plantaciones y el cambio puede deberse a la acumulación de humus en la capa superficial del suelo, lo que indica que la carga variable del suelo representada por sus componentes es crucial para los suelos tropicales como el de la zona de estudio.

Los valores de capacidad de retención de humedad (HCC), son moderados en las dos profundidades. Se considera que, la capacidad del suelo para retener agua favorece su provisión para los árboles durante las estación seca del año. Pathak *et al.*, (1964), reportaron valores altos de HCC bajo cubierta forestal que en zonas de cultivo, debido a la descomposición de las raíces y acumulación de materia orgánica. (Mishra, *et al.*, 2003), reportó que después de 9 años del establecimiento de una plantación de *E. tereticornis* en Venezuela, la capacidad de retención de humedad aumentó, por el incremento en la materia orgánica. Sin embargo, la textura del suelo, que no se modifica en el corto plazo, es una variable importante para definir la capacidad de retención de agua del suelo. En este caso, los suelos son de textura media a fina y presentaron contenidos moderados de arcilla que van de 25 a 40%. La precipitación abundante en la zona de estudio permite que con una retención moderada de agua a capacidad de campo, se logren buenos rendimientos en las plantaciones.

Como resultado de la importancia del almacenamiento de agua, el contenido de arcilla fue la variable más correlacionada con el IS, en ambas profundidades (Cuadro 3 y Cuadro 4). La asociación entre ellas, predice que a medida que aumenta el contenido de arcilla, lo hace el IS; pero hasta un cierto nivel. La relación IS y arcilla explicó 33% a 34% de la variación de IS (Figura 3). [Para facilidad de lectura del capítulo de Discusión se vuelven a mostrar las figuras pertinentes de la sección de Resultados].



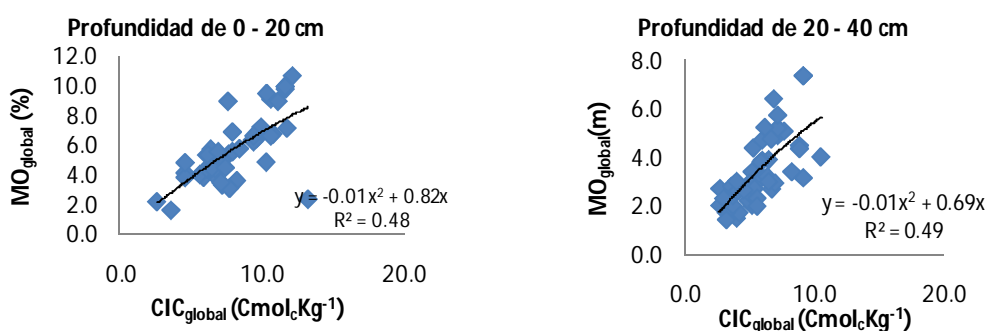
**Fig. 3.** Relación entre IS y contenido de arcilla en ambas profundidades

Orantes (1980), señala el efecto de la textura del suelo como una variable altamente correlacionada con el aumento en crecimiento en altura de los arboles, lo cual coincide con observaciones realizadas por Rodríguez (1982), Fierros (1989) y Narváez (1993). Su efecto se manifiesta en la capacidad de retención de agua, capacidad de intercambio de cationes, en la densidad aparente, balance de micro y macroporos del suelo, en la aireación del suelo, en la superficie específica de las partículas y contenido de nutrientes para las plantas (Supurr y Barnes, 1982; Pritchett, 1986, De la Fuente, 1998). Inions (1991), encontró que el contenido de arcilla, se relaciono significativamente con la productividad de eucalipto *globulus*.

Los suelos del área de estudio se clasifican como Alfisoles y Oxisoles. Ambos grupos pueden tener un horizonte de acumulación, sin embargo, los últimos presentan un grado de fertilidad muy bajo, con un horizonte óxico el cual se encuentra dominado por arcilla de baja reactividad (caolinita) (Lathwell y Grove, 1986). Es importante hacer un estudio detallado de la distribución de grupos de suelo para mejorar las predicciones de IS. Las texturas de media a fina de suelos

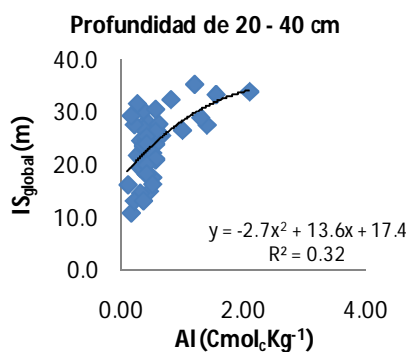
ricos en materia orgánica favorecen la fertilidad del suelo. Es bien sabido que suelos arcillosos retienen más materia orgánica que suelos arenosos (Matus y Maire, 2000). Henri (2001), también reportó que la textura del suelo, se correlacionó positivamente, con el crecimiento de *E. urophylla*, en el noreste de Venezuela.

Aunque la correlación para la CIC, fue positiva en ambas profundidades, la mayor relación se encontró en la profundidad de 20 a 40 cm, posiblemente debido a la mayor localización de raíces finas en esta región (Cuadro 3 y Cuadro 4). La tendencia a mayor crecimiento con mayor CIC se explica en términos de fertilidad del suelo (Figura 2).



**Fig. 2** Relación entre MO y CIC en ambas profundidades.

El contenido de aluminio intercambiable de la profundidad de 20 a 40 cm, presentó una correlación de 0.54 (Cuadro 4). Aunque esta relación no era la esperada dado los efectos nocivos del aluminio. Y la relación explicada es del 32% (Figura 4).



**Fig. 4** Relación entre IS y contenido de aluminio

En suelos con pequeñas cantidades de calcio intercambiable y magnesio, la absorción de fósforo por las raíces y el metabolismo por las plantas puede ser inhabilitado, no solo por la pobreza de raíces debido a los bajos niveles de calcio, y por las pequeñas cantidades de fósforo soluble, pero también por la acumulación de grandes cantidades de aluminio en las superficies de las raíces restringiendo la absorción del calcio y magnesio (McColl, 1969).

Es interesante notar que en los suelos tropicales típicamente en los Oxisoles y Ultisoles, la saturación de aluminio (inverso al porcentaje de saturación de bases), resultó ser un indicador mucho más sensible y de respuesta significativa del cultivo de maíz que el pH del suelo (Aune y Lal, 1997; Schoenholtz, 2000). Esto superpone la importancia de la composición del complejo de intercambio (saturación de bases), en lugar de la CIC, como un índice de la disponibilidad de bases en los suelos, las cuales naturalmente están expuestas a ser lixiviadas y es improbable que hayan recibido aporte de nutrientes (bases) (Schoenholtz, 2000). Generalmente, la tolerancia al aluminio, se separa en dos grupos (Taylor, 1991; Kochian, 1995): el consumo de Al por las raíces y la desintoxicación interna de absorción de Al. Una de la más conocida es la producción y exudación de sustancias quelantes conocidos como ácidos de bajo peso molecular, los cuales forman complejos no tóxicos con Al y ello permite la desintoxicación de la rizosfera y las células de las plantas (Ryan *et al.* 2001, Silva *et al.*, 2001, Kochian *et al.*, 2002). Quizá ésta sea la razón del porque el aluminio se haya correlacionado positivamente con el crecimiento. Por las razones expuestas se esperaba que el aluminio intercambiable fuera una variable crítica en un cultivo forestal de eucalipto. Sin embargo, como se explica más adelante, la relación encontrada es dependiente del origen de la planta (semilla o clón).

Se han realizado investigaciones de tolerancia al Al en cultivos agrícolas, pero también se conocen algunas especies forestales tolerantes a la toxicidad por Al y la tolerancia es generalmente mayor que en los cultivos anuales (Schaedle *et al.*, 1989, Vale *et al.*, 1996). Las especies de *Eucalyptus* son conocidas porque pueden ser tolerantes al Al y algunas pueden beneficiarse ante la presencia de Al en su crecimiento. La habilidad de hacer frente al Al, permite a los eucaliptos prosperar en suelos ácidos que contienen Al, con poca o ninguna respuesta al enclavamiento (Silva, *et al.*, 2004). En un estudio realizado por Silva *et al.*, (2004),

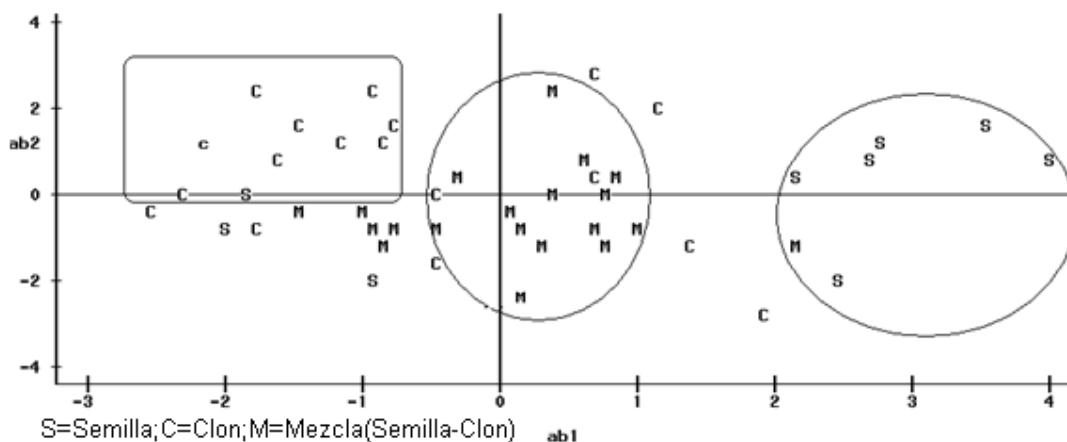
sobre respuestas de crecimiento de raíces en diferentes especies de clones de *Eucalyptus*, ante la presencia de aluminio, resulto que *E. grandis* y *E. cloeziana*, fueron sensibles ante la presencia de aluminio y por su parte *E. globulus* y *E. urophylla*, fueron menos sensibles. La tolerancia de los eucaliptos ante el Al, no está relacionada, con la capacidad de intercambio catiónico de las raíces o la habilidad de las raíces para inducir cambios en el pH de la solución del suelo, que podría disminuir la toxicidad de Al

La baja correlación entre crecimiento del árbol (IS) y otras variables como pH, potasio, porcentaje de saturación de bases, Densidad aparente, N total y materia orgánica del suelo son también resultados inesperados. Normalmente, la MO, N total y las condiciones físicas (Densidad Aparente) del suelo muestran una relación fuerte con el cambio en productividad. La disponibilidad de N es un índice que se relaciona generalmente con el crecimiento del árbol dado que el N es el nutriente más limitante en comunidades de plantas (Fisher y Binkley, 2000). Delgado *et al.*, (2009) encontró resultados similares al de este estudio para plantaciones de *E. urophylla* y *E. grandis* en el centro de México. Lo que los resultados sugieren es que respecto dichas variables, las plantaciones se han establecido en lugares donde las variaciones no son críticas.

La selección de variables en el modelo general (1) sin considerar la fuente considera tanto variables de la primera como de la segunda profundidad. Todas las variables excepto el aluminio tienen una contribución lógica en el modelo. Por ejemplo, el aluminio intercambiable, contrario a lo esperado tiene un efecto positivo. No obstante, el porcentaje de saturación de aluminio tiene una relación esperada. Coincidiendo con otros trabajos (De La Fuente 1998), la textura e indicadores de fertilidad del suelo como CIC y calcio son importantes para los cultivos forestales. Aparicio y López (1995), también reportan ecuaciones de crecimiento, donde la CIC interviene de forma positiva en el crecimiento de *Eucalyptus*

La separación de grupos de acuerdo a la (semilla, clon y mezcla) es evidente. Por lo tanto las variables asociadas a los componentes contribuyen a explicar los cambios en IS (Cuadro 8). De forma dimensional (Figura 6) puede observarse, la distribución de la nube de puntos, coloca de derecha y hacia arriba al grupo de

semilla, en la parte central al grupo de mezclas y de izquierda hacia arriba a los clones. La interpretación para el grupo de semilla es que a mayor contenido de arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm y humedad en la profundidad de 20 a 40 cm el crecimiento incrementa; a mayor porcentaje de aluminio y menor cantidad de calcio para la profundidad de 0 a 20 cm el crecimiento aumenta. En el grupo de mezclas, se considera que a menor contenido de arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm y humedad en la profundidad de 20 a 40 cm el crecimiento incrementa; a mayor porcentaje de aluminio y menor cantidad de calcio para la profundidad de 0 a 20 cm el crecimiento también aumenta. Para los clones se considera que a menor contenido de arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm y humedad en la profundidad de 20 a 40 cm el crecimiento incrementa; a mayor porcentaje de aluminio y mayor cantidad de calcio para la profundidad de 0 a 20 cm el crecimiento también aumenta.



**Fig. 6** Distribución de los grupos de planta

El hecho de que las propiedades químicas no hayan resultado correlacionadas con el IS sugiere que las relaciones con características químicas son más complejas o que no son limitantes para la especie estudiada. La falta de relación del IS con variables del suelo puede dar lugar a los resultados opuestos a los esperados (Madrigal, 1995; De la Fuente, 1998). En el caso de nitrógeno, su falta de correlación con indicadores de crecimiento se ha explicado por el movimiento rápido de este elemento a la biomasa arbórea, debilitando una asociación fuerte

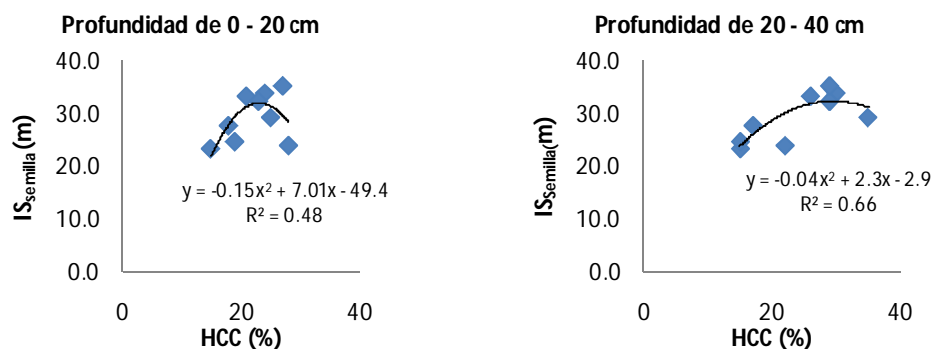


entre los reservorios de nutrientes del suelo y la vegetación. Esto ocurre especialmente en suelos de fertilidad baja a moderada (Fierros, 1989).

## 6.2 Relaciones generales para los sitios con origen por semilla

La ecuación (2) para sitios con fuente de semilla incluyó las variables pH a la profundidad de 0 a 20 cm; la capacidad de intercambio catiónico y el porcentaje de saturación de aluminio para la profundidad de 20 a 40 cm. La ecuación sugiere, que ante un incremento de una unidad en el pH en la capa de 0 a 20 cm, habrá un decremento de 2.21 m en el IS si las otras variables se mantienen constantes. De manera similar, ante un incremento de una unidad en la CIC en la capa de 20 a 40 cm, habrá un incremento de 1.2 m en el IS y finalmente, ante un incremento de una unidad en el porcentaje de saturación de aluminio en la capa de 20 a 40 cm, habrá un incremento de 0.11 m en el IS. Para (Schafer, 1989; Goncalves *et al.*, 1990), el pH, se relacionó de manera positiva con la productividad de *Eucalyptus*. A diferencia de Delgado *et al.*, (2009) en este estudio el contenido de la suma de arcilla y limo favorece el crecimiento, resaltando la importancia los componentes que favorecen la fertilidad del suelo y la retención de humedad.

La (Figura 7), muestra que la capacidad de retención de humedad es un factor importante. La variación explicada es del 48% para la profundidad de 0 a 20 cm y 66% para la profundidad de 20 a 40 cm.

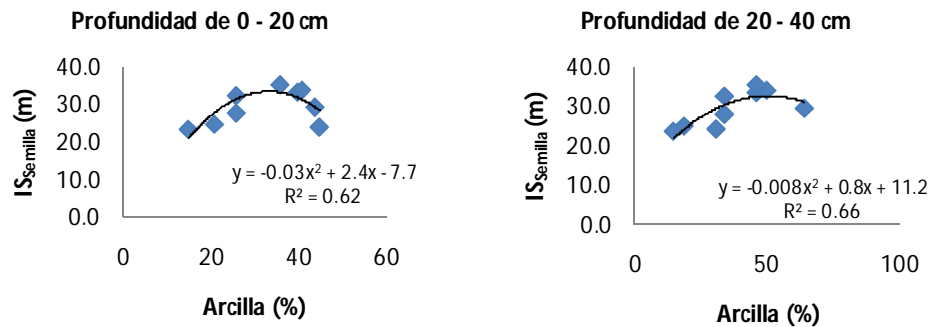


**Fig. 7a y 7b** Relación entre IS y capacidad de retención de humedad en las dos profundidades

El IS alcanza su máximo cuando la capacidad de retención de humedad a capacidad de campo es de 25% y posteriormente tiende a disminuir el crecimiento. La razón de ello es que *E. urophylla* no responde ante condiciones de

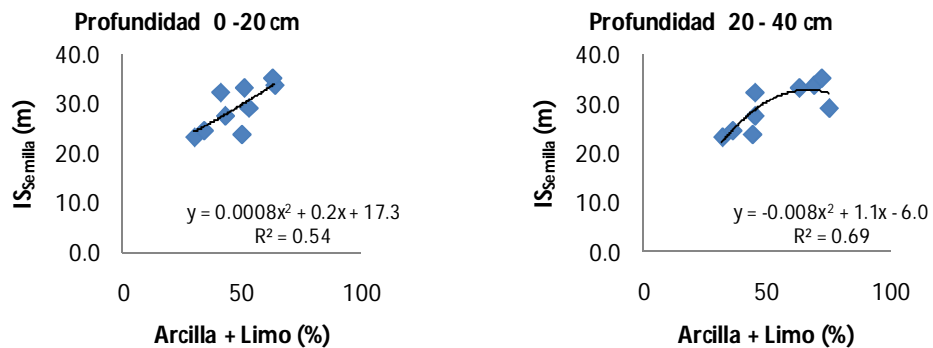
humedad alta y drenaje bajo. Bonilla *et al.*, (2000), encontraron relaciones directas entre el nivel de humedad disponible y el incremento del diámetro y la altura del árbol, en las plantaciones de *Eucalyptus spp.* en Chile.

El IS muestra una relación alta con la arcilla, del 62% a la profundidad de 0 a 20 cm y de 66% de la profundidad de 20 a 40 cm (Figura 8). Puede apreciarse que cuando se cuenta con valores de arcilla mayores a 40%, en la profundidad de 0 a 20 cm el IS disminuye.



**Fig.8a y 8b** Relación entre IS y contenido de arcilla en las dos profundidades

La relación arcilla+limo con el IS (Figura 10), muestra que la suma de arcilla-limo influye en el crecimiento.



**Fig.10a y 10b** Relación entre IS y arcilla + limo en las dos profundidades

Las texturas franco-limoso brindan mejor aireación y retención de agua, y se favorece el crecimiento de raíces finas. Henri, 2001, reportó una relación positiva de crecimiento en una textura franco limoso en el horizonte B en plantaciones de *E. urophylla*, en Venezuela.

### 6.3 Relaciones generales para los sitios con origen por clones

La ecuación (3) de IS, para los clones, cuenta sólo con un porcentaje de variación del 17% y solamente incluye a la arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm. Los resultados indican que en el caso de clones es más difícil encontrar una asociación con variables del suelo. Esto se debe precisamente a que es material genético que puede subsistir ante las condiciones edáficas de la zona de estudio. Sin embargo, dado que el cultivo va agotando las reservas del suelo y modificando algunas propiedades, los factores críticos para los clones podrían aparecer en la segunda rotación. El hecho de no encontrar una relación alta en este momento no significa que la baja disponibilidad de fósforo de los suelos y baja CIC no vayan a representar un factor crítico para el crecimiento en las siguientes rotaciones. Por el momento la textura del suelo sería un indicador probable de influenciar la productividad en los clones.

La relación arcilla con IS (Figura 15), en clones, muestra que el crecimiento tiende a influir, cuando se tiene un contenido de arcilla del 15% para la profundidad de 0 a 20 cm y un 20% de arcilla para la segunda profundidad.

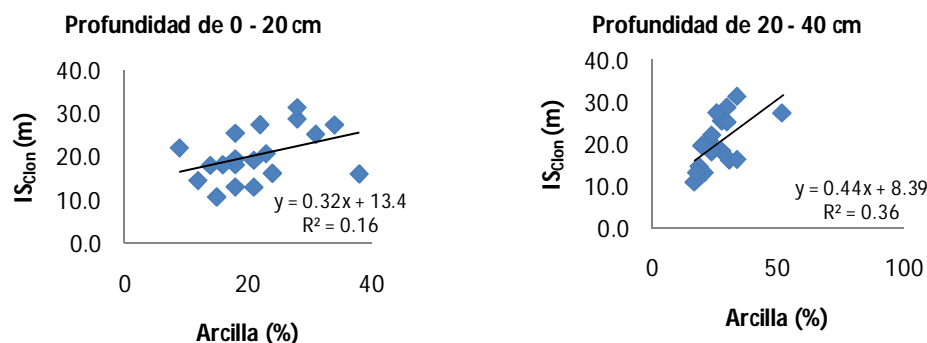
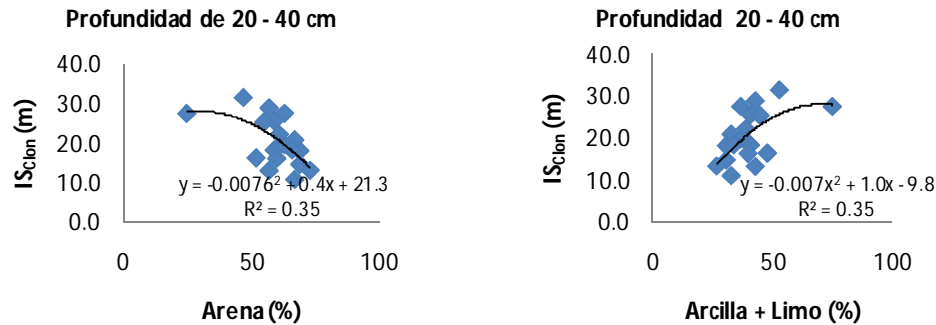


Fig. 15 Relación entre IS y contenido de arcilla en ambas profundidades

Para el caso de propagación por semilla. La Figura 16, contempla que la arena influye en el crecimiento a niveles del 20%, en la profundidad de 20 a 40 cm, conforme tiende a aumentar, el crecimiento disminuye; lo mismo ocurre para el caso de semilla. Y a valores del 30% de arcilla-limo, las condiciones son mejores para la profundidad de 20 a 40 cm, comportamiento.



**Fig 16** Relación entre IS y arena, e IS y arcilla + limo

#### 6.4 Relaciones generales para los sitios con mezcla (clones y semilla)

La interpretación en plantaciones mezcladas, por semilla o clon tiene dificultades prácticas, ya que no se manejaron proporciones específicas de mezcla y además las plantaciones mezcladas son más bien resultado de una situación particular de los plantadores más que de un plan determinado. Sin embargo, dado que ya existe una base de datos del suelo y dasométricos, se discuten las relaciones encontradas. No obstante, llama la atención los resultados de la Figura 6 donde la ubicación de las plantaciones mezcladas se ubica gráficamente entre las de clones y semillas, resaltando que dicho grupo muestra características intermedias.

La ecuación (4) para las mezclas, explica un porcentaje de variación del 58%, involucrando las variables de contenido de arcilla para la profundidad de 0 a 20 cm, materia orgánica, porcentaje de saturación de aluminio y porcentaje de saturación de bases en la profundidad de 20 a 40 cm. La interpretación sugiere que ante un incremento de una unidad de arcilla en la profundidad de 0 a 20 cm, habrá un incremento de 0.56 m en el IS manteniendo constante las otras variables del modelo; así mismo, ante un incremento de una unidad de materia orgánica en la profundidad de 20 a 40 cm, habrá un incremento de 3.46 m en el IS. Faria *et al.*, (2009), encontraron una relación positiva entre el contenido de arcilla y la concentración de carbón orgánico, en plantaciones clonales de *E. urophylla*, en Brasil.

La relación de materia orgánica e IS (Figura 17) para mezclas, de la capa de 20 a 40 cm, la materia orgánica tiende a influir en el crecimiento cuando se cuenta con un porcentaje del 2 %.

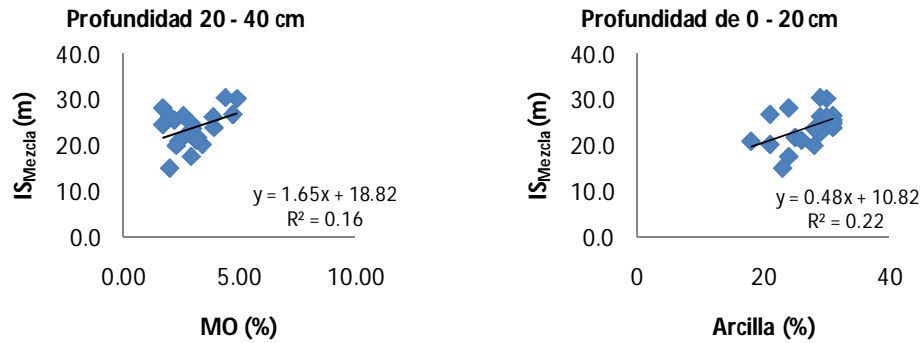


Fig. 17 Relación entre IS y MO y arcilla en ambas profundidades

### 6.5 Relaciones generales para los sitios con origen por semilla y con *E. grandis*

La ecuación (5) de IS de *E. grandis*, en semilla, explicó un porcentaje de variación del 94% y las variables involucradas son el porcentaje de saturación de aluminio de la profundidad de 0 a 20 cm y limo en la profundidad de 20 a 40 cm, (Figura 18) Aparicio y López (1995), encontraron ecuaciones de productividad de sitio, donde el limo interviene en el crecimiento de *E. grandis*. La interpretación sugiere, que ante un incremento de una unidad del porcentaje de aluminio en la primera profundidad, habrá un decremento de 0.31 m en el IS. Y ante un incremento de una unidad del contenido de limo en la segunda profundidad, habrá un incremento de 0.32 m en el IS. Un aspecto relevante es que el grupo de semilla es sensible a los incrementos en la saturación de aluminio. Por lo que los plantadores que manejen semilla con la especie *E. grandis* deben tener cuidado especial con el aluminio intercambiable.

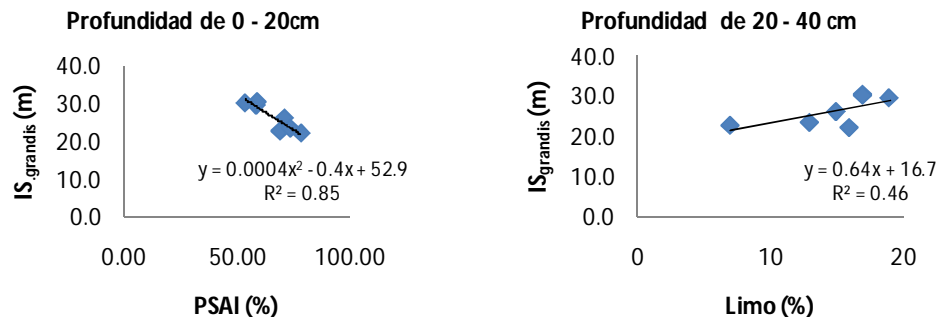


Fig. 18 Relación entre IS y porcentaje de saturación de aluminio e IS y limo

## VII. CONCLUSIONES

Se generaron cuatro ecuaciones para estimar el índice de sitio en plantaciones de *E. urophylla* y una para *E. grandis*.

La primera ecuación ( $IS_{global}$ ) se conformó a partir de seis variables del suelo. Las variables que influyeron de manera positiva en el crecimiento fueron: el aluminio y arcilla para la profundidad de 0 a 20 cm y la capacidad de intercambio catiónico en la profundidad de 20 a 40 cm. Las variables que influyen en forma negativa en el IS, son: el porcentaje de saturación de aluminio y el calcio en la profundidad de 0 a 20 cm y la capacidad de retención de humedad, en la profundidad de 20 a 40 cm. El porcentaje de variación explicada en  $IS_{global}$  fue del 62%.

En la ecuación en propagación por semilla ( $IS_{semilla}$ ), las variables de suelo que se relacionaron positivamente con el crecimiento, fueron: la capacidad de intercambio catiónico y el porcentaje de saturación de aluminio, en la profundidad de 20 a 40 cm y la variable relacionada en forma negativa con el IS fue el pH a la profundidad de 0 a 20 cm. El modelo de IS, para este caso se explicó una variabilidad del 96%.

La ecuación generada para la propagación por clones, se obtuvo un  $IS_{clon}$ , donde la relación de crecimiento, es explicada por la variable arcilla a la profundidad de 0 a 20 cm, con un porcentaje de variabilidad del 17%.

La ecuación para los sitios de origen combinado semilla-clon ( $IS_{mezcla}$ ), el crecimiento se relacionó positivamente con la variable arcilla para la profundidad de 0 a 20 cm y la materia orgánica, el porcentaje de saturación de bases y el porcentaje de saturación de aluminio, en la profundidad de 20 a 40 cm. el modelo explica un porcentaje de variabilidad del 58%.

Para los sitios con *E. grandis*, la ecuación que describe el IS, se relacionó de manera positiva con el Limo en la profundidad de 20 a 40 cm y de manera negativa al porcentaje de saturación de aluminio, para la profundidad de 20 a 40 cm. El modelo explicó una variabilidad del 94%

La baja correlación entre crecimiento del árbol (IS) y otras variables como pH, potasio, porcentaje de saturación de bases, Densidad aparente, N total y materia orgánica del suelo son resultados inesperados. Normalmente, la MO, N total y las condiciones físicas (Densidad Aparente) del suelo muestran una relación fuerte con el cambio en productividad.

El hecho de que las propiedades químicas no hayan resultado correlacionadas con el IS sugiere que las relaciones con características químicas son más complejas o menos limitantes para la especie estudiada.

El resultado de aluminio fue inesperado y posiblemente se explique a que algunas especies de *Eucalyptus* pueden ser tolerantes al aluminio. En particular, este resultado requiere de estudios adicionales.

Las ecuaciones generadas para la estimación del índice de sitio, a partir de variables edafológicas podrán ser utilizadas para predecir rendimientos maderables de las especies estudiadas en lugares donde todavía no hay plantaciones.

## VII. LITERATURA CITADA

- Aggangan, S.N., B. Dell., and N. Malajczuk.1996. Effects of soil pH on the ectomycorrhizal response of *Eucalyptus urophylla* seedlings. *New Phytologist* 134: 359-546.
- Alcántar G. G., y T. Téllez L. I. 2009. Nutrición de cultivos. Mundi Prensa. México, D.F. 451 p.
- Almeida, A.C., Landsberg, J.J., Sands, P.J., Ambrogi, M.S., Fonseca, S., Barddal, and S.M., Bertolucci,F.L. 2004. Needs and opportunities for using a process based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations *For. Ecol. Manage.* 193: 167-177.
- Alvarado A. y W. Forsythe. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29: 85-94.
- Andenmatten, E., y Letourneau, F. 1998. Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para pino Oregón (*Pseudotsuga menziesi* Mirb. Franco) de aplicación en la región andino patagónica de las provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. *Rev. Fac. Agron. La plata.* 103: 69-75.
- Aparicio-Jorge. Luis y López Juan Adolfo .1995. Potencial de *Eucalyptus grandis* en los suelos del sudeste de la provincia de Corrientes y algunos factores edáficos relacionados con la producción de madera. *BOSQUE* 16: 81-89.
- Aune, J.B., and Lal, R.1997. The tropical soil productivity calculator a model for assessing effects of soil management on productivity. *Adv. Soil Sci.*, Lewis Publishers, London, UK 499-520 p.
- Barros, N.F. and R.F. Novais. 1996. *Eucalyptus* nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In *Nutrition of Eucalypts*. Eds. P.M. Attiwill and M.A. Adams. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, 335-355 p.
- Biofor, 2002. Sustainable Forestry, Wood Products & Biotechnology. [www.neiker.net/biofor/pat1-1.htm](http://www.neiker.net/biofor/pat1-1.htm). Consultada el 31 de mayo de 2010.
- Bonilla, Carlos., Bonomelli- Claudia y Urrutia Gonzalo. 2000. Funciones de crecimiento basadas en el contenido de humedad del suelo para plantaciones jóvenes de Eucalipto. *Cien. Inv.Agr.* 27: 151-160.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. New Jersey, Prentice-Hall.
- Brady, N.C., 1984. The Nature and Property of Soils. Macmillian Publishing, New York, 750 p.



- Carmean, H. W. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Advances in Agronomy* 27: 209-269.
- Carrero-G, O.E. y M. Jerez, R. Macchiavelli, G. Orlandoni-Meli y J. Stock. 2008. Ajuste de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus Urophylla* en Venezuela. *Interciencia* 33: 265-272.
- Castillo, A. E. 1999. Influencia de enmiendas orgánicas sobre el aluminio, cambio de un Oxisol. *Cátedras de Química Orgánica y Biológica y Edafología. Ciencia del suelo* 17: 2131-3400.
- Cody, Ronald. C., and J.K. Smith. 1997. *Applied Statistics and the SAS Programming Language. Four Edition.* Prentice- Hall, Inc., Uper Saddle River, New Jersey. 445 p.
- Coleman N.T., and G.W. Thomas. 1967. The basic Chemistry of soil acidity. En R.W. Pearson and F. Adams (ed) *Soil acidity and liming. Spec. Pub. Ser. 12.* Amer. Soc. Agrom. Madison. 41 p
- CONABIO (Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 1998. Obtención de metadatos y cartografía en línea: <http://conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>. Consultada el 18 de mayo de 2010.
- CONAFOR. 2003. Plantaciones Nacionales Forestales [http://www.conafor.gob.mx/programas\\_nacionales\\_forestales/prodeplan/marco\\_prodeplan.htm](http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/prodeplan/marco_prodeplan.htm). Consultada en junio de 2009.
- CONAFOR 2001. Programa Nacional Forestal (2001-2006). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F. 163 p.
- Coops, N.C., Waring, R.H., and Landsberg, J.J. 1998. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiological- based model driven with average monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management* 104: 113-127.
- Clutter, J., Forston., J. Pienaar., L. Brister and G. Bailey. R. 1983. *Timber management: a quantitative approach.* Wiley. Nueva York, EEUU. 333 p
- Daniel, P. W., U. E. Helms, y F. S. Baker. 1982. *Principios de Silvicultura.* Editorial McGraw Hill. México. 492 p.
- De la Fuente-Escobedo Alfonso. 1998. Crecimiento y predicciones de rendimiento de rodales coetáneos de *Pinus rudis* Endl. de pueblos mancomunados, Ixtla Oaxaca. Tesis Doctoral, Posgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México 179 p.

- Delgado-Caballero, C .E., A. Gómez-Guerrero, J. R. Valdez-Lazalde, H. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González y W.R. Horwath. 2009. Índice de sitio y propiedades del suelo en plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en el sureste de México. *Agrociencia* 43: 61-72
- Department of Environment, Climate Change and Water. Página de descripción de los suelos: <http://www.environment.nsw.gov.au/soils/tests4.htm>. Consultada el 20 de junio de 2010.
- Eldridge, K., J. Davidson, C. Harwood, and G. Van Wyk. 1994. *Eucalypt Domestication and Breeding*. Clarendon press-Oxford. 14-16, 205-208.
- Estrada A. J. 2004. *Pastos y forrajes del trópico colombiano*. Primera Edición. Centro editorial. Universidad de Caldas. 506 p.
- Faria, E. G., de Barros. F. N. Novais F. R., Silva. R. I. 2009. Soil fertility, organic carbón and fractions of the organic matter at different distances from *Eucalyptus* Stumps. *R.Bras. Ci. Solo* 33: 571-579.
- FAO. 2000. The crop environmental requeriments database. (Ecocrop): <http://ecocrop.fao.org>. Consultada el 3 de mayo del 2010.
- FAO. 1993. *Montes: estadísticas ahora para mañana*. Roma, Italia. 52 p.
- FAO. 1981. *El eucalipto en la repoblación forestal*. Roma, Italia. 723 p.
- Flaig, W., H. Beutelspacher, and E. Rietz. 1975. Chemical composition and physical properties of humic substances. In J.E. giesecking (ed). Springer-Verlag, New York. Vol. 1. 121 p.
- Fierros G., A.M. 1989. Site quality, growth and yield and growing space occupancy by plantations of *Pius caribea* var. *hondurensis* in Oaxaca, Mexico. Ph.D. Dissertation. Yale University Graduate School. 213 p.
- Fisher, R.F. and Binkley, D. 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. Wiley, New York, 489 p.
- Forsythe W. y Díaz-Romeu R. 1969. La densidad aparente del suelo y la interpretación de análisis de laboratorio para el campo. *Turrialba* 19: 128-131.
- Fralish, J.S. 1994. The effect of site environment on forest productivity in Illinois Shawnee Hills. *Ecol. Appl.* 4: 134-143
- Gill, H.S and Abrol, I.P. 1986. Salt affected soils and their amelioration through afforestation. In: Prinsely, R.T., Swift, M.J. (Eds.), *Amelioration of Soil by Trees A Review of Current Concepts and Practices*. Commonwealth Science Council, London. 43-52 p.

- Garnett, T.P., Shabala, S.N., Smethurst, P.J., and Newman, I.A. 2001. Simultaneous measurement of ammonium, nitrate and proton fluxes along the length of eucalypt roots. *Plant Soil* 236: 55-62.
- Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.-P., Smethurst, and P., Gava, J.L. 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* 193: 45-61.
- Gonçalves, J.L.M., Barros, N.F., Nambiar, E.K.S. and Novais, R.F., 1997. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: Nambiar, E.K.S., Brown, A.G. (Eds.), *Management of soil, nutrients and water in tropical plantations forests*. ACIAR Monograph, Canberra. 43: 379-417.
- Graetz, H. A. 1997. Suelos y fertilización. Traducido por: F. Luna Orozco, Trillas. México. 80 p.
- Goncalves, J.L.M., J.L.I. Dematte y H.T.Z.Do Couto. 1990. Relación entre productividad de de sitios forestales de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* con las propiedades de algunos suelos de textura arenosa en el Estado de Sao Paulo. IPEF, *Piracicaba* 43: 24-39.
- Grey, D. 1989. Site Index. A review. *South Afr. For. J.* 148: 28-32.
- Gunn, B.V. and McDonald, M.W. 1991. *Eucalyptus urophylla* seed collections. *Forest Genetic Resources Information*. No. 19, FAO, Roma. 46-50 p.
- Hamilton, A. R. 1995. Forest Soils and Site Index. *Woodland Owner Notes*. North Carolina Cooperative Extension Service. 2 p.
- Han, Y. H. Chen., Klinka, K., and Kabzems Richard.D. 1998. Site index, site quality, and nutrients of trembling aspen: relationships and predictions. *Can J. For Res.* 28: 1743-1755.
- Henri-Carolyn, J. 2001. Soil-site productivity of *Gmelina arborea*, *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* forest plantations in western Venezuela. *Forest Ecology and Management* 144: 255-264.
- House, A. P. N. and J. C. Bell. 1994. Isozyme variation and mating system in *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake. *Silvae Genet.* 43: 167-176.
- Hubbard, M.R., J. Stape, M. G. Ryan, A. C. Almeida and J. Rojas. 2010. Effects of irrigation on water use and use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management* 259: 1714-1721.
- Hue, N.V and Amien, Y.I. 1989. Alumirium detoxification with green manures. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 20:1499-1511.
- I. Brady, N. C. and W. Ray R. 2000. *Element of the natura and properties of soils*. Pretince –Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 559 p.

- Inions, G. 1991. "Relationships between environmental attributes and the productivity of *Eucalyptus globulus* in South-West Western Australia", *Third Australian forest soil and nutrition conference*. Melbourne.116-131 p.
- Jayaraj, R. S. C., C. S. Kannan, R. Hedge, K.G. Ajith-Kumar, K.S. Venkataramanan, and K. Gurumurthi. 1996. A comprehensive method of assessing *Eucalyptus* clonal trials. Conferencia IUFRO sobre Silvicultura e Melhoramento de Eucaliptos. Agosto 24-29. Salvador, Brasil. 35-42 p.
- Julca O., and A. Meneses, F. L. 2006. Organic Matter, Importance, Experiences and it Role in Agriculture. IDESIA Chile 24: 49-61.
- Kamprath, E.F. 1970. Exchangeable aluminum as a criterium for liming leached mineral soils. Soil Sci. Soc. Amer. Soc. 34: 252-254.
- Klinka, K., Wang, Q., Carter, R. E., and Chen, H.Y.H. 1996. Height growth elevation relationships in subalpine forests of interior British Columbia. For. Chron. 72: 193-198.
- Kochian, L.V., N.S. Pence, D.L.D. Letham, M.A. Piñeros, J.V. Magalhães, O.A. Hoekenga and D.F. Garvin. 2002. Mechanisms of metal resistance in plants: aluminum and heavy metals. Plant Soil 247:109-119.
- Kochian, L.V. 1995. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 46: 237-260.
- Laclau, J.P., Almeida, J.C.R., Gonçalves, J.L.M., Saint-André, L., Ventura, M., Ranger, J., Moreira, R.M., and Nouvellon, Y., 2009. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf life span and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. Tree Physiology 29: 111-124.
- Laffan, M.D. 1994. A methodology for assessing and classifying site productivity and land suitability for eucalypt plantations in Tasmania. Tasforests 6: 61-67.
- Lathwell, D. J. and T. L. Grove. 1986. Soil plant relationships in the tropics. Annual Review of Ecology and Systematics. 17 : 1-16.
- Leite, F.P. 2001. Nutritional relationships and chemical characteristics alterations in soils of the Rio Doce Valley caused by eucalyptus cultivation. Ph.D. Thesis. Federal University of Viçosa. Viçosa, Brazil. (In Portuguese with English abstract.). 72 p.
- Lima, A. M. N., I. R. Silva, J.C.L. Neves, R. F. Novais, N. F. Barros, E. S. Mendonç, T. J. Smyth, M. S. Moreira and F. P. Leite. 2006. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. Forest Ecology and Management 235: 219-231.

- Lindenmayer, D. B., and Cunningham, R.B. 2000. Cavity sizes and types in Australian *Eucalyptus* from wet and dry forest types: A simple of rule of thumb for estimating size and number of cavities. *Forest Ecology and Management* 137: 139-150.
- Ma, J.F. 2001. Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants. *Plant Cell Physiol.* 41:383-390.
- Mann, L.K. 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science* 142: 279-288.
- Madrigal H., S. 1995. Determinación de la productividad de dos especies de pino considerando características físicas y químicas del suelo, en Michoacán. Tesis de Maestría Universidad Autónoma Chapingo, México. 115 p.
- Magill, A.H., Aber, J.D., Hendricks, J.J., Bowden, R.D., Melillo, J.M., and Steudler, P. 1997. Biogeochemical responses of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition. *Ecol. Appl.* 7: 402-415.
- Martínez-Ruiz, R., H. S. Azpiros-Rivero, J.L. Rodríguez-De la O, V.M. Cetina-Alcalá y M. A. Gutiérrez- Espinoza. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Ra Ximhai. Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable* 2: 815-846.
- Matus, J. F. y Maire, G. C. R. 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agric. Téc.* 60:112-126.
- McCull, G.J. 1969. Soil –plant relationships in a *Eucalyptus* forest on the south coast of New South Wales. *The Ecological Society of America* 50: 354-362.
- McKenney, D. W., and J. H. Pedlar. 2003. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *For. Ecol. Manage.* 175: 497-507.
- Méndez, M. J. T. 2008. Diagnóstico fitosanitario en plantaciones forestales comerciales en las Choapas, Veracruz y Huimanguillo, Tabasco. *CONAFOR-UACH.* 97 p.
- Mishra, A., S.D. Sharma and G.H. Khan. 2003. Improvement in physical and chemical properties of sodic soil by 3, 6 and 9 years old plantation of *Eucalyptus tereticornis* Biorejuvenation of sodic soil. *Forest Ecology and Management* 184: 115-124.
- Moroni, M.T., Smethurst, P.J., and Holz, G.K. 2002. Nitrogen fluxes in surface soils of young *Eucalyptus nitens* plantations in Tasmania. *Aust. J. Soil Res.* 40: 543-553.

- Moroni, M.T. 2001. Predicting N deficiency in *E. nitens* plantations. Ph.D. Thesis, University of Tasmania, Hobart, Australia.
- Mustin, M., 1987. Le composta. Ed. Francois Dubusc. Paris, 954 p.
- Neves, J.C.L., R.F. Novais and N.F. Barros. 1982. Effect of aluminum in nutrient solution on growth and nutrient uptake by *Eucalyptus* spp. (In Portuguese with English abstract.). Rev. Árvore 6:1-16.
- Nieto M. V., y J. Rodríguez 2003. Descripción de especies: *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. Corporación Nacional de Investigación Forestal. Santafé de Bogotá, Colombia. Reforestation, Nurseries, Species and Genetics Resouces (RNGR) 473-475.
- Orantes G., F. R. 1980. Determinación de la calidad de estación para *Pinus hartwii* Lind. en Zoquiapan, México. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 77 p.
- Pathak, A.N., H. Shankar., and Mukherji, P.K. 1964. A catena study of the physical and chemical properties of the soil under cultivation and forest cover. Indian For. 90: 171-175.
- Periera, J.S., Tome, M., Madeira, M., Oliveira, A.C., Tome, and J., Almeida, H. 1996. Eucalypt plantations in Portugal. In: Attiwill, P.M., Adams, M.A. (Eds.), Nutrition of Eucalypts. CSIRO, Melbourne. 371-387 p.
- Ponnamperuma, P.N., 1972. The chemistry of submerged soils. Adv. Agron. 24: 29-88.
- Pritchett, W.L. 1991. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México, D.F. 634 p.
- Pritchett W.L. 1986. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México, D.F. 634 p.
- Rhoades, C., and D. Binkley. 1996. Factors influencing decline in soil pH in Hawaiian Eucalyptus and Albizia plantations. Forest Ecology and Management 80: 47-56.
- Rodríguez F., C. y E. Flores A. 1989. Caracterización de factores básicos silvícolas para planes de manejo. In Memoria del Congreso Forestal Mexicano. Toluca, México. 213-272 p.
- Russell, E.W. 1973. Soil conditions and plant growth. 10th edn. Longman. London, UK, 849 p.

- Ryan, P.R., Delhaize, E. and D.L. Jones. 2001. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52:527-560.
- Sánchez-Vargas, Nahum M., J. Jesús Vargas-Hernández, Lucero del Mar Ruiz-Posadas y Javier López Upton. 2004. Repetibilidad de parámetros genéticos en un ensayo clonal de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en el sureste de México. *Agrociencia* 38: 465-475
- SAS, 2004. Paquete Estadístico: Statistical Analysis System for Windows 9.0.
- Schaedle, M., F.C. Thornton, D.J. Raynal and H.B. Tepper. 1989. Response of tree seedlings to aluminum. *Tree Physiol.* 5:337-356.
- Schafer, G.N. 1989. Site indicator species for predicting productivity of pine plantations in the Southern Cape, *South African Forestry Journal*, 148: 7-16.
- Schlesinger H. W. 1997. Biogeochemistry an analysis of global change. 2<sup>nd</sup> ed. San Diego California, USA. 588 p.
- Schoenholtz, S.H., H. V. Miegroet and J.A. Burger. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138: 335-356.
- SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. Obtención de la Norma Oficial Mexicana de análisis de suelo en laboratorio: [//www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf). Consultada 3 de mayo de 2010.
- Shedley, E., Dell, B., and Grove, T.S. 1993. Effects of inorganic nitrogen forms on growth of *Eucalyptus globulus* seedlings. In: Barrow, N.J. (Ed.), *Plant Nutrition-From Genetic Engineering to Field Practice*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 595-598 p.
- Schumacher, F. X. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. *Journal of Forestry* 37:819-820.
- Silva, I. R., R. F. Novais, G. N. Jham, N. F. Barros, F. O. Gebrim, F. N. Nunes, J. C. L. Neves and F. P. Leite. 2004. Responses of eucalypt species to aluminum: the possible involvement of low molecular weight organic acids in the Al tolerance mechanism . *Tree Physiology* 24: 1267-1277
- Silva, I.R., T.J. Smyth, C.D. Raper, T.E. Carter and T.W. Ruffy. 2001. Differential aluminum tolerance in soybean: an evaluation of the role of organic acids. *Physiol. Plant.* 112:200-210.
- Smethurst, P., G. Holza, M. Moroni and C. Baillie. 2004. Nitrogen management in *Eucalyptus nitens* plantations. *Forest Ecology and Management* 193: 63-80

- Sollins, P., G.P. Robertson, and G. Uehara. 1988. Nutrient movility in variable-and permanent-charge soils. *Biogeochemistry* 6: 681-683.
- Stevenson, F.J. 1986. *Cycles of soil*. Wiley, New York.
- Stape, J.L., D. Binkley., M. G. Ryan., S. Fonseca., R. A. Loos., E. N. Takahashi., C. R. Silva., S. R. Silva., R. E. Hakamada., J. M. de A. Ferreira., A. M.N. Lima., J. L. Gava., F. P. Leite., H.B. Andrade., J. M. Alves., G. G.C. Silva., and M. R. Azevedo. 2010. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management* 259: 1684-1694.
- Stape, J.L., D. Binkley., S. Jacob., and E. N. Takahashi., 2006. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential in *Eucalyptus* plantations al landscape scales in Brazil. *Forest Ecology and Management* 223: 1358-362.
- Stape, J. L., D. Binkley, and M. G. Ryan 2004. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management* 193: 17-31.
- Supurr, S.H. y B.V. Barnes. 1982. *Ecología Forestal*. Traducción del inglés por Carlos Luis Raigorodsky. A.G.T. Editor. 690 p.
- Supurr, S.H., and Barnes, B.V. 1980. *Forest ecology*. 3<sup>rd</sup> ed..John Wiley and Sons, New York.
- Taylor, G.J. 1991. Current views of the aluminum stress response: the physiological basis of tolerance. *Curr. Topics Plant Biochem. Physiol.* 10:57-93.
- Téllez-Mejía E., M. de J. González-Guillén, H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González, R. J. Lilieholm y A. Gómez-Guerrero. 2008. Rotación óptima de plantaciones de eucalipto al incluir ingresos por captura de carbono en Oaxaca, México. *Fitotecnia Mexicana* 31: 173-182.
- Uehara G. and Gavin. Gillman. 1981. *The Mineralogy, Chemistry, and Physics of Tropical Soils with Variable Charge Clays*. Westview Press, Inc. Boulder. Colorado United States of América. 182 p.
- Vale, F.R, A.E. Furtini Neto, N.B. Renó, L.A. Fernández and A.V. Resende. 1996. Root growth of forest species in acid soil. (In Portuguese with English abstract.) *Pesq. Agrop. Bras.* 31:609-616.
- Vale, F.R., R.F. Novais, N.F. Barros and R. Santa Ana. 1984. Effects of aluminum on the kinetics of nitrate and ammonium uptake by intact roots of *Eucalytus alba*. (In Portuguese with English abstract.) *Rev. Árvore* 8:123-132.



- Van, Wambeke, Armand. 1993. Soils of the Tropics, Properties and Appraisal. McGraw-Hill, Inc. Department of Soil, Crop, and Atmospheric Sciences Cornell University Ithaca, New York. 343 p.
- Van, Wambeke. A., Eswaran ,H., Herbillon, A.J and Comerma, J. 1983. Oxisols. *In*: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (eds.). Pedogenesis and soil taxonomy. II. Soil orders. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 325-353 p.
- Vásquez García Irma. 2010. Prototipo de un penetrometro cónico de impacto y su validación de uso en suelos forestales. Tesis de Maestría, Posgrado Forestal, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México 54 p.
- Vogt, K.A., Grier, C. C. and Vogt, D.J. 1986. Production, turnover and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forest. *Adv. Ecol. Res.* 15: 303-377.
- White, A. A.; and Molnar, M. A. 2002. To Johannesburg and Beyond: Strategic Options to Advance the Conservation of Natural Forests. *Forest Trends.* 28 p.
- Wong, M.T F., Akyeampong. E., Nortcliff, S., Roa, M.R and Swift, R.S. 1995. Initial responses of maize and beans to decreased concentration of monomeric inorganic aluminium with application of mature or tree prunings to an Oxisol in Burundi. *Plant and Soil* 171: 275- 282.
- Wright, J.A., and L.F. Osorio. 1998. Comparison of *Eucalyptus urophylla* provenance performance at half-rotation in Colombia and hybrid strategies with *Eucalyptus grandis*. *Forest Ecology and Management* 83: 117-122.
- Wright, J. A. 1997. A review of the worldwide activities in tree improvement for *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla* and hybrid *urograndis*. *In*: Proceedings of the 24th Biennial Southern Forest Tree Improvement Conference.

## ANEXO 1

Cuadro A.1 Comparación de IS e IS\_Local para los 49 sitios de estudio.

Predio	Sitio	Altura(m)	Edad (años)	IS_Local(m)	IS (m)
L02001	1	28.24	7	28.79	33.22
L02001	2	28.72	7	29.27	33.79
L02002	1	27.46	7	27.99	32.3
L02002	2	29.9	7	30.48	35.17
L02003	1	23.36	7	23.81	27.48
L02003	2	21.74	7	22.16	25.58
L02003	3	24.54	7	25.01	28.87
L98003	1	20.1	11	20.17	21.08
L98003	2	19.02	11	19.09	19.94
L99006	1	17.04	10	17.14	18.25
L99006	2	15.2	10	15.29	16.28
L99003	1	16.9	10	17	18.1
L03002_1	1	22.8	6	23.48	28.16
L03002_1	2	24.48	6	25.21	30.24
L03002_1	3	17.58	6	18.1	21.72
L03002_1	4	21.28	6	21.91	26.29
L03002_2	1	20.66	6	21.27	25.52
L03002_2	2	19.86	6	20.45	24.53
L03002_2	3	18.4	6	18.95	22.73
L03002_3	1	12.12	6	12.48	14.97
L03002_3	2	16.88	6	17.38	20.85
L03002_3	3	16.32	6	16.81	20.16
L03002_4	1	18.92	6	19.48	23.37
L03002_4	2	19.98	6	20.57	24.68
L03003	1	11.82	6	12.17	14.6
L03003	2	8.76	6	9.02	10.82
L03003	3	16.86	6	17.36	20.83
L03005	1	22.4	6	23.07	27.67
L03005	1	22.4	6	23.07	27.67
L05001	1	21.04	4	22.83	30.45
L05001	2	12.12	4	13.15	17.54
L05001	3	18.48	4	20.06	26.74
L05001	4	16.48	4	17.89	23.85
L05001	5	18.3	4	19.86	26.48
L05001	6	17.14	4	18.6	24.81
L05001	7	16.34	4	17.73	23.65
L05001	8	18.14	4	19.69	26.25
L96037	1	15.94	13	15.95	16.16
L96037	2	23.62	13	23.64	23.95
L05014_1	1	19.02	4	20.64	27.53
L05014_2	1	21.76	4	23.62	31.49
L05014_3	1	17.49	4	18.98	25.31
L00005	1	23.8	9	24.01	26.14
L96031	1	12.96	13	12.97	13.14
L99009	2	27.28	10	27.44	29.22
L96035	1	18	13	18.02	18.25
L96035	2	19.02	13	19.04	19.28
L96035	3	19.36	13	19.38	19.63
L96035	4	21.86	13	21.88	22.16
L96029	1	12.9	13	12.91	13.08

El "IS\_Local", se refiere a la estimación de IS, con parámetros generados por "SOLVER", exclusivamente para los 49 sitios de estudio. Sin embargo, se utilizó los parámetros estimados por Méndez y De los Santos, debido a que se contaba con un número mayor de sitios.

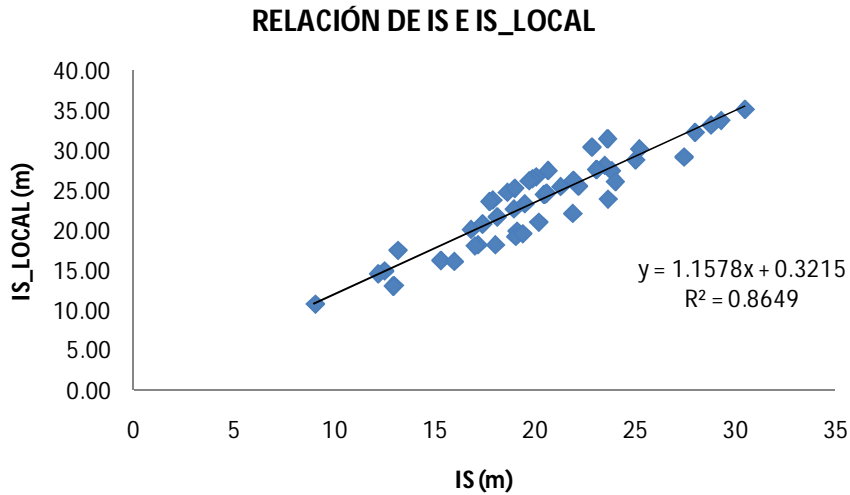


Fig. A.1 Relación de IS e IS\_Local, para los 49 sitios de estudio.

Cuadro A. 2 Estimación de coeficientes para el IS\_Local, con la técnica de Solver.

Parámetros	Coefficientes
A	20.0938928
B	57.7813148
C	4.43982464

Estimación de volumen, según la fuente de propagación (información generada por De los Santos)

Modelos generales cuando se desconoce la fuente, pero se conoce la edad (ajustado con el ahusamiento). Para fuente de propagación de MEZCLAS

$$V = \alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2} E^{\alpha_3}$$

Ecuación	GL Modelo	GL Error	SCE	CME	Raiz CME	R-cuadrado	R-cuadrado ajustada
d	2.5	8071	20983.9	2.6001	1.6125	0.9458	0.9458
V	2.5	8071	27.2507	0.00338	0.0581	0.9232	0.9231
Vsc	1	8072	0.8427	0.000104	0.0102	0.9969	0.9969

Parámetro	Valor Estimado	Error Estandar	t calculada	Valor de Rechazo
a <sub>0</sub>	0.000084	1.16E-06	72.47	<.0001
a <sub>1</sub>	1.731858	0.00372	465.94	<.0001
a <sub>2</sub>	0.955688	0.00511	186.85	<.0001
a <sub>3</sub>	0.018002	0.00503	3.58	0.0003
b <sub>0</sub>	0.00003	4.30E-08	699.61	<.0001
d <sub>0</sub>	0.860645	0.000164	5251.37	<.0001

Modelos cuando se conoce la fuente y la edad (sin el ajuste el ahusamiento), fuente de propagación por SEMILLA.

$$V = \alpha_0(.)D^{\alpha_1}H^{\alpha_2}E^{\alpha_3(.)}$$

Ecuación	GL Modelo	GL Error	SCE	CME	Raiz CME	R-cuadrado	R-cuadrado ajustada
V	8	8067	19.7745	0.00245	0.0495	0.9442	0.9442
V <sub>sc</sub>	2	8073	0.8415	0.000104	0.0102	0.9969	0.9969

Parámetro	Valor Estimado	Error Estandar	t calculada	Valor de Rechazo
a <sub>0s</sub>	0.000067	2.20E-06	30.2	<.0001
a <sub>0c</sub>	-5.21E-06	2.14E-06	-2.43	0.015
a <sub>1</sub>	1.694084	0.00793	213.59	<.0001
a <sub>2</sub>	1.032558	0.0135	76.3	<.0001
a <sub>3s</sub>	0.038023	0.0103	3.68	0.0002
a <sub>3c</sub>	0.089856	0.0204	4.4	<.0001
b <sub>0s</sub>	0.000024	1.17E-07	202.59	<.0001
b <sub>0c</sub>	1.49E-06	5.78E-07	2.57	0.0101
d <sub>0s</sub>	0.860041	0.000396	2170.32	<.0001
d <sub>0c</sub>	0.007895	0.00188	4.21	<.0001

Modelo de volumen para clones

$$V = 0.0000618 \times D^{1.694084} H^{1.032558} E^{0.127879}$$

Estimación del Área Basal

$$A = (\pi/4) \cdot d^2$$

Donde "d" es el diámetro.

$$AREA\_AP = (DAP \text{ cm})^2 \cdot (0.7854)$$

$$AB = (TOT\_AREA\_AP \cdot (1/10000)) \cdot 20$$

20= 1/20 de hectárea.