



LA PREDICCIÓN DEL SITIO FORESTAL PARA ESPECIES QUE SE PLANTAN EN EL TROPICO

JORGE I. DEL VALLE ARANGO¹

RESUMEN

El artículo revisa la literatura relativa a los métodos de predicción del sitio forestal con énfasis en las especies tropicales y, en especial, aquellas que se han plantado en Colombia. Luego de definir los conceptos de sitio, índice de sitio y de calidad de sitio, se describen con ejemplos las siguientes cinco aproximaciones para la predicción del sitio: factores climáticos, empleo de la vegetación indicadora, correlación con la fisiografía, correlación con características del suelo y bioensayos.

Palabras claves: *predicción del índice de sitio, Cupressus lusitanica, Pinus patula, Cordia alliodora, Alnus jorullensis.*

ABSTRACT

FOREST SITE PREDICTION FOR SPECIES PLANTED IN THE TROPIC

In this paper the literature on methods of forest site prediction is revised, emphasising in tropical species, specially those planted in Colombia. After defining the concepts of site, site index and site quality, the following five approximations are described with examples for the prediction of the site: climatic factors, vegetational indicators, physiographic correlations, soil characteristics correlations and bioassays.

1 Profesor Titular. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Apartado 568

Keywords: Site index prediction, *Cupressus lusitanica*, *Pinus patula*, *Cordia alliodora*, *Alnus jorullensis*.

INTRODUCCION

Los conceptos de índice de sitio y de calidad de sitio (también denominado calidad de estación por los alemanes y clase de fertilidad por los franceses), son de la máxima importancia en la silvicultura de plantaciones, y su predicción, uno de los elementos centrales en la planificación del uso de la tierra con fines forestales. Esto ha llevado a que el volumen de información sobre el tema sea en verdad muy grande, en especial fuera del trópico. En el trópico, la cantidad de información disponible es más bien modesta dado lo reciente de la actividad y la escasez de recursos que se dedican a la investigación. La revisión de literatura que se presenta no pretende llegar al estado del arte, sino recoger una serie de experiencias que, en la mayoría de los casos, o bien se han realizado en el trópico, o se han realizado en regiones subtropicales pero con especies que también se plantan en el trópico; al seleccionar la literatura, se ha dado preferencia a los trabajos realizados en Colombia y a las especies que aquí se plantan.

El autor espera que este escrito estimule la investigación sobre la predicción del sitio forestal y la utilización de los resultados en la planificación del uso de la tierra y el manejo forestal.

EL CONCEPTO DE SITIO Y DE CALIDAD DE SITIO

El sitio no es más que un conjunto de factores edáficos y climáticos que permiten un determinado nivel de productividad a una especie o grupo de especies arbóreas. Generalmente el sitio se define en función de variables dasométricas de la cosecha. Para el efecto se ha encontrado que la variable más útil es la altura promedio de los árboles dominantes, o de una fracción arbitraria del total de árboles; por lo regular, entre los 100 y 250 árboles más altos por hectárea (Bruce y Schumacher, 1965; Husch, 1963). Otros, valiéndose de la correlación positiva que existe entre el diámetro y la altura, miden la altura de cierto número de árboles más gruesos, usualmente también entre 100 y 250 por hectárea, los cuales representan un porcentaje muy alto de los árboles que llegarán a la cosecha final (Tschinkel, 1972a; del Valle y González, 1988). La elección de la altura sobre el volumen, el área basal, el diámetro medio y aún la biomasa, estriba en el importante hallazgo de que la altura promedio de los árboles más altos es casi independiente de la densidad de la masa en muchas especies arbóreas y, por lo tanto, no cambia con las entresacas ni con la densidad de plantación. Sólo depende de los factores del sitio (Sjolte-Jorgensen, 1967) tal como se aprecia en la Figura 1.

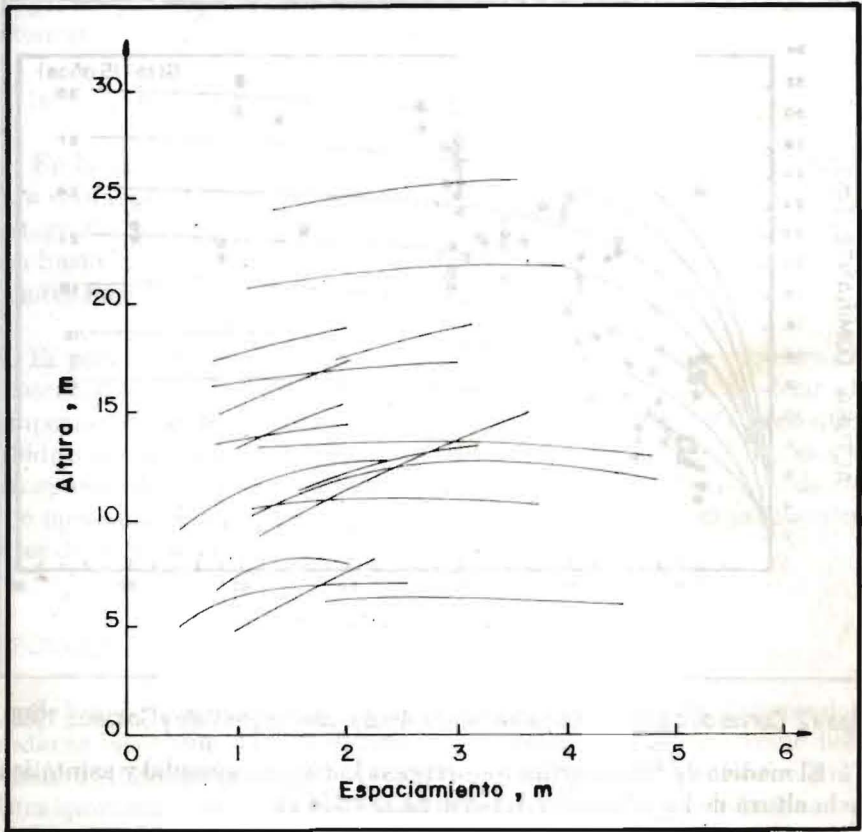


Figura 1. Altura media en función del espaciamiento en varios experimentos y con diversas especies (Sjolte-Jorgensen, 1967).

Así pues, se ha desarrollado toda una teoría del índice de sitio basada en la relación altura-edad. El índice de sitio en éste contexto se define como la altura promedio que alcanzan los árboles dominantes a una determinada edad, denominada edad indicadora (Husch, 1963; Alder, 1980). Varios autores desarrollan con detalle esta teoría; entre ellos Davis y Johnson (1987), Clutter *et al.* (1983) y Alder (1980) en relación con curvas de índices de sitio anamórficas y polimórficas. Las curvas de índice de sitio son representaciones idealizadas del crecimiento de la altura de los árboles dominantes de un rodal durante su vida (Tschinkel, 1972a).

Para los objetivos propuestos basta con explicar la base de esta teoría acudiendo al clásico modelo de crecimiento desarrollado por Schumacher en 1939 y que es la base de la mayoría de los modelos desarrollados en América.

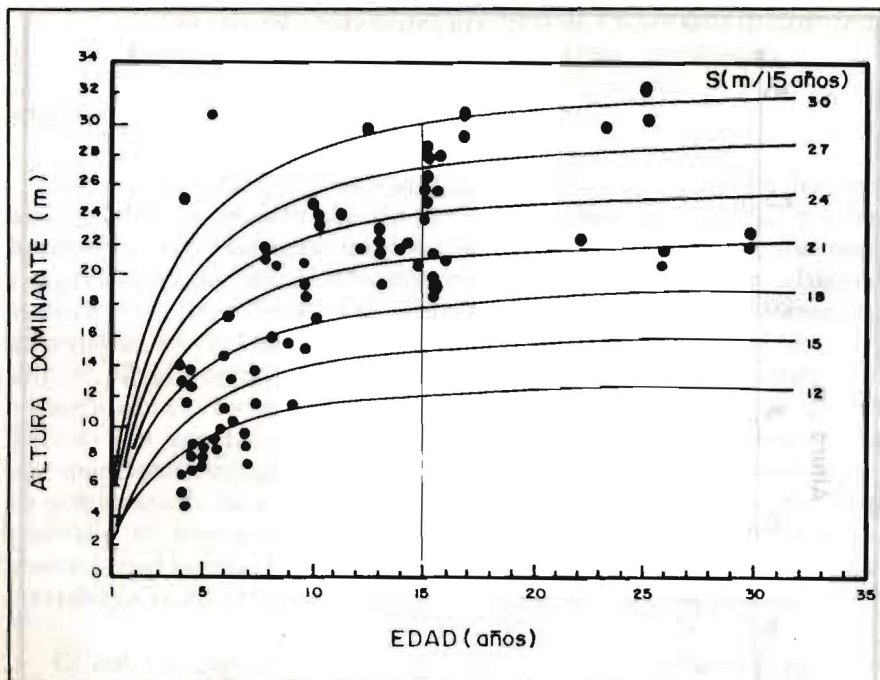


Figura 2. Curvas de índices de sitio para el cerezo, *Alnus jorullensis* (del Valle y González, 1988).

El modelo de Schumacher que expresa la curva sigmoideal y asintótica de la altura de los árboles en función de la edad es

$$\ln h_{\text{dom}} = a + b (1/t). \quad (1)$$

Si se define el índice de sitio (S) como la altura que alcanzan los árboles dominantes, en el momento en que la edad es igual a una edad indicadora (t_i); esto es: $S = h_{\text{dom}}$, cuando $t = t_i$, entonces se puede escribir

$$\ln S = a + b (1/t_i). \quad (2)$$

Resolviendo las ecuaciones (1) y (2) para $\ln S$ se llega a la expresión

$$\ln S = \ln h_{\text{dom}} - b (1/t - 1/t_i), \quad (3)$$

cuando se adopta el criterio de pendiente común (b).

A manera de ejemplo, la ecuación que expresa el crecimiento en altura de los árboles dominantes de *Alnus jorullensis* en la zona Central Andina de Colombia (del Valle y González, 1988) en función de la edad es

$$\ln h_{\text{dom}} = 3,32684 - 4,46305 (1/t),$$

y la ecuación del índice de sitio para una edad indicadora de 15 años sería entonces

$$\ln S = \ln h_{dom} - 4,46305 (1/15 - 1/t).$$

En la Figura 2 se representa la familia de curvas de índices de sitio para esta especie. Con frecuencia, para efectos prácticos y sobre todo en cartografía, se tiende a agrupar los índices de sitio en clases desde mínimo tres hasta seis ó más. Estas se denotan por números romanos desde las mejores hasta las peores clases así: I, II, III, IV,...

El problema con el índice de sitio así expresado es que requiere la existencia de plantaciones y, por lo tanto, poco sirve para predecir el comportamiento de una especie en un sitio donde ella no esté presente, debido a que no expresa la relación entre los factores medio ambientales y la respuesta de la especie. Tampoco permite mejorar la productividad de un sitio mediante la determinación de los factores que limitan su producción antes de la plantación o simultáneamente con ella.

PREDICCIÓN DEL SITIO

Se han propuesto cinco aproximaciones para relacionar los factores del medio ambiente con el índice de sitio o con la calidad del sitio que, como dice Schönau (1988), representa la capacidad productiva de un suelo forestal. Estas aproximaciones, las cuales a veces se tratan de manera interrelacionada, y que se les conoce como métodos indirectos para estimar la calidad del sitio, son: mediante factores climáticos, empleo de vegetación indicadora, correlación con factores fisiográficos, correlación con características edáficas y bioensayos.

Algunos autores hablan además de una aproximación ecológica que considera tanto factores bióticos como abióticos, haciendo énfasis en la dinámica del ecosistema. Una aproximación de tipo holístico tal como la sugieren Schönau (1987) y Grey (1980), parece que no se ha concretado aún en el trópico.

Factores climáticos

La correlación sitio-clima puede ser apropiada para aplicaciones a gran escala, en especial cuando son de tipo cualitativo. En estos casos, se emplean las homologías climáticas para tratar de predecir, en una primera aproximación, el comportamiento de una especie en un sitio donde se va a introducir, o donde ya se introdujo pero hay poca información sobre su crecimiento. Cuando se pueden establecer correlaciones cuantitativas con

las plantaciones, tienen una mayor utilidad para estudios, aún muy generales, sobre las posibilidades de las especies y para la planificación del uso de la tierra. Algunos de éstos métodos se han orientado hacia la predicción de la productividad primaria neta o el crecimiento leñoso de las comunidades naturales de grandes biomas del mundo.

Esta aproximación tiene un valor más bien indicativo, por cuanto dice poco de la productividad o capacidad de producir madera de los ecosistemas mediante plantaciones.

Weck, citado por Assman (1970), pronostica la productividad primaria neta (PPN) y su componente leñoso en los grandes biomas forestales del mundo, en función de variables climáticas tales como la precipitación total, la temperatura media de mayo hasta julio en el hemisferio norte y la longitud del período vegetativo, entre otras variables.

Lieth (1976) establece correlaciones entre la PPN, la temperatura y la humedad, y por medio de ordenadores dibuja la distribución global de la PPN.

Holdridge (1982) separa sus zonas de vida mediante límites de biotemperatura media anual, precipitación y evapotranspiración anual. Aunque ha sido muy empleado en América, el nivel de sus ecosistemas es muy general y sus asociaciones, que serían unidades de trabajo más razonables, no se han delimitado con la precisión necesaria para que sirvan como una herramienta suficientemente útil en la silvicultura.

Schmidt y Ferguson, citados por Whitmore (1975), determinan los meses secos y mojados para cada año según el criterio de Mohr, luego promedian los resultados y calculan el índice Q:

$$Q = (\text{meses secos/meses mojados}) \times 100.$$

De acuerdo con Mohr, en las zonas bajas tropicales, mes seco es aquel con menos de 60 mm; mes húmedo cuando la precipitación se encuentra entre 60 y 100 mm; mes mojado cuando llueve más de 100 mm. Luego, con base en el triángulo de la Figura 3, clasifican los climas desde A ($0 < Q < 14,3\%$) que son climas permanentemente húmedos hasta G ($Q > 300\%$), que son los climas permanentemente secos.

Este sistema se ha empleado con éxito en Indonesia para la planificación del uso de la tierra, y podría servir para insertarlo dentro del sistema de Holdridge con el fin de separar las zonas de vida en asociaciones, de acuerdo con la distribución de las lluvias. Si así fuese, se deberían reducir los criterios de mes mojado, húmedo y seco en función de la temperatura. Los meses

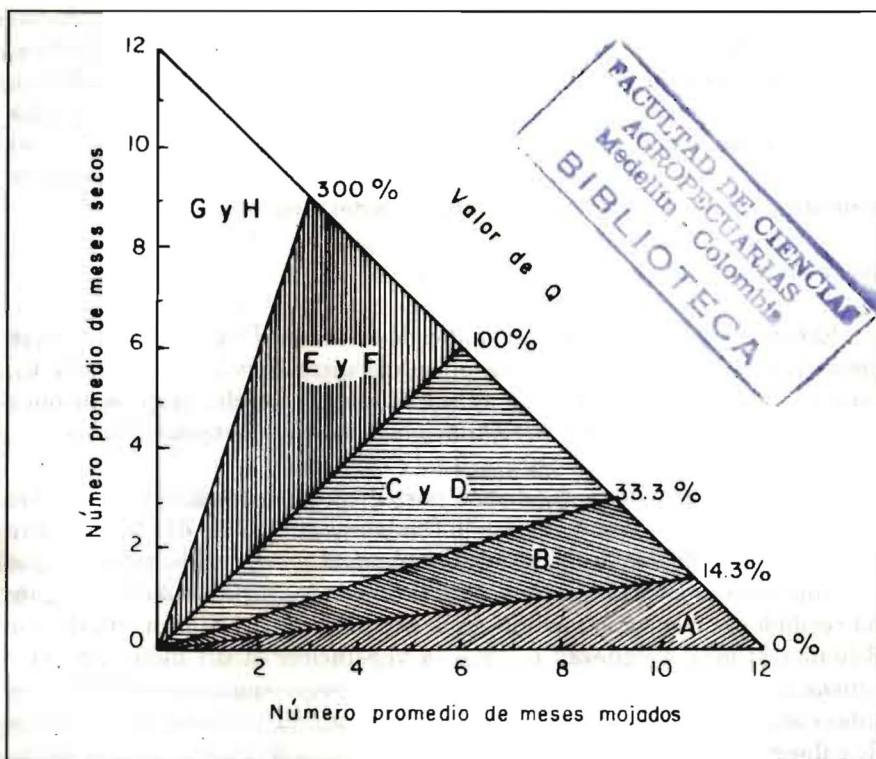


FIGURA 3. Clasificación de climas de acuerdo con la relación entre meses secos y mojados (Whitmore, 1975).

secos podrían ser para los pisos tropical, premontano más montano bajo, montano y subalpino: aquellos con menos de 60, 30, 15 y 7,5 mm respectivamente. De igual forma los meses mojados para estos mismos pisos serían 100, 50, 25 y 12,5 respectivamente. Es posible llegar a un refinamiento mayor para el premontano y el montano bajo.

El balance hídrico introducido por Thornwaite (1948) ha influido en numerosos sistemas ampliamente utilizados en América Latina. Golfari (1963, 1967) empleó la temperatura del mes más frío y del mes más cálido, la presencia de heladas y el déficit hídrico para seleccionar áreas aptas para coníferas en zonas tropicales y subtropicales. La aplicación de sus estudios fué muy exitosa en el estado de Sao Paulo, Brasil. Posteriormente, Victor *et al.* (1986) informan que al introducir variables adáficas y económicas y correlacionar esta información con los resultados de 600 parcelas permanentes, se han podido cartografiar las zonas más aptas para la reforestación con *Pinus* y *Eucalyptus* en el Estado.

Para fines forestales en Australia separan los *Eucalyptus* de acuerdo con la periodicidad de las lluvias en tres zonas: de precipitaciones uniformes, estivales e invernales (FAO, 1981). Para su mapa silvicultural de Sur Africa, Poynton (1979) emplea también esta misma idea, pero además incluye las regiones de humedad de Thornwaite (1948) con algunas modificaciones; en total cuatro. Además, dividió los climas en cinco regiones térmicas de acuerdo con la temperatura mínima media del mes más frío.

Vegetación indicadora

El fundamento de las plantas indicadoras, anota Pritchett (1979), es la presencia de especies con adaptaciones ecológicas muy limitadas; esto es, especies que sólo toleran una amplitud muy estrecha de condiciones ambientales. Estas son por lo regular plantas pequeñas y no árboles.

El tema del uso de la vegetación para evaluar la productividad de las tierras forestales, lo revisó en detalle Daubenmire (1976). El concluye que la vegetación refleja la suma de todos los elementos del medio ambiente que son importantes para las plantas, y subestima la mayoría de las críticas que ha recibido su uso como medida de la productividad. Killian, citado por Schönau (1988), concuerda en que la vegetación es un indicador muy sensible del sitio, pero también dice que los sistemas puramente florísticos tales como la vegetación de un sitio, las comunidades vegetales y los tipos de cubierta vegetal, dan resultados satisfactorios sólo en áreas poco alteradas. El uso de plantas, o de comunidades indicadoras, es de mayor utilidad en las regiones templadas y frías donde hay menos especies que en las regiones tropicales. Aún en regiones subtropicales, parece de poca utilidad de acuerdo con Schönau (1987). Este autor agrega que el método es difícil de aplicar en áreas donde la vegetación ha sido destruída o disturbada debido a las cortas o quemas reiteradas; así mismo, en áreas que se han usado para la agricultura o el pastoreo con cultivo intensivo y fertilización. Se presenta la misma limitación en las plantaciones de especies exóticas manejadas intensivamente, en las cuales la vegetación baja es totalmente sombreada desde los estadios iniciales. Parece entonces que, al menos en el trópico, el uso de la vegetación solamente no parece un método suficientemente confiable y, hasta ahora, no parece que se hayan realizado investigaciones exitosas al respecto.

A pesar de lo anterior, el autor considera que si se estudiase con más detalle la vegetación tropical y, en especial, las especies pioneras arbóreas y arbustivas así como las gramíneas y otras hierbas, posiblemente se encontrarían buenas plantas indicadoras. Se sabe, por ejemplo, que pioneras tales como *Ochroma lagopus* y *Trema micrantha* son especialmente abundantes en suelos relativamente fértiles, en relación con aquellos suelos en donde predominan *Vismia* spp. y varias *Melastomataceae*. En las

altas montañas del trópico se conocen varias especies de helechos, ericáceas, melastomataceae y gramíneas, que parecen asociarse con determinados niveles de fertilidad en los suelos.

Geomorfología

Como lo puntualiza Grey (1986) "un sistema racional para la subdivisión de la tierra es un prerrequisito para la planeación eficiente y el manejo de cualquier empresa forestal. La superficie terrestre refleja un balance entre los procesos pasados y las propiedades físicas, químicas e hidrológicas de los materiales subyacentes. La geometría de la superficie terrestre tiene una influencia considerable en los procesos que operan en la actualidad; por ejemplo, la pendiente es una propiedad importante, la cual determina la estabilidad del suelo y de la regolita, y la interacción entre la pendiente y su aspecto, explica una gran proporción de la radiación de onda corta que recibe cualquier lugar (es de menor influencia en el trópico). La configuración de la pendiente juega un papel dominante en el estado de la humedad y en el régimen de temperatura del solum"

Grey (1979a, 1980, 1986) ha empleado la aproximación geomorfológica del paisaje para predecir la calidad del sitio para el *Pinus patula* en Sur Africa. Este autor desarrolla su método basado en la descripción de seis unidades geomorfológicas (unidad 1 hasta unidad 6), con base en una serie de criterios entre los que se encuentran forma del perfil (cóncavo, convexo y recto), grado de convexidad, porcentaje de pendiente, presencia de agua y paisajes sobre depósitos aluviales o coluviales (Grey, 1986).

Entre los resultados más interesantes de Grey (1979a) se encuentra la predicción del sitio para el *Pinus patula* de acuerdo con tres diferentes clasificaciones, así:

$$S (\text{March}) = 29,51 - 0,00659X_3 + 0,7029X_6 - 0,388X_7, \\ R^2 = 0,479 \quad , \quad E.E.^2 = 1,91.$$

$$S (\text{Crowe}) = 30,53 - 0,0730X_3 + 0,299X_4 + 3,844X_{22}, \\ R^2 = 0,459 \quad , \quad E.E. = 2,32.$$

$$C.M.A. (\text{Wessel}) = 18,50 - 0,171X_7 + 1,285X_6 + 0,0424X_4, \\ R^2 = 0,422 \quad , \quad E.E. = 4,37,$$

donde:

- S = índice de sitio en metros a los 20 años,
 C.M.A. = crecimiento medio anual del volumen a los 20 años (m³/ha/año),
 X₃ = altitud sobre el mar (m),
 X₄ = % de distancia desde la cresta de la colina hasta el valle,
 X₆ = unidad de paisaje (codificada),
 X₇ = % de pendiente,
 X₂₂ = material de partida (codificado).

Una relación similar a la anterior la consiguió Evans (1984) para *Pinus patula* en Suazilandia, con base en sesenta y una parcelas. El análisis de regresión generó la siguiente regresión significativa

$$Y = -18,75 + 0,0544X_3 - 0,000022X_3^2 + 0,0185X_4 + 0,5346X_{11},$$

$$R^2 = 0,656,$$

donde:

- Y = altura de dominantes a los 12 años (m),
 X₃ = altitud sobre el mar (m),
 X₄ = % de distancia desde la cima hasta el valle,
 X₅ = % de pendiente,
 X₁₁ = código de fertilidad del suelo.

En Colombia, Tschinkel (1972a, 1972b) encontró que la combinación de variables que mejor explicaba el índice de sitio de *Cupressus lusitanica* en el oriente de Antioquia resultó ser

$$S = 9,28 + 0,133 C - 0,145 P,$$

$$R^2 = 0,72 \quad , \quad E.E. = 1,9 \text{ m},$$

donde:

- S = altura de los árboles dominantes a los 15 años (m),
 P = pendiente mínima en grados,
 C = código topográfico.

El código topográfico refleja una calificación ocular de la topografía, de acuerdo con su concavidad y convexidad (Figura 4). Tschinkel (1972a) no encontró ninguna variable edáfica física o química que correlacionara con el sitio.

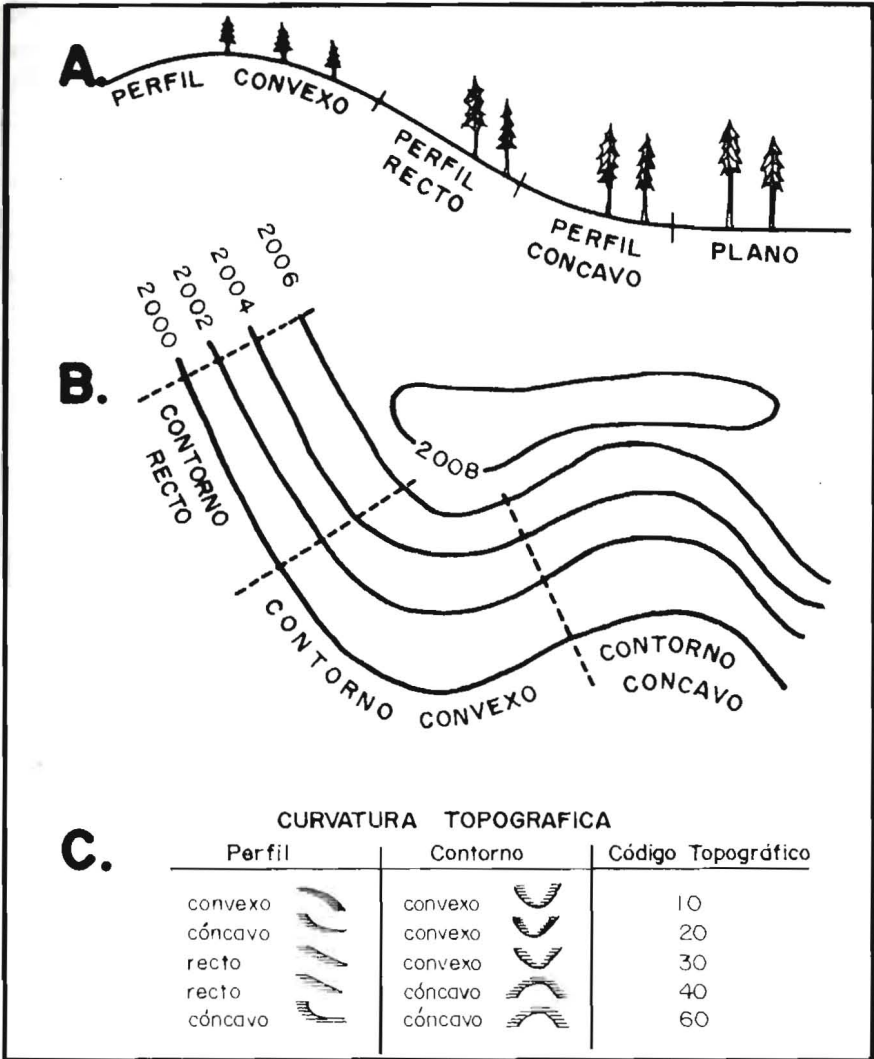


FIGURA 4. Descripción de un área en cuanto a su curvatura topográfica (Tschinkel, 1972a).

Suelos

Como ya se habrá notado, con frecuencia se emplean simultáneamente la fisiografía y los suelos. Sólo los análisis del suelo por lo regular no dan resultados satisfactorios tal como lo encontraron (Tschinkel 1972a, Grey 1979b y Evans 1984).

Schönau y Fitzpatrick (1981) han elaborado una clasificación de los suelos para *Acacia mearnsi*, *Eucalyptus grandis* y *Pinus patula*, entre otras

especies. El sistema que emplearon se basa en el régimen de humedad (5 categorías), grado de lavado (4 categorías que van desde los más eutróficos hasta los más distróficos), profundidad efectiva (4 categorías) y textura. La información requerida la toman de las series de suelos.

Años más tarde, Schönau (1987) parece menos entusiasta con el sistema edáfico, por cuanto afirma que muchos de los criterios de suelos que se encuentran en los estudios se han desarrollado para cultivos agrícolas. Al relacionar el índice de sitio con los tipos de suelo (Figura 5), se nota poca habilidad discriminante entre los suelos más desfavorables y más favorables en razón de la poca pendiente de la curva.

Grey (1979b), contrario a otros estudios, no halló ninguna relación entre el crecimiento del *Pinus patula* y los suelos expresados como presencia o ausencia del horizonte B, su color, estructura y textura.

Del Valle (1976) encontró una relación significativa entre el nitrógeno mineralizado durante seis semanas y el índice de sitio para *Cupressus lusitanica* en suelos volcánicos de Colombia, mediante una función gama, en especial cuando el suelo no se secó antes de la incubación sino que se conservó fresco (Figura 6).

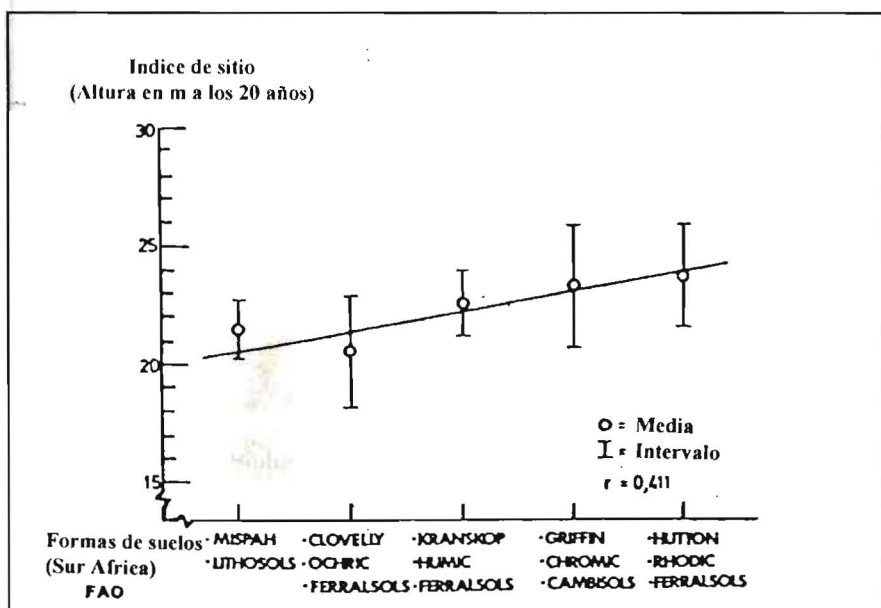


Figura 5. Relación entre el índice de sitio para *Pinus patula* y los tipos de suelo (Schönau, 1987).

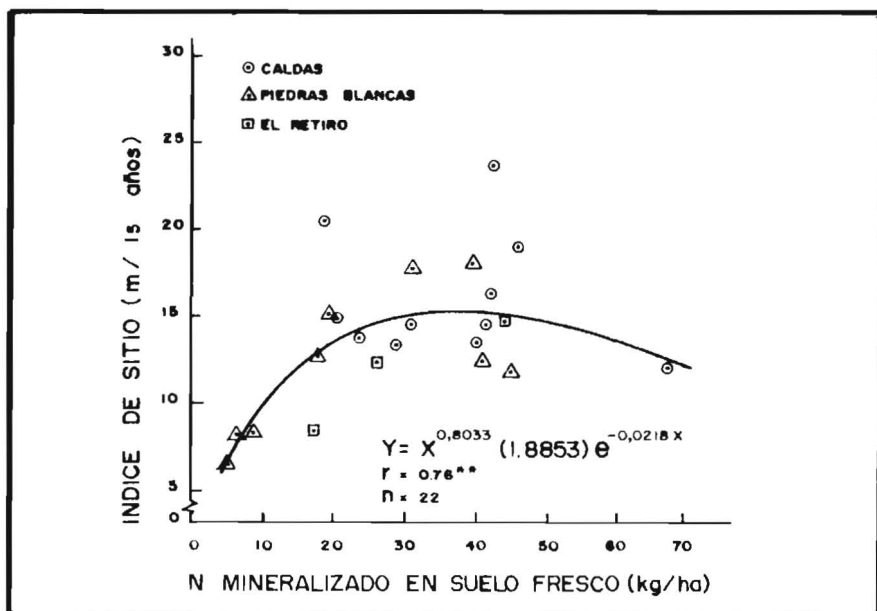


Figura 6. Índice de sitio para *Cupressus lusitanica* en función del N mineralizado durante 6 semanas (del Valle, 1976)

Esta relación se expresa así:

$$Y = X^{0.8033} (1.8853)e^{-0.0218X}$$

donde:

Y = índice de sitio para el ciprés (m/15 años),

X = Nitrógeno mineralizado en 15 días en suelo fresco (kg/ha).

Las características peculiares de éstos suelos y en particular el efecto del secado en la mineralización del nitrógeno y su efecto en el crecimiento vegetal se discuten en éste y en otro artículo del mismo autor (del Valle, 1976).

También para el ciprés Fassbender y Tschinkel (1974) encontraron correlaciones positivas y significativas entre el índice de sitio y los fosfatos de aluminio presentes en el suelo, lo cual se podría interpretar en el sentido de que esta especie puede acceder a estas formas del fósforo.

Giraldo, del Valle y Escobar (1980) lograron expresar el índice de sitio para *Cordia alliodora* en la zona cafetera de Antioquia como producto



multiplicativo de dos funciones gama, una para el pH y la otra para la Capacidad de Intercambio de Cationes (Figura 7). De acuerdo con estos autores el índice de sitio para esta especie se estima mediante factores edáficos con la ecuación

$$S = 4,69 \times 10^{-6} [(CIC)^{0,68921} e^{-0,01896(CIC)}] ((pH)^{19,9205} e^{-3,66074(pH)}],$$

$$R^2 = 0,750,$$

donde:

CIC = capacidad de intercambio de cationes (meq/100g suelo),

pH = pH en agua 1:1.

Vincent (1986) calculó sistemas de curvas de índices de sitio para el *Pinus caribaea* con base en el modelo de Schumacher para plantaciones establecidas en suelos arenosos de las sabanas del oriente de Venezuela donde la lluvia anual se encuentra entre 900 y 1000 mm. Luego determinó 39 variables físicas del suelo y combinaciones de ellas. También empleó características del perfil y de la pendiente y seis variables químicas. Todas estas variables las correlacionó con el índice de sitio en 97 parcelas.

El análisis se efectuó en tres etapas. En la primera etapa se analizaron 5 variables en múltiples combinaciones; en la segunda etapa 16 variables y

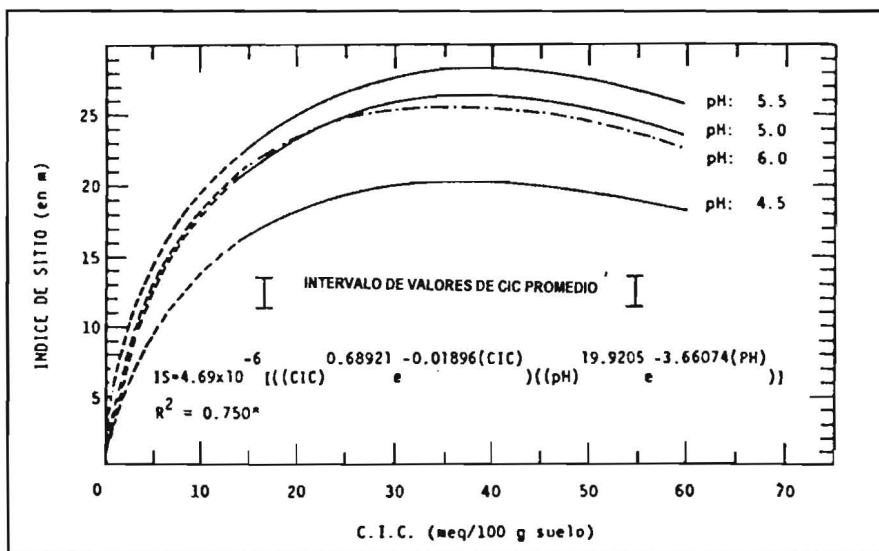


FIGURA 7. Índice de sitio para *Cordia alliodora* en el suroeste de Antioquia en función de la C.I.C. y del pH (Giraldo, del Valle y Escobar, 1980).

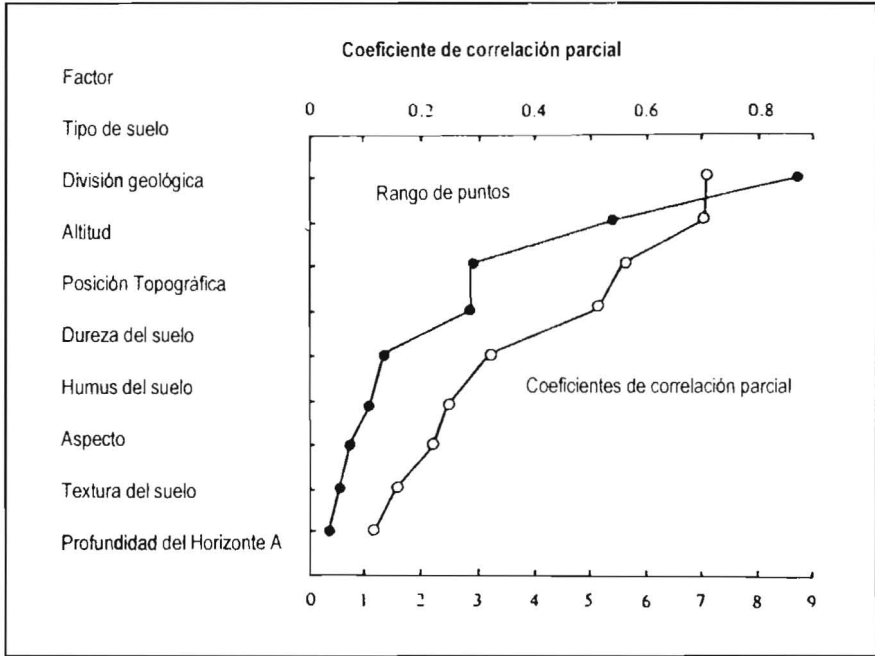


FIGURA 8. Coeficientes de correlación parcial entre los factores de índice de sitio para *Cryptomeria japonica* y el rango de puntos de cada factor (Mashimo, 1978).

combinaciones y en la tercera etapa 48 variables y combinaciones de ellas.

El análisis de regresión múltiple de la altura de los árboles dominantes en función de las variables del sitio arrojó un R^2 de 0,52 para 12 variables en la etapa 1; 0,60 para 10 variables en la etapa 2 y 0,68 para un modelo con 13 variables en la etapa 3. El mayor valor alcanzado fué de 0,87 para 44 variables en la etapa 3. Se demostró que las variables relacionadas con la capacidad de retención de agua fueron las más importantes para estimar la calidad del sitio.

En Malasia, Osumi (1979) ha establecido una asociación entre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis*), las araucarias (*Araucaria hunsteinii* y *A. cunninghamii*) entre otras varias especies nativas y exóticas, con los suelos, pero de una manera más bien cualitativa. Para teca encontró lo siguiente de acuerdo con la clasificación japonesa:

1. Sitios convenientes: suelos aluviales amarillos y suelos mojados,

2. Sitios adecuados: suelos gley y gleisados,
3. Sitios pobres: laterita o lateríticos.

Con respecto a la misma especie, Sarling (1963b, 1966) considera que una vez seleccionados los climas adecuados los cuales deben tener un período seco, el contenido de calcio en el suelo es determinante para su crecimiento. Sus estudios lo llevaron a proponer dos variables edáficas determinantes del sitio para teca en el Africa: profundidad del suelo utilizable por las raíces y la suma de bases. Sarling encontró que se puede predecir el crecimiento de la teca durante los primeros años, justo hasta antes de la primera entresaca, mediante la ecuación

$$R = 1/3 P.S.,$$

donde:

R = crecimiento medio anual ($m^3/ha/año$),

P = profundidad efectiva del suelo (decímetros),

S = suma de bases (Ca + Mg + K + Na) en P (meq/100 g de suelo).

Así, en un suelo con 70 cm de profundidad y 9,6 meq/100 g de suelo, $R = 22 m^3/ha/año$.

Los japoneses emplean una técnica que podría eventualmente tener interés en el trópico, la cual se encuentra descrita por (Mashimo 1974, 1978 y Mashimo y Arimitzu 1986).

En primer lugar evalúan nueve variables del suelo y del medio ambiente, $X_1 =$ geología, $X_2 =$ altitud, $X_3 =$ posición topográfica, $X_4 =$ orientación de la pendiente, $X_5 =$ tipo de suelo, $X_6 =$ profundidad del horizonte A, $X_7 =$ contenido de humus en el suelo, $X_8 =$ textura y pedregosidad, $X_9 =$ dureza del suelo.

Cada variable se divide en varias categorías. las categorías se correlacionan mediante una función lineal del tipo

$$Y = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_9.$$

Para Sugi (*Cryptomeria japonica*) se ha obtenido un $R = 0,963$. El factor que más aporta es el tipo de suelo, como se aprecia en la Figura 8.

Vélez (1982) trató de correlacionar el índice de sitio del *Eucalyptus saligna* en 65 parcelas de esta especie en Antioquia con 13 características químicas y físicas del horizonte A. De todas sólo el fósforo disponible resultó significativo para el índice de sitio aunque apenas explicó el 27% de la

varianza para la expresión

$$S = 21,3470 + 0,6665 P - 0,02532 P^2,$$
$$R^2 = 0,267^{**} \text{ (Signif. al 1\%)},$$

donde:

S = altura de los árboles dominantes a los 10 años (m),
P = Fósforo disponible por Bray II (ppm).



La Tabla 1, de De las Salas (1987), resume las variables edáficas que correlacionaron con el crecimiento de diferentes especies en estudios realizados en el trópico.

Bioensayos

Los bioensayos tienen una larga tradición en la agricultura. mediante ellos se puede evaluar un gran número de tratamientos de fertilización en un invernadero empleando una planta indicadora. Tschinkel (1972a) tuvo la idea de relacionar el índice de sitio para *Cupressus lusitanica* con el crecimiento de plántulas de esta misma especie en potes en condiciones de invernadero. bien

La Figura 9 muestra claramente que después de 10 meses las plántulas que crecieron en el horizonte A respondieron dramáticamente al sitio. No se observó igual respuesta en el horizonte B y C. Resulta significativo el hecho de que no fué posible determinar diferencias químicas mediante los análisis convencionales que se hacen a los suelos para ninguno de los tres horizontes, en ninguno de los sitios; con todo, el bioensayo resulta mucho más sensible que los análisis del suelo.

Cuando el bioensayo se combina con ensayos de fertilización, se pueden detectar los nutrientes limitantes. En el caso analizado se comprobó que el N y el P combinados eran los responsables del escaso crecimiento del ciprés en los sitios más pobres. ✓

Los bioensayos son una técnica virtualmente desconocida en la silvicultura, pero con un gran potencial.

TABLA 1. Propiedades edáficas frecuentemente asociadas con la productividad del sitio en plantaciones forestales del trópico*.

Autor	Especie	País y tipo de suelo	Característica edáfica
Ladrach, 1980	<i>C. lusitanica</i>	Colombia Andosoles	Micronutrientos (boro)
del Valle, 1976, 1979	<i>C. lusitanica</i>	Colombia Andosoles	N,P, Cap. retención agua, profundidad, N. mineralización
Tschinkel, 1972a	<i>C. lusitanica</i>	Colombia Andosoles	N,P, pendiente
Giraldo, del Valle 1980	<i>C. alliodora</i>	Colombia Andosoles	pH, Cap. de interc. catiónico
Von Christen	<i>P. caribaea</i>	Colombia Inceptisoles	Fertilidad, textura
Bongcam	<i>E. globulus</i>	Colombia Inceptisoles Alfisoles	Profundidad, duripan (BT), fertilidad
De las Salas 1981	<i>T. grandis</i>	Colombia Inceptisoles	Compactación, retención de humedad, erosión concreciones de CaCO ₃
De las Salas	<i>P. oocarpa</i>	Nicaragua Oxisoles	Fertilidad, erosión
Barros, N	<i>E. grandis</i>	Brasil Inceptisoles Ultisoles	Retención de humedad, fertilidad
Dyson, 1981	<i>P. caribaea</i>	Panamá Oxisoles	Fertilidad
Martínez, 1980	<i>Pinos varios</i>	Costa Rica Inceptisoles	Fósforo, textura, pendiente
Vincent, 1978	<i>P. caribaea</i>	Venezuela Inceptisoles	Retención de humedad
Siager y Schulz, 1969	<i>P. caribaea</i>	Surinam Spodosoles Oxisoles	Agua de fondo, retención de humedad, mat. org., bioporos
Von Christen	<i>E. saligna</i>	Suráfrica Ultisoles	Agua de fondo
Procter, 1967	<i>P. patula</i>	Tanzania Andosoles	Boro
FAO, 1974	<i>Eucalyptus</i>	Nigeria	Boro
Lamb, 1973	<i>P. caribaea</i>	Tanzania	Fósforo, nitrógeno, retención de humedad.

* Fuente: De las Salas, (1987)

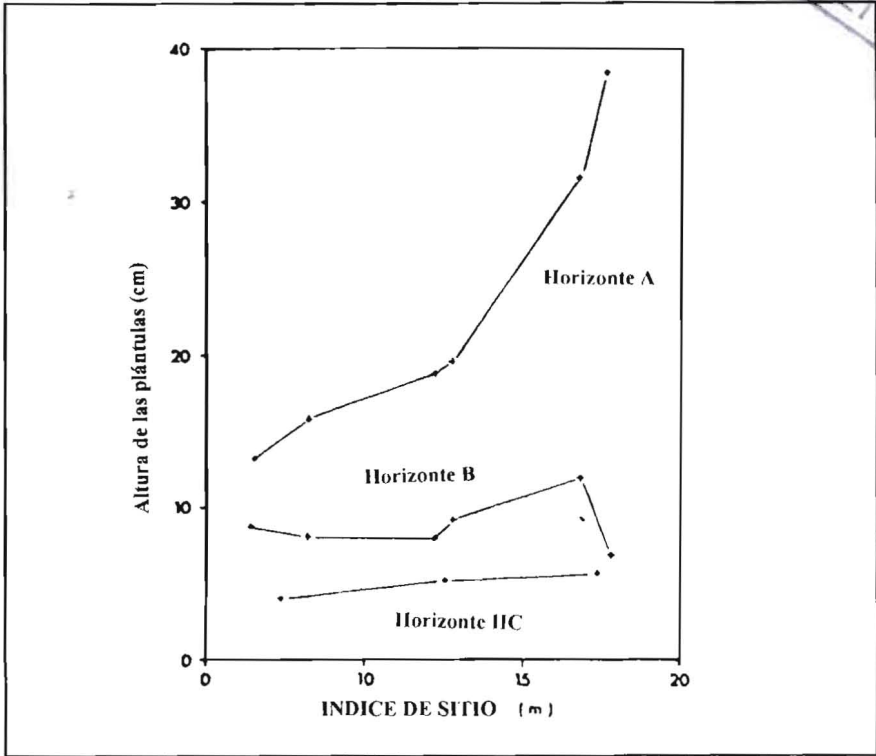


FIGURA 9. Crecimiento en altura de plántulas de *Cupressus lusitanica* no fertilizadas en vasijas con suelos de parcelas que tienen diferentes índices de sitio (Tschinkel, 1972a).

BIBLIOGRAFIA

- ALDER, D. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Roma: FAO, 1980. v.2, 113p.+ anexos.(Estudio FAO: Montes; No. 22/2).
- ASSMAN, E. The principles of forest yield study. Oxford: Pergamon, 1970. 506 p.
- BRUCE, D. y SCHUMACHER, F.X. Medición forestal. México: Herrero, 1965. 1474 p.
- CLUTTER, J.L. *et al.* Timber management; a quantitative approach. New York: John Wiley, 1983. 309 p.
- DAUBENMIRE, R. The use of vegetation in assessing the productivity of forest lands. *En: Botanical Review.* Vol. 42 (1976); p. 115-143.

- DAVIS, L.S. and JOHNSON, K.S. Forest management. 3ed. New York: McGraw Hill, 1987. 790 p.
- DE LAS SALAS, G. Suelos y ecosistemas forestales; con énfasis en América Tropical. San José, C.R.: IICA, 1987. 447 p.
- DEL VALLE, J.I. La mineralización del nitrógeno en suelos de cenizas volcánicas de Colombia y su relación con el crecimiento de *Cupressus lusitanica*. *En*: Turrialba. Vol. 26, No. 1 (1976); p. 18-23.
- _____. y GONZALEZ, H. Rendimiento y crecimiento del cerezo *Alnus jorullensis* en la región Central Andina, Colombia. *En*: Revista Facultad Nacional de Agronomía (Medellín). Vol. 41, No. 1 (1988); p. 61-91.
- EVANS, J. Plantation forestry in the tropics. Oxford: Clarendon, 1984. 472 p.
- FASSBENDER, H.W. y TSCHINKEL, H. Relación entre el crecimiento de plantaciones de *Cupressus lusitanica* y las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *En*: Turrialba. Vol. 24 (1974); p. 141-149.
- GIRALDO, L.G.; DEL VALLE, J.I. y ESCOBAR, M. El crecimiento del nogal *Cordia alliodora* en relación con algunos factores climáticos, edáficos y fisiográficos en el suroeste de Antioquia, Colombia. p. 32-44. *En*: SIMPOSIO IUFRO/MAB/SERVICIO FORESTAL: PRODUCCION DE MADERA EN LOS NEOTROPICOS POR MEDIO DE PLANTACIONES (1980: Rio Piedras). Actas del Simposio IUFRO/MAB/ Servicio Forestal: Producción de madera en los neotrópicos por medio de plantaciones. Puerto Rico: WHITMORE, J. 1980.
- GOLFARI, I. Climatic requeriments of tropical and subtropical conifers. *En*: Unasyva. Vol. 17 (1963); p. 32-42.
- _____. Coníferas aptas para repoblaciones forestales en el estado São Paulo. *En*: Silvicultura en São Paulo. Vol.6, No. único (1967); p. 7-62.
- GREY, D.C. On the concept of site in forestry. *En*: South African Forestry Journal. No. 113 (1980); p. 81-83.
- _____. Site quality prediction for *Pinus patula* in the Glengarry area Trankei. *En*: South African Forestry Journal. No. 111 (1979a); p. 44-48.

GREY, D.C. Soil classification and site index of *Pinus patula*. *En: South African Forestry Journal*. No. 111 (1979b); p. 64-65.

_____. The geomorphic approach to site delineation in intensively managed exotic conifers plantation. p. 9-16. *En: GESSEL, S.P. Forest site and productivity*. Dordrecht, Holand: Martinus Nijhoff, 1986.

KILLIAN, W. Site classification system used in forestry. *Proceedings, Workshop on Land Evaluation for Forestry*. The Netherlands: ILRI, 1984. v. 28, p. 134-151. Citado por SCHÖNAU A.P.G. Problems in using vegetation or soil classification determining forest site quality. p. 3-11. *En: COLE, D.W. and GESSEL, S.P. Forest site evaluation and long-term productivity*. Seattle, Wash.: The University of Washington, 1988.

HOLDRIDGE, L. Ecología basada en zonas de vida. San José, C.R.: IICA, 1982. 216 p.

HUSCH, B. Forest mensuration and statistics. New York: The Ronald, 1963. 474 p.

LIETH, H. Productividad biológica de las tierras tropicales. *En: Unasyvla*. Vol. 28, No. 114 (1976); p. 24-31.

MASHIMO, Y. Estimation of forest stand growth by quantification of soils conditions and environmental factors. *En: Transactions 10 Th. Int. Soil Science Congress*. Vol. 6, No. 1 (1974); p. 50-55.

_____. Evaluation of forest growth by quantification of environmental factors. *En: Tropical Agricultural Research Center*. No. 4 (1978); p. 232-237.

_____. and ARIMITSU, K. A site classification for forest land use in Japan. p. 29-42. *En: GESSEL, S.P. Forest site and productivity*. Dordrecht, Holand: Martinus Nijhoff, 1986.

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION. El eucalipto en la repoblación forestal. Roma: FAO, 1981. 723 P. (Colección FAO : Montes; No. 11).

OSUMI, Y. Site classification based on soil in northeast Malaysia. *En: Tropical Agricultural Research Center*. No. 12 (1979); p. 119-123.

POYNTON, R.J. Tree planting in southern Africa: the eucalypts. Republic of South Africa: Department of Forestry, 1979. v.2, 882 p.

- PRITCHETT, W. Properties and management of forest soils. New York: John Wiley, 1979. 500 p.
- SARLING, P. La pédologie forestière apliquee aux reboisements. *En: Bois et Forêts des Tropiques*. No. 90 (1963b); p. 17-31.
- _____. La pédologie forestière dans les pays tropicaux : la forêt et le sol. *En: Bois et Forêts des Tropiques*. No. 88 (1963a); p. 7-22.
- _____. La première éclaircie dans les plantations de teack. *En: Bois et Forêts des Tropiques*. No. 108 (1966); p. 7-22.
- SCHMIDT, F.H. and FERGUSON, J.H.A. Rainfall types based on wet and dry period ratios for Indonesia with Western New Guinea. Djakarta: Verh. Djawatan Met. dan Geofisik, 1951. 42 p. Citados por: WHITMORE, T.C. Tropical rain forest of the Far East. Oxford: Clarendon, 1975. 281 p.
- SHEPHERD, K.R. Plantation silviculture. Dordrecht, Holand: Martinus Nijhoff Publishers, 1986. 322 p.
- SCHÖNAU, A.P.G. Problems in using vegetation or soil classification determining forest site quality. p. 3-11. *En: COLE, D.W. and GESSEL, S.P. Forest site evaluation and long-term productivity*. Seattle, Wash.: The University of Washington, 1988.
- _____. Problems in using vegetation or soil classification in determining site quality. *En: South African Forestry Journal*. No. 141 (1987); p. 13-18.
- _____. and FITZPATRICK, D.C. A tentative evaluation of soil types for comercial afforestation in the Transvaal and Natal. *En: South African Forestry Journal*. No. 116 (1981); p. 28-39.
- SJOLTE-JORGENSEN, J. The influence of spacing on the growth and development of coniferous plantations. p. 43-94. *En: ROMBERGER, J.A. and MIKOLO, P. International Review of Forestry Research*. London: Academic Press, 1967. v.2.
- THORNWAITE, C.W. An approach to a rational classification of climate. *En: Geographycal Review*. No. 38 (1948); p. 55-94.
- TSCHINKEL, H. M. Growth, site factors and nutritional status of *Cupressus lusitanica* plantations in the highlands of Colombia. Hamburg, 1972a. 165 p. Dissertation (Doctor Degree). University of Hamburg.

- TSCHINKEL, H. M. La clasificación de sitios y el crecimiento de *Cupressus lusitanica* en Antioquia. *En: Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. Vol. 27, No. 1 (1972b); p. 3-30.
- VELEZ, J.C. Índice de sitio, su estimación edáfica y rendimiento de *Eucalyptus saligna* en Antioquia. Medellín, 1982. 142 p. Tesis (Ingeniero Forestal). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. 634.913 92 / 433
- VICTOR, M.A.M. *et al.* Land classification for industrial afforestation in the state of São Paulo, Brasil. p. 69-92. *En: GESSEL, S.P.* Forest site and productivity. Dordrecht, Holand: Martinus Nijhoff, 1986.
- VINCENT, I.W. Site classification and prediction in young caribbean pine plantations in grassland of Venezuela. p. 51-68. *En: GESSEL, S.P.* Forest site and productivity. Dordrecht, Holand: Martinus Nijhoff, 1986.
- WHITMORE, T.C. Tropical rain forest of the Far East. Oxford: Clarendon, 1975. 281 p.