

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES
PROGRAMA DE POSTGRADO

DETERMINACION DE LA PRODUCTIVIDAD DE DOS ESPECIES DE PINO CONSIDERANDO CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DEL SUELO, EN MICHOACAN

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL:
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

P R E S E N T A :
SALVADOR MADRIGAL HUENDO



CHAPINGO MEXICO.
DIRECCION ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESTUDIALES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

1995

Esta tesis fue realizada bajo la dirección del comité
indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como
requisito parcial para obtener el grado de:

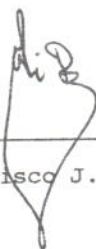
MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



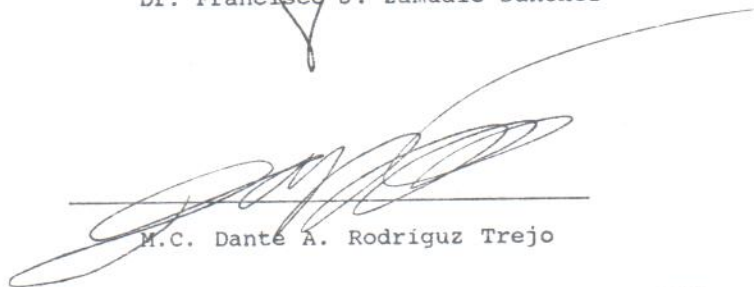
Dr. Hugo Ramírez Maldonado

ASESOR:



Dr. Francisco J. Zamudio Sánchez

ASESOR:



M.C. Dante A. Rodríguez Trejo

BIBLIOTECA DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

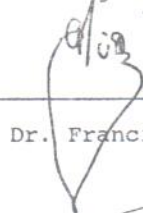
El jurado del Examen de Grado de Maestría en Ciencias Forestales, estuvo constituido por:

PRESIDENTE:



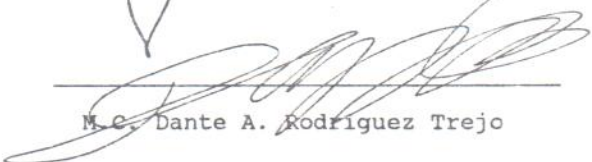
Dr. Hugo Ramírez Maldonado

ASESOR:



Dr. Francisco J. Zamudio Sánchez

ASESOR:



M.C. Dante A. Rodríguez Trejo

REPRESENTANTE DE LA
COORDINACION DE
ESTUDIOS DE
POSTGRADO DE
LA DiCiFo:



MC JAVIER SANTILLAN PEREZ

REPRESENTANTE DE LA
COORDINACION DE
ESTUDIOS DE
POSTGRADO DE
LA UACH:



M.C. Gabriel A. Rodríguez Yam

DEDICATORIA

A CATALINA

La compañera de mi vida, que en todo momento me ha brindado su amor, comprensión y estímulo, para la realización de las metas que me he trazado.

A MIS HIJOS:

ENA ANTOLINA
GERARDO

MONICA LETICIA
RAFAEL

Motivo de mi superación.

A MIS PADRES:

J. Jesús Madrigal Cano
Antolima Huendo de M.

Con profundo amor, cariño y respeto porque gracias a su apoyo, sacrificio y consejos, ha sido posible llegar a la culminación de esta meta.

A MIS HERMANOS:

Esperanza
Rosa María
Ma. Luisa
J. Jesús
Francisco
Lucas
Juanita
Ma. Esther
José Manuel

En agradecimiento a su apoyo y cariño fraternal que me han brindado.

A LAS FAMILIAS:

Barajas Hernández
Nava Hernández
Puente Madrigal
Roque Madrigal

Por sus consejos y apoyo desinteresado.

A todas las personas que de una u otra forma han apoyado u obstaculizado mis proyectos. A las primeras por alentar la esperanza y confianza suficiente para continuar y a las segundas por fomentar el coraje necesario para seguir, a pesar de ello, adelante.

A los compañeros forestales caídos, en su memoria

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por haber financiado mis estudios de maestría.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, por su apoyo económico durante el desarrollo de mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por permitirme una vez más el ingreso a sus aulas.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado, por sus consejos, apoyo y dirección del presente estudio.

A los CC, Dr. Francisco J. Zamudio Sánchez, M.C. Dante A. Rodríguez Trejo, M.C. Gabriel A. Rodríguez Yam y M.C. Javier Santillán Pérez, por su asesoría y participación en la revisión del trabajo y sugerencias al mismo.

Al M.C Alberto Gómez-Tagle Rojas, por haberme facilitado la información de los análisis físicos y químicos de los suelos.

Al M.C. José Alvarez Silva jefe del CEFAP-URUAPAN, por el apoyo que me brindo.

CONTENIDO

	PAGINA
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
CONTENIDO	vii
INDICE DE CUADROS	ix
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE CUADROS DEL ANEXO	xi
INDICE DE FIGURAS DEL ANEXO	xii
RESUMEN	xiii
SUMMARY	xiv
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	8
2.1. Sobre la clasificación de la calidad de sitio . .	10
2.2. Sobre los métodos para calificar la calidad de sitio	14
2.2.1. Métodos basados en las variables el sitio . . .	15
2.2.2. Métodos basados en las variables del rodal . .	20
2.2.2.1. Estimación de la calidad de sitio con base en registros de volúmenes de parcelas permanentes	21
2.2.2.2. Estimación de la calidad de sitio con base en relaciones altura-edad altura-diámetro . . .	22
2.2.2.2.1. Método de la curva guía	29
2.2.2.2.2. Método de la diferencia algebraica	32

2.2.2.2.3. Método de la predicción de parámetros	33
2.3. Sobre el área de estudio	37
3. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	41
3.1. Localización y superficie	41
3.2. Topografía y geomorfología	41
3.3. Geología	43
3.4. Suelo	44
3.5. Clima	44
3.6. Vegetación	45
3.7. Importancia de las especies en estuio	46
4. METODOS Y RESULTADOS	47
4.1. Métodos para el ajuste de modelos de Indice de Sitio	47
4.1.1. Curva guía	53
4.1.2. Diferencia algebraica	54
4.1.2.1. Curvas anamórficas	55
4.1.2.2. Curvas polimórficas	56
4.2. De las ecuaciones para el Indice de Sitio	58
4.4. Relaciones Indice de Sitio con las características edáficas	68
5. CONCLUSIONES	80
6. BIBLIOGRAFIA CITADA	82
7. ANEXO	91

INDICE DE CUADROS

CUADRO	PAGINA
1 Características de las geoformas y su composición geológica (Gómez-Tagle 1985)	43
2 Datos meteorológicos de Uruapan, Michoacán	46
3 Resumen de los análisis de regresión no lineal a datos de altura-edad de <i>Pinus douglasiana</i> (1) y <i>P. lawsonii</i> (2) para los modelos Schumacher, Chapman-Richards y Weibull	62
4 Variables edáficas medidas en el CEF "Barranca de Cupatitzio". Cada variable fue medida en el horizonte A el Horizonte AC, descritos por Gómez-Tagle (1985)	70

INDICE DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1	Mapa de tipos y fases de suelo y ubicación de perfiles de suelo	42
2	Diagrama de dispersión de datos altura dominante edad total para P. douglasiana	59
3	Diagrama de dispersión de datos altura dominante edad total para P. lawsonii	60

BIBLIOTECA DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

INDICE DE CUADROS DEL ANEXO

CUADRO	PAGINA
1	Indice de sitio para <i>P. douglasiana</i> mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico a una edad base de 50 años 92
2	Indice de sitio para <i>P. lawsonii</i> mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico a una edad base de 50 años 93
3	Valores del incremento corriente (m/año) para <i>P. dougalasiana</i> mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico 96
4	Valores del incremento corriente (m/año) para <i>P. lawsonii</i> mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico 97
5	Valores del incremento medio (m/año) para <i>P. douglasiana</i> mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico 100
6	Valores del incremento medio (m/año) para <i>P. lawsonii</i> mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico . . 101
7	Indice de sitio para <i>P. douglasiana</i> mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico a una edad base de 50 años 104
8	Indice de sitio para <i>P. lawsonii</i> mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico a una edad base de 50 años 105
9	Valores del incremento corriente (m/año) para <i>P. dougalasiana</i> mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico 108
10	Valores del incremento corriente (m/año) para <i>P. lawsonii</i> mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico 109
11	Valores del incremento medio (m/año) para <i>P. douglasiana</i> mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico 112

12	Valores del incremento medio (m/año) para <i>P.</i> <i>lawsonii</i> mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico	113
----	---	-----

INDICE DE FIGURAS DEL ANEXO

FIGURA	PAGINA
1	Indice de sitio para <i>P. douglasiana</i> modelo Schumacher, forma anamórfica 94
2	Indice de sitio para <i>P. lawsonii</i> modelo Schumacher, forma anamórfica 95
3	Incremento corriente (m/año) para <i>P. douglasiana</i> modelo Schumacher, forma anamórfica 98
4	Incremento corriente (m/año) para <i>P. lawsonii</i> modelo Schumacher, forma anamórfica 99
5	Incremento medio (m/año) para <i>P. douglasiana</i> modelo Schumacher, forma anamórfica 102
6	Incremento medio (m/año) para <i>P. lawsonii</i> modelo Schumacher, forma anamórfica 103
7	Indice de sitio para <i>P. douglasiana</i> modelo Schumacher, forma polimórfica 106
8	Indice de sitio para <i>P. lawsonii</i> modelo Schumacher, forma polimórfica 107
9	Incremento corriente (m/año) para <i>P. douglasiana</i> modelo Schumacher, forma polimórfica 110
10	Incremento corriente (m/año) para <i>P. lawsonii</i> modelo Schumacher, forma polimórfica 111
11	Incremento medio (m/año) para <i>P. douglasiana</i> modelo Schumacher, forma polimórfica 114
12	Incremento medio (m/año) para <i>P. lawsonii</i> modelo Schumacher, forma polimórfica 115

RESUMEN

Con la finalidad de relacionar variables edáficas con la productividad de *Pinus douglasiana* y *P. lawsonii* del Campo Experimental Forestal "Barranca de Cupatitzio"; se realizaron 20 análisis troncales por especie, distribuidos en cuatro tipos de suelos; que fueron identificados mediante el análisis físico y químico de 28 perfiles con dos horizontes A y AC, los que son muy variables en su espesor. En la determinación del Índice de sitio (IS) se probó la bondad de ajuste de los modelos Schumacher, Chapman-Richards y Weibull, por las metodologías "Curva guía" y "Diferencia algebraica", de la segunda, los tipos anamórficos y polimórficos; resultando ser el mejor el polimórfico de Schumacher para las dos especies. Se determinaron las siguientes características y propiedades del suelo: porcentaje de arena, arcilla y limo, densidad aparente (D.a.), humedad aprovechable (HA), lámina de agua aprovechable (Laa), espacio poroso (Ep), pH, fósforo, nitratos, entre otros; que fueron tomadas como variables independientes. La selección de las variables independientes, se hizo con base en la contribución para explicar la variabilidad del IS; esto es su aporte en R^2 , por el procedimiento STEPWISE de SAS. Encontrando que para *P. douglasiana* la variabilidad del IS es explicada principalmente por D.a. y Laa de cada horizonte y por la Laa y Ep cuando se obtienen valores promedio por perfil. En cambio, para *P. lawsonii* la variabilidad del IS es explicada únicamente por la D.a. del horizonte A.

SUMMARY

In order to relate edaphic and productivity variables for *Pinus douglasiana* and *P. lawsonii* in the Campo Experimental Forestal "Barranca del Cupatitzio", a data set from 20 stem analysis, which was divided in four soil types, was taken by specie. According to physical and chemical analysis from 28 soil profiles with very different thickness horizons A and AC, that soil types were identified. To determine the site index, the Schumacher, Chapman-Richards and Weibull models were fitted, by using the "Guide curve" and the "Algebraic difference" methodologies, the second one with anamorphic and polymorphic types. The results shown that the Schumacher polymorphic model was the best for both species. Soils characteristics and properties as sand, clay and silt percent, apparent density, available humidity, available water, porous space, pH, P, N, which were taken as independent variables, it was made with their contribution to explain the site index variability, by their contribution to R^2 the data analysis was made with the SAS stepwise procedure. The results shown that for *P. douglasiana* site index variability is mainly explainable by the apparent density and the available water, and by the available water and the porous space when it get average values by profile, whereas, for *P. lawsonii* the site index variability is only explained by apparent density within horizon A.

1. INTRODUCCION

La evolución de la sociedad hace cambiar constantemente la importancia que se da a cada producto o servicio que el hombre obtiene del bosque. En la actualidad ya no se busca obtener la máxima producción de madera, sino la mejor suma de todos los productos y servicios derivados del bosque y que además garantice la sostenibilidad del ecosistema. Sin embargo, aún dentro de este esquema, la producción de madera sigue siendo una actividad de relevancia social económicamente; más aún, el correcto desarrollo de esa actividad es un medio apropiado para satisfacer los intereses actuales de la sociedad sobre el bosque, logrando su conservación obteniendo beneficios de él.

Para cumplir con el manejo adecuado de los bosques, es necesario que el profesional forestal cuente con herramientas que le permitan tener un amplio conocimiento de las masas arboladas que integran este recurso natural. De esta manera, la administración forestal cumplirá más fácil y satisfactoriamente los objetivos del manejo preestablecido.

El conocimiento de las masas arboladas, permite al administrador forestal definir los niveles de producción que es

posible esperar del bosque y las actividades silvícolas que permitan mantener la estructura deseada de cada una de las masas. Del conocimiento del bosque destaca aquel que da idea sobre el grado y la forma de ocupación del espacio disponible para el crecimiento de los árboles (estructura y densidad), la capacidad productiva de los sitios (calidad de sitio), las capacidades productivas de las masas (rendimiento), y algunas otras que auxilien en la prescripción de tratamientos silviculturales en general (Rivero y Zepeda 1990).

Los modelos para estimar la capacidad productiva de los terrenos forestales, son algunas de la herramientas sobresalientes, ya que pueden ser utilizados en el diseño de regímenes silvícolas biológicamente posibles, así como predecir el incremento y rendimiento de árboles y masas forestales, predicciones necesarias para la instrumentación de los esquemas de regulación. En general, tales herramientas son ecuaciones, o sus representaciones gráficas, de las relaciones existentes entre variables dasométricas y variables del ambiente.

El crecimiento y rendimiento de un bosque puede ser modelado a tres niveles básicos: rodales, clases de tamaños de árboles y árboles individuales (Alder 1980, Zepeda 1990).

Estos mismos autores especifican que, la relativamente alta precisión que es posible con los modelos de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos en parte proviene de la precisión con la cual es posible clasificar o calificar la calidad de sitio en bosques uniformes.

Cuando se hace referencia a la calidad de sitio de un lugar, es común que se entiende todo lo relativo a la capacidad productiva de un área forestal, lo cual es cierto pero no da, del todo, una idea clara del significado real del término, máxime cuando se desconoce o no se comprende el significado preciso del término "capacidad productiva" o, más apropiadamente, productividad de sitio (Rivero y Zepeda 1990).

Evaluar la productividad de un sitio significa, generalmente, hacer mediciones de las características de éste y de las variables del rodal. Esta productividad se expresa comúnmente, en términos de las propiedades de cada rodal, tales como la altura a cierta edad, con las que se generan curvas de índice de sitio. Esas curvas son la base de un método sencillo y práctico; sin embargo se requiere la presencia de arbolado.

Uno de los factores más importantes que influyen en el crecimiento de las masas arboladas, es la calidad de estación, definida como la capacidad potencial de producción de madera de un sitio para una especie en particular o tipo de bosque. En sí es un índice relacionado a la máxima cantidad de volumen de madera que el suelo puede producir en cierto período (Clutter et al 1983; Davis y Johnson 1987).

La calidad de estación frecuentemente ha sido evaluada a través de procedimientos indirectos como es el Índice de Sitio (IS); este índice, era derivado en un inicio de la adaptación de datos edad-altura de curvas de crecimiento de una tabla de rendimiento normal. Desafortunadamente, es difícil encontrar rodales puros, coetáneos, con una densidad completa y de diferentes edades, por lo que en la actualidad la información se obtiene por medio de análisis troncales.

Un problema frecuente es el desconocimiento de los requerimientos fisiográficos, edáficos y climáticos de la mayoría de nuestras especies forestales que son de importancia en el momento de plantar en áreas carentes de bosque. En el país, el estado de Michoacán es uno de los más importantes en materia forestal, por lo que es preciso estudiar su bosque. Este estado tiene una superficie total de 5.99 millones de

hectáreas, de las cuales 4.39 se consideran de aptitud forestal. De esa superficie forestal, 1.14 millones de hectáreas son áreas perturbadas; 1.2 están cubiertas por vegetación arbustiva y matorrales y 2.05 millones de hectáreas están arboladas.

La superficie arbolada está repartida en bosque templado y frío con 1,733,200 ha, y 319,600 ha de selvas medianas; con existencias volumétricas de madera en rollo de 176,769,000 m³ para coníferas y latifoliadas y 15,980,000 m³ en selvas; con un incremento anual para coníferas de 4,013,222 m³ de madera en rollo (Carrillo 1992).

El bosque templado frío en Michoacán, está formado principalmente por *Pinus* spp y *Quercus* spp, que en su mayoría son especies intolerantes, con buen crecimiento y regeneración. En la región central del Estado, una parte importante de la población rural vive del bosque, ya sea obteniendo madera y resina o desmontando para cultivos agrícolas y frutales; el resultado en esa región ha sido una fuerte disminución del coeficiente forestal, ya que se estima en un 50 % la reducción de la superficie arbolada de la "Meseta Tarasca" en los últimos 30 años, por cambio de uso de suelo.

Además, se ha originado un empobrecimiento de la calidad del arbolado en los bosques remanentes y de los suelos forestales.

Las especies del género *Pinus* que destacan por su aprovechamiento maderero y resinero en el Estado, son *P. pseudostrobus*, *P. douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. montezumae*, *P. michoacana*, *P. leiophylla*, entre otras.

La variabilidad de las condiciones geológicas, topográficas y climáticas presentes en el Estado de Michoacán, han dado origen a diferentes ecotipos forestales; sin embargo, al trabajar en áreas con geología y clima semejantes, las características dasométricas pueden atribuirse a las variaciones topográficas y edáficas. De resultar cierto sería posible estimar estas características a partir de propiedades físicas y químicas del suelo y viceversa, siempre que la consistencia de las estimaciones evidenciara confiabilidad en las estimaciones.

Por los argumentos anteriores y sabiendo que un bosque está integrado por rodales de diferentes características dasométricas, que son un reflejo de las condiciones del lugar, se plantea estudiar las especies *P. douglasiana* Martínez y *P.*

lawsonii Roezl, que son las más importantes económicamente, con los siguientes objetivos.

- a).- Explicar el crecimiento en altura de árboles de las especies mencionadas, en función de las propiedades físicas y químicas del suelo.
- b).- Analizar el patrón de crecimiento en altura de esas especies en diferentes sitios, para identificar anamorfismo o polimorfismo en sus correspondientes curvas de índice de sitio.
- c).- Generar indicadores de calidad de sitio en base a propiedades físicas y químicas del suelo para ese lugar.

2. REVISION DE LITERATURA

En la actualidad, los modelos matemáticos son una de las herramientas analíticas más socorridas para la generación de conocimiento en el estudio del crecimiento y reproducción de masas forestales sujetas a un régimen de cultivo. La diversidad de modelos en cuanto a su estructura, componentes, construcción y propósitos de utilización, es debida a que el crecimiento y la reproducción son procesos complejos y por tanto han justificado gran número de proyectos de investigación (Mendoza 1983).

La cualidad de abarcar procesos dinámicos que implican un cambio continuo en el tiempo, ha sido uno de los puntos más relevantes para la adopción generalizada de los modelos matemáticos como herramienta de investigación biológica. Por lo que, Mendoza en 1976 especificó que para comprender mejor la forma en que los modelos abordan el carácter dinámico, es necesario abstraer del total de los elementos que conforman ese carácter, algunas cualidades que son comunes a casi todos los tipos de modelos (Mendoza 1983). Así por ejemplo, este autor menciona que el fenómeno del crecimiento de árboles es posible abstraerlo en dos variables básicas, el tamaño y la edad.

Tales abstracciones, tanto en la operación administrativa como en la investigación, son modelos del sistema bajo análisis. Para modelar el crecimiento de árboles y masas forestales necesariamente debe existir un motivante que en este caso es la administración para la producción maderable, y los medios para lograr su construcción (Ramírez 1994). Los medios para la construcción se configuran en base a los conceptos teóricos que sobre el crecimiento se tengan. Actualmente se discierne sobre dos corrientes principales: Los modelos empíricos y los modelos de procesos.

Los modelos de índice de sitio se clasifican dentro de los modelos empíricos, ya que en estos modelos, los procesos biológicos no son considerados directamente; en cambio el crecimiento se toma como la respuesta de un sistema complejo, sobre el que actúa un gran número de variables, pero pocas de ellas, frecuentemente solo una, la edad, se considera para el modelaje (Ramírez 1994). Estos modelos son producto de la experiencia, tanto del modelador como la derivada de la experimentación, y pueden ser para árboles y masas forestales, en los primeros los más relevantes son para crecimiento en altura.

2.1. Sobre la clasificación de la calidad de sitio.

El término calidad de sitio, se refiere a la capacidad que tiene un terreno forestal para favorecer el crecimiento de los árboles. Por lo tanto, la calidad del sitio estará determinada por la suma de los factores que afectan la productividad de un bosque, como son los climáticos, edáficos, topográficos y biológicos (Daniel et al 1986, Spurr y Barnes 1982, Musálem et al 1986, Pritchett 1986).

Es común que por calidad de sitio se entienda todo lo relativo a la capacidad productiva de un área forestal. Esta productividad se estima mediante la máxima cosecha de madera que el bosque produce en un tiempo determinado. Las palabras "bueno y pobre", son frecuentemente usadas para calificar la calidad de estación e implican una alta producción potencial como lo opuesto a un bajo potencial (Clutter et al 1983).

El término productividad, desde el punto de vista de la ecología cuantitativa, se define como la cantidad de materia orgánica seca formada en una superficie determinada por unidad de tiempo. Pero en las especies forestales maderables, la productividad se expresa como la cantidad de madera en m³/ha/año, formada en un bosque (Musálem et al 1986).

La Sociedad Americana de Forestales (SAF) definió sitio como "un área considerada en términos de su ambiente, particularmente determinado por el tipo y la calidad de la vegetación que el área soporta". Esta definición involucra la localización geográfica, así como la totalidad de las condiciones del ambiente (bióticas, edáficas y climáticas).

Por lo tanto, el sitio puede ser clasificado cualitativamente en tipos, a través de su clima, suelo y vegetación o cuantitativamente en clases, a través de su potencial para producir productos primarios como la madera (Avery y Burkhart 1983).

En el contexto del manejo forestal, la calidad de sitio puede definirse como la producción potencial de madera de un sitio para una especie en particular o tipo de bosque. En sí es un índice relacionado a la máxima cantidad de volumen que el suelo puede producir (Clutter et al 1983, Davis y Johnson 1987).

Para evaluar la productividad de un sitio, generalmente es necesario hacer mediciones de características de éste (fisiografía, clima, suelo vegetación, etc) y de las variables del rodal (edad, altura, otras), las cuales se usan

como términos en funciones matemáticas o puntos para generar gráficas que expresan la productividad de dicho sitio. Por lo tanto la productividad se puede estimar en función de las variables del rodal, de las variables del sitio o por la combinación de estas dos (Arteaga 1985). Esta productividad se expresa, comúnmente, en términos de las propiedades de cada rodal, tales como altura a cierta edad, o bien incremento medio anual en diámetro, en altura y en volumen.

Por consiguiente, el calificar un bosque en áreas de idéntica capacidad productiva permite establecer y organizar el plan de manejo de ese bosque en particular. Esta clasificación ha respondido a diferentes criterios para medir productividad, como es la evaluación de las características de los árboles o los factores del sitio mas sobresalientes.

Grey (1980) indica que la utilidad del concepto sitio depende del sistema de clasificación empleado, y agrega que sinónimos asociados con la producción de madera incluyen: índice de sitio, calidad de sitio, e incremento medio anual, ya sea a la edad de culminación o a una edad base determinada.

Para la evaluación de calidad de sitio (estación) Clutter et al (1983) clasifican a los métodos en directos e indirectos; en los primeros consideran la estimación en función de datos dasométricos. Mientras que en los segundos está la estimación a partir de la relación que hay entre especies, la estimación a partir de características de la vegetación, y la estimación a partir de factores topográficos, climáticos y edáficos.

Barnes et al (1982) presentan un método ecológico, de clasificación multifactorial, en el cual se establecen las interrelaciones entre fisiografía, suelo y vegetación, factores usados para distinguir y cartografiar diferentes unidades de ecosistemas como base para un manejo intensivo de uso múltiple. Por otra parte, señalan que los factores físicos del medio ambiente son relativamente estables y probablemente mejores predictores del sitio que la vegetación; además, la fisiografía puede ser usada para cartografiar grandes áreas, y el conocimiento de la fisiografía, suelo y drenaje es necesario en prácticas silvícolas, como preparación del sitio, cosecha, fertilización y cortas, entre otras.

Sin embargo, conforme a la definición de calidad de sitio, es posible afirmar que estrictamente solo existen métodos indicadores de la calidad de sitio y no métodos que permitan determinar exactamente la productividad de los sitios.

2.2.- Sobre los métodos para calificar la calidad de sitio.

En el apartado anterior se discutió sobre la clasificación de indicadores de la calidad de sitio, los cuales pueden ser estimados basándose en variables del sitio, en variables del rodal y de la combinación de variables del sitio y del rodal.

En dasonomía el término sitio se utiliza en dos sentidos, ya sea como una posición geográfica o como las condiciones del ambiente físico asociado a un lugar. En este último sentido, el sitio puede definirse como un área en donde se combinan características de suelo, topografía, clima y factores bióticos (Clutter et al 1983).

2.2.1.- Métodos basados en las variables del sitio.

En la evaluación de la productividad o calidad de los terrenos forestales (sitio) se utilizan las propiedades del mismo sitio como un indicador de la productividad (Arteaga 1985). Esto es a través de relaciones funcionales entre características dasométricas, principalmente incrementos, propiedades de los suelos y características topográficas de los terrenos (Loetsch et al 1973).

Aun cuando en ciertos casos, principalmente cuando la vegetación es inexistente, tales relaciones sólo se llevan a cabo entre propiedades de los suelos y características topográficas (índices edáficos). Este concepto fue introducido por Dokochaev y colaboradores a finales del siglo XIX cuando trabajaban en la clasificación de sitios forestales (Lundamark 1974 in Hägglund 1981).

Arteaga (1983) señala que el suelo y la topografía de un lugar están estrechamente relacionados, ya que las características topográficas de un sitio afectan el desarrollo de los perfiles edáficos, así como la textura y estructura de la superficie del suelo; de ahí su influencia en la productividad de los sitios (Spurr y Barnes 1982).

La productividad del suelo para el desarrollo de masas forestales está condicionada por la cantidad y calidad del espacio de crecimiento para la raíz del árbol. Los principales factores del suelo relacionados con la calidad del sitio son: profundidad del horizonte A, profundidad total, naturaleza del subsuelo, propiedades físicas y químicas del suelo. Otros factores como clima, longitud del día, exposición, pendiente y lámina de agua aprovechable, complementan esos factores edáficos (Coile 1952, Hägglund 1981, Daniel et al 1982, Spurr y Barnes 1982, Cox 1982, Clutter et al 1983, Hunter y Gibson 1984).

Frecuentemente se ha tomado de manera general un número considerable de variables del medio. Para discriminar esas variables a menudo se utiliza la metodología de análisis conocida como STEPWISE de SAS (Statistical Analysis System). Es decir una regresión paso a paso, originando una ecuación, que involucra las variables que mejor explican el fenómeno, sustentado por el coeficiente de determinación (R^2), asociado al menor valor de la suma de cuadrados del error (Arteaga 1985).

En estudios realizados sobre este tema, utilizando la técnica mencionada, en Venezuela, Panamá, Costa Rica, Puerto

Rico y en la parte Sur de México para la especie *P. caribaea* var *hondurensis*, se ha encontrado que la calidad de sitio (CS) aumenta con las características topográficas del terreno y las propiedades físicas del suelo como es el contenido de limo, asnm, profundidad efectiva y microrrelieve, en cambio, con las propiedades químicas del suelo regularmente la relación es inversa como el manganeso, sodio y potasio (Tobar 1976, Vásquez 1987, Ortega 1986, Hussain 1987, Fierros 1989).

Zamudio y Fierros (1992), con la información de las plantaciones de "La Sabana, Oaxaca", relacionaron variables edáficas con la calidad del sitio para *P. caribaea* var *hodurensis*. La variación de las variables edáficas de cuatro profundidades se trató de compactar en componentes principales, resultando que el primer componente explicó más del 75 % de la variabilidad de las características que finalmente resultaron relevantes en el modelo. Posteriormente realizaron una selección de componentes para explicar la variación del índice de sitio, quedando incluidas las componentes de las variables porcentaje de arena y de arcilla. En un análisis previo encontraron que había diferencias significativas de los valores del índice de sitio debidas a la exposición, por lo que efectuaron una prueba de comparación múltiple para saber que exposiciones son

diferentes en producción, y generaron modelos para cada grupo de exposición semejante.

Todos los sistemas de clasificación ideados para el propósito de evaluar el índice de sitio, de manera directa o indirecta, toman en cuenta el suelo. La mayor parte de los métodos indirectos de evaluación del índice de sitio se basan en los factores del suelo o localización que se reconocen fácilmente y se miden en el lugar. El más popular de estos últimos sistemas consiste en hacer uso de las ecuaciones suelo-índice de sitio. Este sistema es sobre todo útil para calcular el índice de sitio en las regiones forestales donde los árboles están ausentes (Pritchett 1986).

Tarrant (1949) menciona que mucho se ha escrito sobre el valor de los análisis químicos en la solución de problemas de crecimiento del árbol, sin embargo, no se conoce mucho acerca de la disponibilidad de nutrientes en sitios específicos, y muy poco se sabe de las relaciones entre niveles de fertilidad del suelo y calidad de sitio en suelos forestales. Dado lo anterior, ese autor hizo un estudio sobre la cantidad de nutrientes disponibles y su relación con la calidad de estación de *Pseudotsuga menziesii*. Sus resultados indican que la fertilidad del suelo no tuvo una relación estadísticamente

significativa con la calidad de sitio, señalando que no es un factor limitante en el crecimiento de esta especie.

En cambio Pawluk y Arneman (1961) indican que el crecimiento de *P. banksiana* Lamb, está estrechamente relacionado con aquellas características del suelo que influyen en la fertilidad y capacidad de retención de humedad. Así también Rodríguez (1982), Orantes y Musálem (1982), Gómez-Tagle (1985), Chávez y Gómez-Tagle (1985) afirman que existe una estrecha relación entre el incremento medio en altura y el contenido de materia orgánica del horizonte "A", entre el incremento periódico diamétrico con la capacidad de retención de humedad en el horizonte "B" y entre la altura dominante con la profundidad efectiva promedio del suelo.

Reafirmando lo antes mencionado, estudios y revisiones exhaustivas de trabajos, realizados por Coile (1952), Castaños (1962), Carmean (1975) y Geyer et al (1980), señalaron que el método más usado para estimar indirectamente la calidad de estación es la relación suelo-sitio. Concluyendo que la profundidad y el contenido de arcilla y limo en el horizonte "A", la profundidad total del suelo, la textura, distribución del espacio poroso, origen del suelo,

la capacidad de retención de humedad, la exposición y pendiente, son a menudo las variables más estrechamente relacionadas a la calidad de sitio.

Los mismos autores indican que la mayoría de estos estudios, son realizados por medio de regresión múltiple y que las variables mencionadas llegan a explicar 65-85 % de la variación en altura del árbol o índice de sitio.

2.2.2.- Métodos basados en las variables del rodal.

Ya que el conocimiento de las interacciones existentes entre las propiedades de los suelos y la capacidad de rendimiento de los terrenos forestales es todavía insuficiente para estimar la calidad de sitio, se han utilizado ciertas características del crecimiento de los árboles que reflejen la respuesta de las plantas al nivel de productividad del sitio en cuestión (Loetsch et al 1973). Tales características han sido, fundamentalmente, altura dominante y volúmenes totales por unidad de área.

Davis y Johnson (1987) mencionan que se ha desarrollado un conjunto de métodos indicadores para medir la productividad del sitio ya que ésta, raramente se mide

directamente a través del volumen del rodal, además de que dichos métodos procuran seleccionar medidas fáciles de las propiedades de la vegetación o del suelo, de esa forma, de todas las medidas que se han generado, la del crecimiento en altura es la más práctica, consistente y útil como indicador de la calidad de sitio. Se le ha utilizado también por considerar que es la variable dasométrica menos afectada por la densidad (Loetsch et al 1973).

2.2.2.1.- Estimación de la calidad de sitio con base en registros de volúmenes de parcelas permanentes.

La metodología más precisa para estimar la calidad de sitio consiste en crear un bosque de una especie determinada, en un sitio dado, durante un lapso en el que se realizan mediciones periódicas del volumen total que se produce. Sin embargo, debido a la longitud de los periodos de producción involucrados, se ha recurrido a procedimientos alternativos que posibiliten la obtención de tal tipo de información en periodos más cortos (Daniel et al 1982, Rivero y Zepeda 1990). Como son fundamentalmente a partir de:

- a) Registros de la remediación de parcelas permanentes ubicadas en rodales coetáneos, puros y de densidad plena. Sin embargo, el tiempo requerido para obtener la información también es substancial.
- b) Tablas de rendimiento normal construidas con base en datos provenientes de masas puras intracoetáneas e interdisetáneas, representativas de densidades normales.

Cuando se toma el volumen de los productos primarios deseados como una medida de la calidad de sitio, es necesario tener cuidado en su uso, ya que el volumen puede ser afectado por factores externos al sitio; como es la variación de la densidad por prácticas de cortas anteriores, composición específica de los rodales y presencia de disturbios como plagas y enfermedades, entre algunas (Avery 1975).

2.2.2.2.- Estimación de la calidad de sitio con base en relaciones altura-edad o altura-diámetro.

La productividad del sitio rara vez se mide directamente a través del volumen de madera del rodal ya que como se mencionó, se ve afectado por factores externos al

sitio. Pero la producción en volumen es una función de la altura y el diámetro de los árboles y el número de ellos. De esas dimensiones, la altura es menos influenciada por la densidad. Por tal situación a la altura se le ha considerado como un indicador de la calidad de sitio; conociéndosele como Índice de Sitio (IS), que es la altura de los árboles dominantes del rodal a una edad base (Roth 1916, citado por Borders et al 1984).

Para emplear el IS, se requiere que los árboles a medir estén sanos, libres de daños mecánicos y que por su crecimiento en altura siempre se hayan mantenido en los niveles superiores del bosque. Esta metodología, no puede aplicarse en terrenos desforestados o en aquellos que carezcan de los árboles adecuados (Pritchett 1986). Se eligió el parámetro altura por considerar que su medición es más precisa que la variable volumen, es de fácil determinación y además, el crecimiento en altura está menos influenciado por la densidad arbórea del lugar que otras variables del árbol (Carmean 1975, Clutter et al 1983).

El IS, por su relativa sencillez de estimación y la correlación positiva que presenta el crecimiento en altura con el potencial productivo en volumen de los terrenos

forestales (Jones 1969, Clutter et al 1983, Borders 1984), ha sido aceptado satisfactoriamente.

Entre las ventajas que tiene el índice de sitio se pueden mencionar las siguientes: es confiable por que se expresa mediante números, es fácilmente medible y está libre de la influencia de la densidad del rodal (Curtis 1964, Spurr y Barnes 1982, Hägglund 1981), Haciendo una aclaración al último punto, algunos autores dicen que los extremos en densidad sí afectan al índice de sitio (Borders et al 1984). El índice de sitio sirve también frecuentemente como un criterio básico en el desarrollo y prueba de métodos alternativos para evaluar la calidad (Jones 1969).

Así pues, la forma más comúnmente empleada para estimar productividad de bosques constituidos por rodales coetáneos, es a través del método de "Índice de Sitio", el cual consiste fundamentalmente en la construcción de un sistema de curvas de crecimiento en altura que representen el comportamiento de esta variable durante la vida de los rodales en localidades diferentes (Stage 1963), de tal forma que conociendo la altura dominante y la edad de una masa coetánea, puede asignársele un índice de sitio de acuerdo a

la altura que dicha masa alcance a una edad determinada (Alder 1980).

Las curvas de índice de sitio pueden derivarse de mediciones donde se toma la edad y la altura de los árboles elegidos en diferentes periodos de tiempo o de mediciones edad-altura en un tiempo y en un lugar, de un gran número de árboles de un rango de edades desde juveniles hasta maduros. La primera metodología utiliza análisis troncales o mediciones de árboles elegidos en sitios de muestreo permanentes y el segundo utiliza sitios temporales (Brickell 1968).

Dado que la altura es fácil de medir y que la densidad de los rodales ejerce poca influencia sobre ella (Assman 1970, Loetsch et al 1973), la altura dominante ha sido utilizada con regularidad para estimar la calidad de sitio de masas coetáneas constituidas por coníferas y hojosas de las que es posible conocer su edad. Se han ideado dos alternativas de estimación: el método del índice de sitio, basado en relaciones altura dominante edad y el nominado por Daniel et al (1982) "método del índice de terreno" basado en relaciones altura dominante diámetro normal.

Es lógico, que cualquier evento causal que se presente con cierta frecuencia en un determinado lugar, puede ser nominado como un indicador de la calidad de sitio, i.e, "Índice de Sitio", comúnmente este término ha sido asignado a la altura dominante de los árboles a una edad particular, debido a que esta variable dasométrica representa el máximo crecimiento alcanzable, en contraste con otras, ya que sólo representa el crecimiento promedio que se encuentra en un cierto periodo (Curtis, 1964; Daniel et al 1982); estas alturas serán distintas en localidades de calidad diferente; además, el índice puede ser determinado rápida y fácilmente en el terreno y es la base de aplicación de las relaciones altura dominante edad para estimar calidad de sitio.

Debido a que el crecimiento de los árboles también depende de las características genotípicas de los mismos, la determinación de índice de sitio debe realizarse a nivel de especie. Los datos resultantes de la estimación de estos índices no deben aplicarse a áreas muy extensas en las que no se hayan captado datos, ya que una misma especie presenta ecotipos diferentes, es decir, respuestas genotípicas diferentes a un hábitat particular, lo que resulta en patrones de crecimiento muy diversos aun para una misma especie (Basurco, 1973; Spurr y Barnes, 1982).

El índice de sitio es el proceso mediante el cual es posible estimar la calidad de sitio de masas coetáneas, preferentemente puras, con base en relaciones altura dominante edad. Así mismo, el índice de sitio es, en este caso, la altura dominante alcanzada por un rodal coetáneo, puro por lo general, a una edad determinada, a la que se le denomina edad base o índice (Zepeda y Rivero 1984).

Avery y Burkhart (1983), Clutter et al (1983), Rivero y Zepeda (1990) señalan que de acuerdo a las técnicas de construcción, las curvas de índice de sitio pueden ser anamórficas o polimórficas. Las últimas divididas en articuladas y desarticuladas (no cruzadas y cruzadas en el rango de edad de interés).

Las curvas anamórficas de índice de sitio, se caracterizan porque todas presentan la misma forma, ya que son proporcionales con pendiente constante entre ellas a una misma edad, pero con interceptadas al origen diferentes (Clutter et al 1983), lo cual provoca que el punto de inflexión de todas las curvas ocurra a una misma edad (Zepeda y Rivero 1984).

Lo antes mencionado también se puede expresar como: las curvas de índice de sitio son anamórficas si hay una tasa relativa de crecimiento constante para todos los índices de sitio a una edad específica, i. e. $[(\partial h / \partial t) + h] = k$; donde h = variable de crecimiento, ∂ = derivada parcial, t = tiempo y k = una constante. Lo que significa una constante para todos los sitios a cada edad diferente, si esta relación no se cumple, las curvas son polimórficas (Davis y Johnson 1987).

Las curvas polimórficas, por su parte, son familias de líneas con pendiente variable, que generalmente no guardan una relación de paralelismo entre sí o sea que no son proporcionales, no dependen unas de otras, por tal razón sus puntos de inflexión ocurren en edades diferentes. Observándose que el crecimiento en altura culmina más temprano en los sitios de mejor calidad (Assman 1970, Clutter et al 1983, Aguirre 1984, Arteaga 1985, Davis y Johnson 1987, Rivero y Zepeda 1990 y Acosta 1991).

La construcción de curvas de índice de sitio puede realizarse por métodos gráficos o analíticos; ambos procedimientos pueden emplearse tanto para curvas anamórficas como polimórficas (Curtis 1964, Alder 1980 y Arteaga 1985).

El índice de sitio es una representación gráfica que describe la relación entre la altura y la edad de un rodal o árbol individual, para modelar dicha relación se han utilizado diferentes modelos y técnicas para ajustarlos. La mayoría de estas técnicas, según Clutter et al (1983), se encuadran en: 1) método de la curva guía 2) método de la diferencia algebraica y 3) método de la predicción de parámetros. Las cuales, a su vez, pueden construirse con datos de altura-edad provenientes de :

- a) Parcelas temporales (método de la curva guía).
- b) Árboles muestra o parcelas permanentes.
- c) Análisis troncal.

1) Método de la curva guía.

Este método es empleado para generar curvas anamórficas; representa una tendencia promedio de las alturas dominantes a partir de la cual se trazan curvas proporcionales por arriba y por abajo de tal curva "guía". Es una cuantificación directa de los primeros métodos gráficos usados en la construcción de curvas de índice de sitio. Los datos de altura-edad son colectados a partir de una gran

variedad de rodales de diferentes calidades de estación y edades (Avery et al 1983, Clutter et al 1983).

Zepeda y Rivero (1984) abordan exhaustivamente este procedimiento concluyendo que existen dos alternativas para definir la tendencia de la curva guía: en forma gráfica o analítica. La primera de ellas ha sido ampliamente utilizada en nuestro país, según señalan Musálem (1977), Ramírez (1979) y Rosales et al (1982); en cambio, la segunda consiste en ajustar analíticamente un modelo matemático a los datos de edad-altura dominante, a fin de explicar funcionalmente la relación existente entre la altura dominante y la edad del arbolado, todo esto con el propósito de predecir la altura dominante en función de la edad.

El hecho de que el patrón de crecimiento en altura de los árboles pueda representarse mediante ecuaciones, es la base de la aplicación de métodos analíticos para la construcción de curvas de índice de sitio. La aplicación de estos métodos tiene las ventajas de eliminar cualquier sesgo personal en el trazo de las curvas y la posibilidad de probar la bondad de ajuste de diversos modelos matemáticos para un mismo grupo de datos (Meyer, 1940).

Para realizar esta actividad se ha utilizado un número abundante de modelos, pero sin duda uno de los más empleados ha sido el siguiente (Schumacher 1939):

$$\log(A) = \beta_0 + \beta_1 t^{-1}$$

donde:

A = altura dominante (m).

$t^{-1} = 1/t$ = recíproco de la edad en años.

log = logaritmos naturales o decimales.

β_0, β_1 = coeficientes de regresión muestral.

Para la determinación de la edad base, Mogren (1983) señala que existen dos puntos deseables sobre los cuales es posible fijarla cerca de la culminación del incremento medio anual en altura o cerca de la edad del turno fijado. No obstante, Clutter et al (1983) indican que tal edad se ubica comúnmente cerca de la edad del turno promedio elegido. Este procedimiento ha sido criticado por suponer que el crecimiento en altura dominante de los árboles que crecen en sitios de calidad distinta a la promedio, presentan un patrón semejante y proporcional al de aquél (Zepeda 1984).

2) Método de la diferencia algebraica.

Para el ajuste de curvas de índice de sitio por el método de la diferencia algebraica, se requieren datos de sitios permanentes o remediciones de árboles, o datos de análisis troncales y pueden ser aplicados a cualquier ecuación altura-edad para generar familias de curvas anamórficas o polimórficas (Acosta 1991). El paso inicial en la aplicación de este método es el desarrollo de una fórmula de diferencia algebraica de la ecuación altura-edad ya ajustada. Esta fórmula de diferencia expresa la altura remedida (H_2) como una función de la edad de remediación (E_2), edad inicial (E_1) y altura inicial (H_1) (Clutter et al 1983 y Ramírez et al 1988).

En general, una ecuación de diferencia algebraica tiene la forma :

$$Y_2 = f(Y_1, E_2, E_1, \beta)$$

Donde Y_2 es el valor de una variable continua definida sobre un árbol o un rodal en el período 2 de la medición, Y_1 es la misma variable medida en el período 1; E_2 y E_1 , son las

edades de los árboles o rodales en los periodos 2 y 1 respectivamente, β es el vector de parámetros (Borders et al 1988).

Ramírez et al (1988) probaron la consistencia en la construcción de la ecuación de diferencia algebraica y encontraron que los procedimientos utilizados ofrecen la posibilidad de estudiar las formas implícitas del crecimiento funcional para discutir algunas interpretaciones biológicas.

Como ventajas inobjetables de este enfoque de construcción con respecto a otros, estriban la invarianza de la edad base y la posibilidad de construir sistemas polimórficos a anamórficos, según se requieran a partir del modelo ensayado (Rivero y Zepeda 1984).

3) Método de la predicción de parámetros.

En el ajuste de curvas de índice de sitio por el método de predicción de parámetros, también se requieren datos de parcelas remedidas (Permanentes) o datos de análisis troncales, por lo que se deberán seguir los siguientes tres pasos (Clutter et al 1983).

- 1) Ajustar una función lineal o no lineal de altura-
edad por cada árbol o parcela.
- 2) Usando cada curva ajustada asignar el valor de
índice de sitio que le corresponde por árbol o
parcela.
- 3) Relacionar los parámetros de las curvas ajustadas
a los índices de sitio, a través de procedimientos
de regresión lineales o no lineales, con el
propósito de incluir al índice de sitio como
variable independiente en el modelo final
(Aguirre y Zepeda 1984).

Una vez que los parámetros del modelo que se esté
empleando se ajusten a los valores del índice de sitio de
cada rodal o parcela, el modelo se expresa de forma tal que
en lugar de cada parámetro debe ir la función que ajustó
mejor a dicho parámetro. De esta forma en lugar de tener $H = f(E, \beta)$ donde H es la altura, E es la edad y β vector de
parámetros; se tendría $H = f(E, f(IS))$, donde H y E como se
definieron antes y $f(IS)$ sería el vector de funciones, donde
 IS es el índice de sitio de cada árbol o parcela (Acosta
1991).

Las representaciones matemáticas de curvas de índice de sitio son un apoyo substancial en el uso de tales curvas (Ek 1971) de tal manera que para expresar el comportamiento de éstas, se han utilizado una gran variedad de modelos, los cuales se han ajustado por cualquiera de las tres metodologías citadas. Es probable que los modelos que más se hayan utilizado últimamente para la construcción de curvas de índice de sitio, sean los modelos de Schumacher (1939) y el modelo de Chapman-Richards, en sus formulaciones anamórficas y polimórficas.

Schumacher (1939), inicialmente desarrolló su modelo para relacionar volumen con edad, sin embargo, el principal supuesto en que se basó el modelo, es que el crecimiento porcentual varía inversamente con la edad, por lo que aplicado a la altura (H) es:

$$\frac{\delta H}{\delta A} = \left(\frac{\beta}{A^2} \right) H$$

La integral con respecto a la edad de esta ecuación de crecimiento produce la ecuación de rendimiento:

$$\ln H = \alpha - \frac{\beta}{A}$$

H = altura de los árboles dominantes codominantes.

A = edad.

α = parámetro del valor asintótico.

β = parámetro de la tasa de cambio.

Este modelo ha sido muy utilizado para generar curvas de índice de sitio anamórficas, por el método de la curva guía (Clutter et al 1983). En México lo han utilizado Orantes (1980), Aguirre (1984), Zepeda y Rivero (1984), Benavides (1987), Guerra (1990). También ha sido probado para generar curvas anamórficas y polimórficas por el método de la diferencia algebraica. Fierros (1989) y Bojorges (1990) lo probaron para ajustar curvas anamórficas y polimórficas con datos de análisis troncales de *Pinus caribaea* var *hondurensis* y *Abies religiosa* respectivamente.

Respecto al modelo de Chapman-Richards, Richards (1959) lo presentó como una forma generalizada de la función de crecimiento de Von Bertalanffy (1951) a datos de plantas, y Pienaar en 1965 llegó a la conclusión de que cada uno de los modelos de crecimiento más conocidos como el Monomolecular,

el Gompertz y el Logístico o de crecimiento autocatalítico, son justamente un caso especial del modelo generalizado de Chapman-Richards (Pienaar y Turnbull 1973, Acosta 1991).

2.3. Del área de estudio

En el medio forestal, el estudio de los suelos y su relación con la vegetación arbórea son escasos. Por ello, a finales de los años 70's e inicios de los 80's, en el Campo Experimental Forestal "Barranca de Cupatitzio", se empezó a trabajar en este rubro, con la finalidad de realizar investigación sobre medios ecológicos, buscar relaciones entre el suelo y la vegetación, así como evaluar los efectos de las prácticas silvícolas utilizadas en ese entonces.

Gómez-Tagle en 1985 realizó el estudio "Levantamiento de suelos y su relación con la vegetación de coníferas". En ese estudio evaluó de manera cualitativa y cuantitativa las relaciones que presentan las masas forestales con el suelo, topografía, geomorfología y geología superficial, utilizando la técnica de **Fisiogramas Controlados**, encontrando que esta técnica puede expresar numerosas características del terreno en forma globalizada (pendiente, exposición, relieve, geomorfología, distribución de los suelos, entre otras).

Para el caso de la vegetación de coníferas y utilizando las variables volumen, área basal, diámetro, incremento corriente anual diamétrico y altura total del arbolado, observó que los valores más altos de correlación entre las propiedades físicas y químicas de los suelos y las variables citadas, se presentó con las físicas, coincidiendo con lo reportado por Coile en 1952, Doolittle (1957), y Steinbrenner (1975). Reporta también que, el Taxón Tipo fue donde se obtuvieron los mejores valores dendro-epidométricos, sin embargo el trabajo se realizó a nivel de Fase; esto permitió ver la importancia que tiene la distribución horizontal y vertical de las partículas de suelo, así como su tamaño.

Respecto a la productividad o calificación de los terrenos forestales, se desarrolló el trabajo de crecimiento para las especies *P. douglasiana* y *P. lawsonii*, utilizando información de análisis troncales, la cual fue empleada usando el modelo linearizado de Schumacher propuesto por Alder en 1980 (Aguilar 1983).

$$\ln H_o = \ln H_{\max} + \frac{b}{A^k}$$

Donde:

$\ln H_0$ = Logaritmo natural de la altura dominante.

$\ln H_{\max}$ = Es el término a en la ecuación y

representa la máxima altura que puede alcanzar la especie y su valor está entre 2 y 7.

b = Representa el coeficiente de regresión, el cual siempre es negativo.

A = Edad de la altura dominante.

k = Parámetro a ser ajustado y cuyo valor varía de 0.2 a 2.0 .

Este mismo autor, para construir curvas anamórficas, por medio de la metodología de la *Curva guía*, ya que obtuvo valores promedio a los 5, 10, ..., n años para diferentes calidades de estación. Sus resultados presentan valores de parámetros y de coeficientes de regresión para cada calidad de estación. También elaboró tarifas de crecimiento por calidad de estación, obteniendo los siguientes valores medios a la edad base de 50 años *P. douglasiana* 33.46 m, 23.40 m y 15.35 m y para *P. lawsonii* 30.46 m, 23.61 m y 16.93 m de altura.

Madrigal (1986), en un estudio sobre la variabilidad de las dimensiones dendro-epidométricas que presentan las masas arboladas del citado campo experimental, asociada con las propiedades físicas y químicas de los suelos, que la composición, la densidad y estructura de las masas, es diferente entre las fases y entre los tipos de suelo.

Analizando esta misma información por la técnica de regresión múltiple, se observó que las propiedades químicas no son determinantes en la predicción de las características dasométricas. En cambio las propiedades físicas tuvieron mayor probabilidad de explicar parte de las respuestas dasométricas. Esto pudo ser debido a que al asociar valores promedio, tanto de las características de las masas como de las propiedades del suelo a través de la técnica citada, ésta no fue adecuada para predecir las características dasométricas de las masas, por lo que sugiere utilizar otro tipo de análisis, como las técnicas multivariadas.

3. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

3.1 Localización y superficie

El Campo Experimental Forestal (CEF) "Barranca de cupatitzio" está situado en la parte sur de la sierra Tarasca dentro del municipio de Uruapan, Mich. al noroeste de la ciudad del mismo nombre; sus coordenadas son: $102^{\circ} 05'$ longitud oeste, $19^{\circ} 17'$ latitud norte y su altitud va de 1690 a 2114 msnm; con una extensión de 417 ha.

3.2 Topografía y geomorfología

La configuración, composición y condiciones de sustrato forestal en la zona, tienen cierta complejidad debido al vulcanismo y la tectónica (De Ment et al. 1976), Gómez-Tagle (1985) con base en la simulación del relieve del área por medio de la metodología experimental denominada "Mapeo por fisiogramas controlados", que integra exposición, altitud, pendiente y zonas de suelo, encontró que existen cinco tipos de geoformas (Figura 1, Cuadro 1).

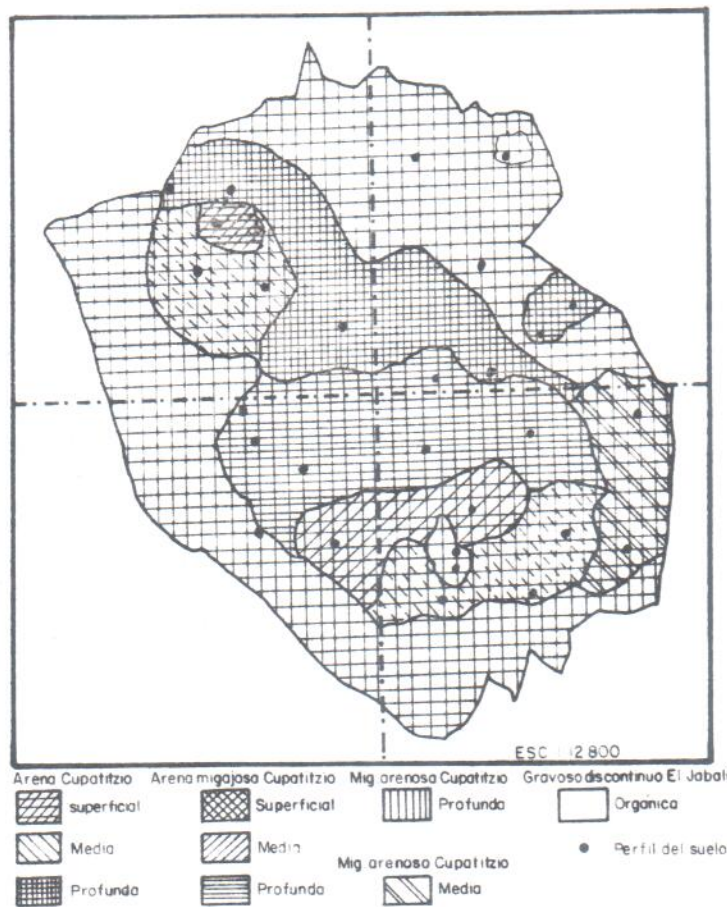


FIG. 1 MAPA DE TIPOS DE SUELOS CON SUS FASES Y UBICACION DE LOS PERFILES DE SUELOS.

Cuadro 1. Características de las geoformas y su composición geológica (Gómez-Tagle 1985).

GEOFORMA	SUPERFICIE (Ha)	MATERIAL GEOLOGICO	PENDIENTE %		
			RANGO	EJE	MAYOR
Derrama basáltico	139-75-00	Roca basáltica vesicular compacta y con arena en fracturas.	12-18		7.3
Domo volcánico	80-75-00	Arena y ceniza volcánica.	18-25		18
Cono cinerítico	56-80-00	Arena lapilli y conglomerado volcánico.	25-40		17
Planos	19-23-50	Ceniza y arena volcánica.	0-12		7
Talud y lechos de corrientes	7-32-00	Ceniza volcánica, limos y pequeñas cantidades de arcilla.	40-60		20

3.3 Geología

La formación geomorfológica del área corresponde al cenozoico superior, época cuando se originó el Eje Neovolcánico Transmexicano y está dominado por materiales extrusivos que provienen de la erupción de volcanes, encontrándose que los últimos aportes fueron proporcionados por el Parícutin de febrero de 1943 a 1952 (De Ment et al. 1976). En general los materiales identificados, como se puede apreciar en el Cuadro 1.

3.4 Suelo

La clasificación de los suelos se basó en los criterios FAO DETENAL, ubicando para ello 28 perfiles de suelo en el terreno, dados por un muestreo, en el cual se tomó como factor de variación el porcentaje de arena en el horizonte A. Estos fueron descritos morfológicamente y analizados física y químicamente, considerando al horizonte A con sus subhorizontes como capa uno y al horizonte C como capa dos.

Con lo anterior, para el área se determinaron las unidades Andosol y Litosol con sus subunidades vítrico y districo respectivamente, el primero representando la serie "Cupatitzio", con los tipos arena, arena migajosa y migajón arenoso con las fases superficial, media y profunda; para el Litosol districo la serie representativa es "El Jabalí" con el tipo gravoso discontinuo sin fases.

3.5 Clima

La zona está ubicada en la parte sur de la Sierra Tarasca, por lo que su clima está influenciado notablemente por su posición topográfica. En base a 36 de observaciones,

la clasificación climática de Köppen modificada por García (1973) es:

Temperatura media anual 18° a 22° C

Precipitación media anual mayor de 1,500 mm

Tipo de clima (A)C(w₂)(w)

Por tanto el clima es semicálido subhúmedo, siendo el más lluvioso de éstos; se presenta el fenómeno conocido como "canícula" en el mes de agosto; el régimen de lluvias es de verano iniciándose aproximadamente en junio y terminándose en octubre; la probabilidad de recibir la precipitación anual es de un 47.7 % ; la oscilación térmica es baja y sus valores van de 5° a 7° C. En forma resumida se tienen los siguientes datos (Cuadro 2).

3.6 Vegetación.

La vegetación arbórea está formada por bosque de pino y pino-encino, aunque también se presenta el bosque mesófilo mezclado con *Agave sp.* En el sotobosque se pueden encontrar los siguientes géneros en diferentes grados de frecuencia: *Baccharis sp.*, *Salvia sp.*, *Lupinus sp.*, *Ageratum sp.*, *Stevia sp.*,

Cirsium sp, Verbesina sp, Eryngium sp, Lubelia sp, Lupesia sp, Pteridium sp, Muhlenbergia sp y Eragrostis sp.

Cuadro 2. Datos meteorológicos de Uruapan, Michoacán (Gómez-Tagle 1985).

	TEMPERATURA	° C	PRECIPITACION	mm	EVAPORACION	mm
Media anual	19.0		1,630.0		1,197.0	
Media de mes más alto	21.4 (mayo)		374.0 (septiembre)		136.0 (febrero)	
Media del mes más bajo	16.2 (enero)		4.8 (enero)		69.6 (noviembre)	
Oscilación térmica	5 a 6 (poca)		359.2		66.4	
Probabilidad de la precipitación			47.7	%		
Tipo de clima	(A)C(w) ₂ (w)b(i')		g			

2.7 Importancia de las especies en estudio.

Las especies *P. douglasiana* y *P. lawsonii* se encuentran ampliamente distribuidos en zonas de transición de los climas cálido y templado en la región de Uruapan, Mich., que presentan diferentes grados de asociación. La madera de la primera especie, por ser de buena calidad, llega a compararse en sus propiedades físicas y mecánicas con la madera de "abeto rojo americano" (*Pseudotsuga menziessi*) (Mas, 1978). Ambas especies son las de mayor importancia económica en la región.

4. METODOS Y RESULTADOS

4.1. Métodos para el ajuste de modelos de Índice de Sitio.

Como se ha expuesto, el crecimiento en altura de los árboles dominantes y codominantes es considerado como indicador de la calidad de sitio; este indicador se deriva de la relación altura-edad, que puede ser obtenida de parcelas permanentes, parcelas temporales o de análisis troncales. Para el presente estudio se optó por la última técnica, seleccionando 20 árboles por cada especie en estudio, *Pinus douglasiana* y *P. lawsonii*, distribuidos en 4 tipos de suelos. Los árboles seleccionados fueron derribados y seccionados para la obtención de rodajas según la metodología propuesta por Mas en 1970.

Para determinar la edad total de cada árbol, se utilizó el número de anillos de crecimiento en la rodaja obtenida a los 0.3 m de altura mas tres años, considerando que estas especies crecen aproximadamente 30 cm en los primeros 3 años de su vida. Estimada la edad del árbol, en cada rodaja se contaron los anillos de la periferia al centro, dejando a partir de la corteza un número de anillos igual al exceso de un múltiplo de cinco, para identificar los anillos correspondientes a 5, 10, 15, años de edad.

En los análisis troncales se conoce la altura actual del árbol, las alturas donde fueron obtenidas las rodajas, pero se desconocen las alturas del árbol en edades anteriores. Esas alturas se obtuvieron tomando la altura de la última rodaja en que parece esa edad más la longitud de la punta. La longitud de la punta se puede estimar por varias metodologías: gráficamente por proyecciones, geométricamente por las relaciones de las dimensiones de cuerpos dendrométricos y analíticamente por regresión; en este trabajo, se obtuvo geométricamente por medio de las relaciones que guardan el área de dos secciones transversales del paraboloides con la altura de la sección menor y la altura total (Romahn et al 1987).

La teoría empírica del crecimiento y rendimiento fue desarrollada para los recursos naturales renovables, como los árboles y otros vegetales, los peces y las aves. Inicialmente, partió de las relaciones alométricas, dando origen los modelos **Monomoleculares, Autocatalíticos y el Gompertz** (Roberson 1923, Schumacher 1939, Madawar 1940, Von Bertalanffy 1942, 1957, Amer y Williams 1957; citados por Richard 1951, Pienaar y Turnbull 1973).

Partiendo de la hipótesis de Von Bertalanffy (1951) se tiene que el valor anabólico es proporcional al área superficial del organismo, mientras el valor catabólico es proporcional al volumen de la biomasa; esto en árboles es dado por las relaciones que existen entre las dimensiones del árbol (volumen, altura, diámetro) y el área fotosintética o el área del cambium en el tronco, que es representado por la ecuación:

$$P=cQ^4$$

Donde:

P = Tamaño

Q = Área fotosintética o área del cambium

4 = Constante alométrica

c = Es el valor dependiente de si se considera únicamente la parte interna o la parte externa o ambas.

Se supone que en individuos normales el valor específico del crecimiento de P sostiene una relación proporcional y constante a la velocidad de crecimiento específico de Q que es:

$$\frac{\frac{\partial P}{\partial t}}{P} = a \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{P}$$

En esta ecuación a es la constante alométrica que caracteriza al organismo y su medio ambiente, t es el tiempo y $\frac{\partial}{\partial t}$ es el operador derivada parcial.

La representación matemática de las funciones de crecimiento, comúnmente son fórmulas en términos de tasas de crecimiento, i. e. alguna consideración del comportamiento de la tasa de crecimiento en el tiempo. Alternativamente, esto también a menudo se formula en términos de tasa de crecimiento relativo, i. e. una consideración de la relación entre la tasa de crecimiento, el tamaño como Schumacher presento su modelo para *Pinus taeda* en 1939.

La forma generalizada del modelo de Chapman-Richards también fue derivada del modelo de Von Bertalanffy, en el cual se consideran las causas esenciales del fenómeno de crecimiento, con la finalidad de que los parámetros del modelo tengan al menos una burda interpretación fisiológica o biológica. Es un modelo determinístico ya que presume que su respuesta está dada por la causa formulada; es un modelo

realista, por integrar los supuestos biológicos en función del tiempo.

La función de distribución de probabilidad Weibull ha sido recientemente investigada para modelar el crecimiento en altura (Yang et al 1978, Bailey 1980). Esta función fue desarrollada originalmente por Weibull en 1951 para un estudio de probabilidad de material desapropiado; desde entonces se le han encontrado aplicabilidad en diseño de crecimiento y rendimiento.

La función de distribución acumulada se define por:

$$F=1-e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^{\lambda}}$$

Donde:

λ = parámetro de forma

σ = parámetro de escala

Esta distribución de probabilidad, puede ser fácilmente modificada para formular una función de crecimiento, que genere una amplia variedad de curvas de crecimiento sigmoidales. La analogía óptima entre el valor de una curva

de crecimiento y una curva de densidad de probabilidad, fue reconocida por Prodan en 1968, concluyendo que es posible adaptar una función de probabilidad a estudios de rendimiento y crecimiento.

Una función de distribución probabilística tiene valores entre cero y uno. Por ello, para que esta función pueda describir los procesos del crecimiento biológico verdadero de un organismo, es necesario multiplicarla por un factor, que comúnmente es el valor máximo asintótico, determinado por la naturaleza genética y los factores ambientales impuestos sobre dicho organismo.

Para estudios de crecimiento y rendimiento se toma a la variable aleatoria X como tiempo (edad) y F como variable dependiente (altura, volumen, área basal) del organismo, que aumenta con el aumento de X , por ello, el valor de F se incrementa entre 0 y 1, valor que multiplicado por la asíntota, origina la ecuación modificada:

$$F=A\left[1-e^{-\left(\frac{X}{\sigma}\right)^{\lambda}}\right]$$

Donde:

A = asíntota

X = edad

F = altura

λ = parámetro de forma

σ = parámetro de escala

Analizando las tres ecuaciones en estudio, Schumacher, Chapman-Richards y FPA-Weibull se observa que son análogas, ya que son ecuaciones diferenciales de la misma forma. Por eso pueden ser empleadas para representar apropiadamente el crecimiento de árboles y masas forestales.

Con base en lo citado, en el presente estudio se probó la bondad de ajuste de los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y el de Weibull, estos desarrollados por los métodos de la Curva guía de la Diferencia algebraica, para obtener curvas de índice de sitio anamórficas y polimórficas.

4.1.1. Curva guía

Modelo Schumacher

$$H = \beta_1 e^{-\beta_2 E^{-1}} \quad (1)$$

Modelo Chapman-Richards

$$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}}] \quad (2)$$

Modelo Weibull

$$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}}] \quad (3)$$

Donde:

H = Altura dominante (m)

E = Edad (años)

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Parámetros.

4.1.2. Diferencia algebraica

Este método utiliza pares de observaciones consecutivas de la variable a predecir; así que la altura de la segunda medición (H_2) es predicha en función de la medición inicial (H_1), la edad inicial (E_1) y la edad de la segunda medición (E_2). Este método reconoce la asociación entre dos mediciones del mismo individuo a diferentes edades (Borders et al 1984, Ramirez et al 1987).

Una ventaja muy importante que posee este método, es que genera curvas que pasan por el punto en que la altura es igual al índice de sitio a la edad base seleccionada (Clutter et al 1983).

Como se sabe, los parámetros de los modelos son los que determinan el tipo de familias de curvas, anamórficas o polimórficas. La selección de estos parámetros, indudablemente, depende de las condiciones locales, las especies y la manera en que una u otra familia de curvas pueda modelar el comportamiento de la variable a predecir en tales situaciones específicas. Por tal razón los tres modelos propuestos se manipularon algebraicamente despejando el parámetro del valor asintótico originando curvas anamórficas y el parámetro que da la forma dando curvas polimórficas, resultando los modelos:

4.1.2.1 Curvas anamórficas

Modelo Schumacher

$$H_2 = H_1 e^{\beta_2 \left[\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right]} \quad (4)$$

Modelo Chapman-Richards.

$$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_2}}{1 - e^{-\beta_2 E_1}} \right]^{\beta_1} \quad (5)$$

Modelo Weibull.

$$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_2^{\beta_3}}}{1 - e^{-\beta_2 E_1^{\beta_3}}} \right] \quad (6)$$

4.1.2.2. Curvas polimórficas

Como se mencionó, las curvas polimórficas pueden ser articuladas y desarticuladas; en las primeras, aun cuando la proporcionalidad no se mantiene, guardan cierta relación entre sí, porque no se cruzan o interceptan en el rango de edad de interés; en cambio las desarticuladas se presentan como curvas independientes con patrones de forma muy diferentes y al menos alguna de las curvas puede interceptar a otra dentro del rango de edad de interés (Clutter et al 1983).

Modelo Schumacher

$$H_2 = \beta_1 \left[\frac{H_1}{\beta_1} \right]^{\frac{E_1}{E_2}} \quad (7)$$

Modelo Chapman-Richards

$$H_2 = \beta_1 \left[\frac{H_1}{\beta_1} \right]^{\frac{\ln[1-e^{(-\beta_2 E_2)}]}{\ln[1-e^{(-\beta_2 E_1)}]}} \quad (8)$$

Modelo Weibull

$$H_1 = \beta_1 \left[1 - e^{-\beta_2 \left[\frac{\ln \left(1 - \frac{H_2}{\beta_1} \right)}{-\beta_2} \right]^{\frac{\ln E_1}{\ln E_2}}} \right] \quad (9)$$

Donde :

H_1, H_2 = Altura dominante a la edad 1 y 2 (m)

E_1, E_2 = Edad de la observación 1 y 2 (años)

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Parámetros.

4.2. Ecuaciones para el Índice de Sitio.

La dispersión de las mediciones de altura contra edad muestra una tendencia definida para las dos especies (Figuras 2 y 3), que sugiere el ajuste de los modelos originales y los obtenidos por la diferencia algebraica.

Para realizar el ajuste sugerido, se empleo el paquete de computo SAS (Statistical Analysis System), aplicando el procedimiento NLIN con el método DUD. Los resultados se muestran en el Cuadro 3. Los datos en los citados cuadros se obtuvieron del procedimiento NLIN, excepto las determinaciones de la pseudo R^2 y los coeficientes de variación de los estimadores; se anotan los intervalos asintóticos de confianza, dentro de los que se localizan los valores de los coeficientes de regresión o parámetros con un 95 % de probabilidad. Estos intervalos fueron utilizados para probar la bondad de ajuste de las ecuaciones, ya que al ser mas pequeños, el ajuste se considera mejor.

Ya que los procedimientos de estimación e inferencia en las técnicas de regresión no lineal, no son exactas sino aproximaciones y con los estimadores obtenidos en este

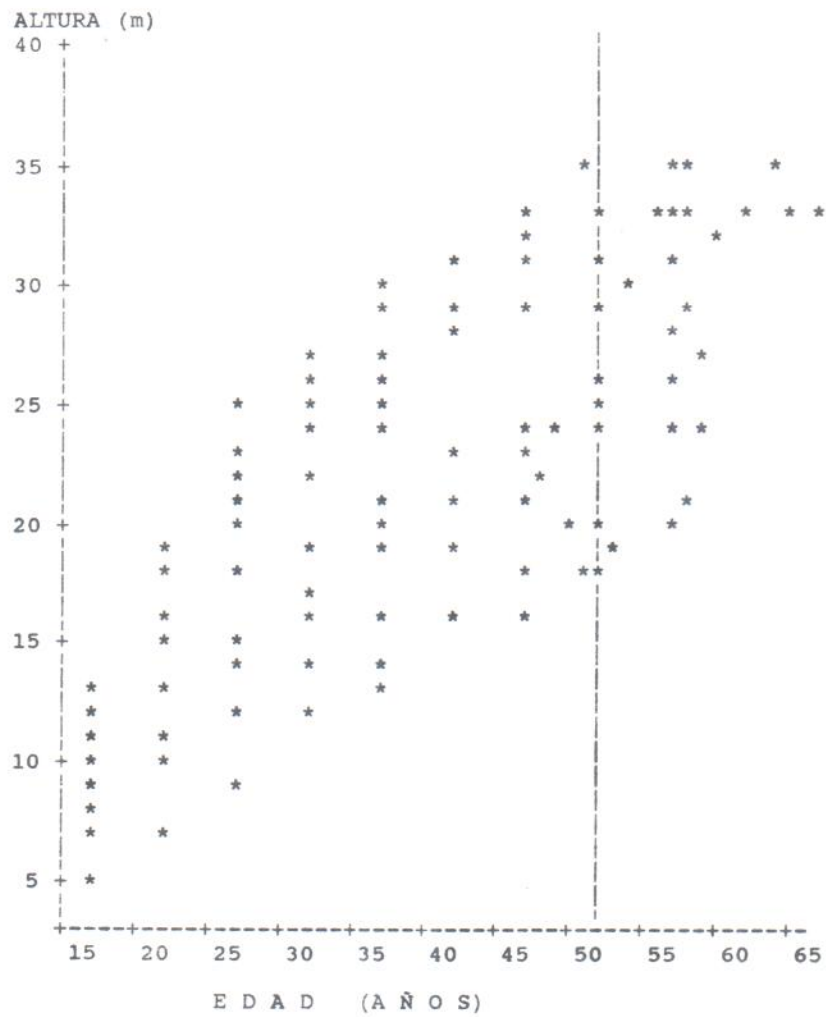


Fig 2. Diagrama de dispersión de datos de altura dominante-edad total para *P. douglasiana*.

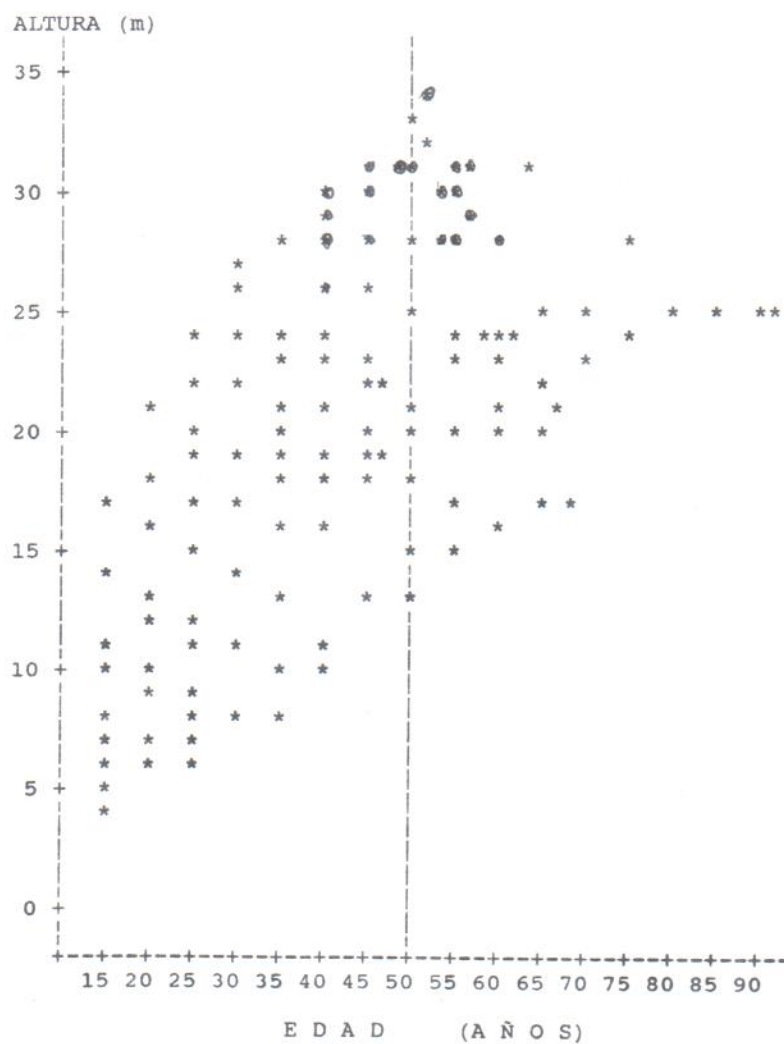


Fig 3. Diagrama de dispersión de datos de altura dominante- edad total para *P. lawsonii*.

trabajo son muy similares, en cada metodología de ajuste (curva guía y diferencia algebraica tipos anamórficos y polimórficos), es necesario considerar además la parsimonia de los modelos.

Los resultados del análisis de regresión no lineal de los nueve modelos en prueba, para las dos especies de pino se presentan en el Cuadro 3; donde se observa que para la curva guía el mejor modelo es el de Schumacher por presentar los estimadores coeficientes de variación bajos y uniformes en las dos especies, una F calculada mayor y ser el modelo más parsimonioso.

En el caso de la diferencia algebraica, tanto para los modelos anamórficos como para los polimórficos, se observa que la suma de cuadrados de los residuales disminuye un 90% aproximadamente. Esto es debido principalmente a la doble utilización de los parámetros ya que en esta metodología el modelo se obtiene de dos ecuaciones simultaneas, además de que la altura que se predice es una función de otra altura, de la edad 1 y 2, en cambio en la metodología de la curva guía la altura se predice en función de la edad.

Cuadro 3. Resumen de los análisis de regresión no lineal a datos de altura-edad de *Pinus douglasiana* (1) y *P. lawsonii* (2) para los modelos Schumacher, Chapman-Richards y Weibull.

MODELO	ESP.	G.L.	S.C. RESIDUAL	C.V. DE ESTIMADORES			INTERVALO ASINTOTICO		PSEUDO R^2	F calc.
				β_1	β_2	β_3	INF.	SUP.		
Schumacher (curva gufa (1))	1	198	4596.7942	4.16	6.47		42.2529	49.8174	0.746	2031.27
	2	190	5469.4998	4.98	8.18		32.9449	40.1278	0.625	1167.35
Chapman-Richards (curva gufa (2))	1	197	4640.7244	9.29	25.58	21.40	29.1003	42.1578	0.744	1333.96
	2	189	5317.8174	5.02	19.77	27.97	23.2806	28.4032	0.635	798.02
Weibull (curva gufa (3))	1	197	4668.2090	10.47	41.71	11.78	27.5801	41.9354	0.742	1325.72
	2	189	5277.1626	4.29	66.40	11.85	22.8450	27.0688	0.638	804.65
Schumacher (anamorfo (4))	1	180	410.1117		3.21				0.968	43062.5
	2	174	399.4048		4.13				0.964	31343.7
Chapman-Richards (anamorfo (5))	1	179	415.7139		7.68	7.49			0.967	21122.1
	2	173	377.5500		14.97	9.14			0.966	16448.3
Weibull (anamorfo (6))	1	179	445.5572		19.22	3.83			0.965	19701.5
	2	173	385.1340		20.18	5.66			0.965	16162.2
Schumacher (polimorfo (7))	1	180	347.1309	3.34			43.2979	49.4118	0.972	50908.3
	2	174	271.4389	3.63			40.0837	46.2784	0.975	46201.5
Chapman-Richards (polimorfo (8))	1	179	434.7349	4.25	10.47		33.8387	40.0411	0.966	20193.7
	2	173	309.7875	6.99	14.44		33.2456	43.8874	0.972	20113.9
Weibull (polimorfo (9))	1	179	519.3349	3.46	21.26		32.3820	37.1320	0.960	16889.7
	2	173	467.9705	9.82	21.69		27.6051	40.8729	0.957	13286.1

Como en los modelos anamórficos se considera implícito el asintota (β_1), entonces se tiene que el parámetro de escala (β_2) y el de forma (β_3) son comunes para todos los sitios. Se observa en el Cuadro 3 que la menor variación de los parámetros y el mayor valor de F calculada lo presenta el modelo de Schumacher, por lo que se le considera el de mejor bondad de ajuste para las dos especies de pino en tratamiento.

Para los modelos polimórficos se tiene en el Cuadro 3, que la suma de cuadrados de los residuales sigue disminuyendo por lo tanto la F calculada continua aumentando su valor y la menor variación de los parámetros la vuelve a presentar el modelo de Schumacher por lo que se le considera el de mejor ajuste, además de que es parsimonioso.

En el presente trabajo, el análisis estadístico de la nueve ecuaciones de índice de sitio mostró que las ecuaciones polimórficas son las que proporcionan mejores ajustes. Estas ecuaciones proporcionan rangos más reducidos en los intervalos asintóticos de confianza, coincidiendo con lo especificado por Rawat et al (1973) y Aguirre (1987). Estos autores señalan que el desarrollo altura-edad de los árboles dominantes es polimórfico, ya que las pruebas estadísticas

indican que la dirección y sesgos producidos por ecuaciones anamórficas son mayores que los de las polimórficas.

Con la finalidad de comparar el anamorfismo o el polimorfismo del crecimiento en altura de las especies de pino en estudio, se construyeron los sistemas de curvas de Índice de Sitio (IS), con sus respectivas curvas de incremento corriente (IC) e incremento medio (IM) para el modelo seleccionado, en los tipos anamórficos y polimórficos.

Las ecuaciones de tipo anamórfico obtenidas por medio del análisis de regresión no lineal para *P. douglasiana* y *P. lawsonii*, con las que se construyeron las curvas de IS, IC e IM (10), (11) y (12) respectivamente; en las que se sustituyó E_1 por la edad base (EB) 50 años y H_1 por el valor del IS elegido (22, 25, 28, 31 y 34 con $\beta_2 = -22.2154$ para *P. douglasiana* y 18, 21, 24, 27 y 30 con $\beta_2 = -20.7031$ para *P. lawsonii*) los resultados se muestran en el anexo.

$$H_2 = IS e^{-\beta_2 \left[\frac{1}{E_2^2} - \frac{1}{EB} \right]} \quad (10)$$

$$IC = \frac{\partial H_2}{\partial E_2} = IS \left[e^{-\beta_2 (E_2^{-2} - EB^{-1})} \right] \left[-\beta_2 (-E_2^{-2}) \right] \quad (11)$$

$$IM = \frac{H_2}{E_2} = \frac{IS e^{\beta_2 \left[\frac{1}{E_2^2} - \frac{1}{EB} \right]}}{E_2} \quad (12)$$

Las ecuaciones de tipo polimórfico, resultado del análisis de regresión no lineal para las mismas bases de datos, se describen a continuación; sobre las cuales se construyeron los sistemas de curvas de IS, IC e IM (13), (14) y (15) respectivamente, siguiendo la metodología utilizada en los modelos anamórficos con $\beta_1 = 46.3548$ para *P. douglasiana* y $\beta_1 = 43.1806$ para *P. lawsonii* los resultados se muestran el anexo 1.

$$H_2 = \beta_1 \left[\frac{IS}{\beta_1} \right]^{\frac{EB}{E_2}} \quad (13)$$

$$IC = \frac{\partial H_2}{\partial E_2} = - \frac{\beta_1 EB}{E_2^2} \ln \left[\frac{IS}{\beta_1} \right]^{\frac{EB}{E_2}} \quad (14)$$

$$IM = \frac{H_2}{E_2} = \frac{\beta_1 \left[\frac{IS}{\beta_1} \right]^{\frac{EB}{E_2}}}{E_2} \quad (15)$$

Donde:

- H1 = altura dominante de la primer medición.
- H2 = altura dominante de la segunda medición.
- IS = índice de sitio.
- EB = edad base (50 años).
- E1 = edad de la primera medición.
- E2 = edad de la segunda medición.
- β_1 = parámetro de posición o asíntota.
- β_2 = parámetro de escala.
- ∂ = derivada parcial.

Para corroborar de manera analítica, si el crecimiento en altura de las especies de pino en estudio es de tipo anamórfico o polimórfico, se obtuvo la segunda derivada parcial con respecto a E_2 de los modelos de crecimiento seleccionados y se igualaron a cero, con la finalidad de obtener la edad de culminación del IC (tangente igual a cero) para cada IS. Observándose que la culminación del IC para las funciones anamórficas es a la misma edad para todos los IS 10.35 y 11.12 años para *P. douglasiana* y *P. lawsonii* respectivamente. En cambio el máximo IC para los modelos polimórficos es diferente para cada IS, resultando 7.75, 10.06, 12.60, 15.44 y 18.63 años para *P. douglasiana* en los IS 22, 25, 28, 31 y 34 m y de 9.10, 11.74, 14.68, 18.02 y

18.86 años para *P. lawsonii* en los IS 18, 21, 24, 27 y 30 m respectivamente.

Con lo anterior, se confirma el marcado polimorfismo del crecimiento en altura de las dos especies de pino y que los máximos crecimientos en los sitios de buena calidad se dan hasta los 10 años aproximadamente y después de los 12 en los terrenos de mediana y baja calidad, esto para *P. douglasiana*. En cambio para *P. lawsonii* el mayor crecimiento se presenta antes de los 12 años en los terrenos de buena calidad y después de los 14 años para los de mediana y baja calidad; coincidiendo con lo expuesto por Asmman en 1961, Aguirre 1984 y Zepeda et al en 1990, con respecto a que el punto de inflexión ocurre a diferentes edades.

El marcado polimorfismo en las curvas de IS, indica que el crecimiento en altura, se comporta de manera diferente en los sitios de buena calidad, mediana y baja calidad. También puede interpretarse que en los lugares de buena calidad, el turno es más corto que en los lugares de mediana y baja calidad, por lo que el IS debe ser considerado en el manejo forestal principalmente en la regulación.

4.4. Relaciones Índice de Sitio con las características edáficas

En la estimación de la calidad del sitio el indicador más frecuentemente usado es el índice de sitio. Por otro lado, al modelar el crecimiento en altura la variable usualmente empleada es la edad. En ambos casos puede ser de interés conocer la influencia de las características edáficas del sitio, ya que en el primer caso sería posible estimar la calidad del sitio en ausencia de árboles dominantes; en el segundo sería posible tener modelos de crecimiento más precisos, ya que de otra manera se asume que las características edáficas son constantes para todos los sitios en un bosque dado y que la única variable que determina el tamaño es la edad (Spurr y Barnes 1982).

Las variables edáficas, tomadas como independientes, que tienen mayor influencia en el crecimiento en altura, la variable dependiente, pueden ser diferentes dependiendo de las condiciones del sitio y de la especie. En este estudio se emplearon las variables edáficas medidas en el Campo Experimental Forestal "Barranca de Cupatitzio" por Gómez-Tagle (1985), que se muestran en el Cuadro 4.

El método de evaluación de la productividad del sitio por medio de las variables edáficas, implica encontrar asociaciones entre las características químicas y físicas del suelo con las dimensiones de los árboles. Estas asociaciones se identifican en un modelo lineal, generalmente seleccionando las variables que han probado tener influencia, aunque también se incluyen otras que pueden tener influencia dada la especificidad señalada antes.

Entre las variables edáficas que la literatura reporta como determinantes de la calidad del sitio para diferentes especies, se ha encontrado que la calidad de sitio (CS) aumenta con las propiedades físicas, en cambio, con las propiedades químicas del suelo regularmente es inversamente proporcional (Tobar 1976, Vázquez 1987, Ortega 1986, Hussain 1987, Fierros 1989).

En el presente trabajo, se recurrió al procedimiento STEPWISE del sistema de cómputo Statistical Analysis System (SAS 1988). Para este procedimiento se especifica un modelo que incluye diversas variables independientes, para explicar la variabilidad de una dependiente, en este caso, las edáficas y el índice de sitio respectivamente. El procedimiento selecciona las mejores ecuaciones de una, dos, tres o más variables explicatorias. La selección de las

Cuadro 4 Variables edáficas medidas en el C. E. F.
"Barranca de Cupatitzio". Cada variable fue medida
en el horizonte A y el horizonte AC, descritos por
Gómez-Tagle (1985).

P R O P I E D A D E S			
F I S I C A S		Q U I M I C A S	
Gro	grosor del horizonte	pH	
Are	arena (%)	MO	% de materia orgánica
Li	limo (%)	CICT	cap. inrt. cat. tot. miliequi. en 100 gr
Arc	arcilla (%)	SB	% sat. de bases
CC	% de humedad a capacidad de campo	Ca	calcio
PMP	% de humedad en el punto de marchites permanente	Mg	magnesio
HA	% humedad aprovechable	Na	sodio
PS	% de humedad en el punto de saturación	K	potasio
Da	densidad aparente	P	fósforo
Dr	densidad real	NO ₃	nitratos
EP	% espacio poroso		

variables independientes se hace en base a su contribución para explicar la variabilidad, esto es, su aporte en R-cuadrada. Este procedimiento ha sido usado y justificado por diversos autores (Mader 1964, Tobar 1976, Vásquez 1987, Ortega 1986, Méndez 1983, Arteaga 1985 Hussain 1987,).

Los datos con que se alimentó el procedimiento fueron los índices de sitio determinados para el Campo Experimental Forestal "Barranca de Cupatitzio", subcapítulo 4.1., esto es la altura de los árboles dominantes a la edad base de 50 años. La estimación de índice de sitio que se empleó fue la basada en el modelo de Schumacher. Cada árbol que se derribó para determinar el índice de sitio estuvo ubicado cerca del lugar donde se excavó un perfil de suelo; de esta manera para cada perfil hubo una o más estimaciones de índice de sitio. Así, se alimentó al procedimiento con 215 observaciones para *P. douglasiana* y 192 para *P. lawsonii* que incluían para cada árbol altura total, edad, estimación del índice de sitio y las variables edáficas del perfil correspondiente.

Posteriormente, con la finalidad de determinar las variables que explican el comportamiento del índice de sitio, se realizaron regresiones múltiples, donde se consideró como variable dependiente el índice de sitio y como independientes a las propiedades físicas y químicas del suelo de dos horizontes **A** y **AC**, los que son muy variables en su espesor, por ejemplo el horizonte **A** varía entre 5-218 cm.

Se obtuvo también el promedio de los dos horizontes, por lo que se contó con el valor medio por perfil excepto el

valor de la lámina de agua aprovechable, calculándose ésta por medio de la fórmula (17) utilizada por Gómez-Tagle en 1985, la que fue calibrada para 100 cm de profundidad. Esto se hizo para las fases y tipos de suelo, los resultados más relevantes se presentan enseguida.

$$L.a.a. = \frac{Prof.cm * H.a. * D.a.}{100} \quad (17)$$

Donde:

L.a.a. = Lámina de agua aprovechable.

Prof. = Profundidad en cm.

H.a. = Humedad aprovechable.

D.a. = Densidad aparente.

Para *P. douglasiana* en las fases de suelo con dos horizontes y el promedio de éstos, los mejores ajustes, que llegaron a R^2 de 0.81 y 0.69 respectivamente fueron las siguientes ecuaciones 18 y 19.

$$IS = -138 + 44.53Da1 + 43.89Laa2 \quad (18)$$

$$IS = 49.48 + 0.79Laa - 0.53EP \quad (19)$$

Considerando en el primero (18) los valores edáficos por cada horizonte, en tanto que en el segundo (19) se consideraron los valores promedios de ambos horizontes excepto el de la lámina de agua aprovechable.

En el primer modelo la densidad aparente (D_{al}) del suelo en el horizonte **A** explica un 70.1 % del fenómeno y un 10.1 % es explicado por la lámina de agua aprovechable en el horizonte **AC**; las dos variables en el modelo están positivamente asociadas al índice de sitio, siendo lógico ya que el valor de la D_{al} en el área de estudio se encuentra entre 0.77 y 1.14, según Spurr et al (1983) y Pritchett (1986) el valor óptimo es de 1.35 gr por cm^3 . Además, respecto a L_{aa2} (lámina de agua aprovechable en el horizonte **AC**), Pritchett (1986) señala que el crecimiento de los árboles está más controlado por la disponibilidad de agua que por cualquier otro factor en casi todos los lugares.

El segundo modelo es explicado en 64.5 % por la lámina de agua aprovechable, que está positivamente asociado al índice de sitio. El espacio poroso contribuye con un 5 % estando negativamente asociado al índice de sitio. La explicación de la relación de la lámina de agua aprovechable es la misma que para el párrafo anterior, y queda claro que

a mayor cantidad de agua disponible se tendrá mayor crecimiento. Sobre el espacio poroso, siendo suelo bastante arenosos, se asocia negativamente a la retención de humedad, esto es, que el espacio poroso permite un drenaje mas intenso y una infiltración rápida, que se asocia negativamente al índice de sitio.

Para *P. lawsonii* en las fases de suelo con horizontes A y AC, el mejor ajuste se obtuvo con R^2 de 0.83, quedando el modelo (20).

$$IS = -29.17 + 50.64Da1 \quad (20)$$

El índice de sitio para *P. lawsonii* es explicado en 83 % por la densidad aparente del horizonte A, resultado que es congruente con lo expuesto para el caso de *P. douglasiana*, siendo directamente proporcional, lo que puede ser lógico, ya que el área de estudio presenta valores entre 0.77 y 1.14, siendo el valor óptimo de 1.35, por lo que aun estos valores podrían ser mayores (Spurr et al 1983 y Pritchett 1986).

En algunos casos las variables explicatorias del fenómeno presentaran una alta correlación entre ellas, ocasionando colinialidad en el modelo. Para detectar este

problema se realizaron análisis de correlación simple para los valores de fase, tipo y para los valores medios. Cuando se encontró que entre las variables del modelo se presentaba correlación mayor de 0.40 se eliminó la variable de menor valor en el aporte de explicación del fenómeno, sin descuidar los valores de prueba de ajuste del modelo.

Una vez que se determinaron las ecuaciones que explican el comportamiento del índice de sitio a través de las variables edáficas, se procedió a probar su eficiencia de ajuste en el modelo de la curva guía seleccionado, sustituyendo el parámetro asintótico en la ecuación obtenida. Con esta operación se logró cambiar positivamente los valores de las pruebas estadísticas de ajuste del modelo seleccionado, por medio de regresión no lineal.

Así se tiene que en la especie *P douglasiana* la pseudo R^2 aumentó de 74.50 a 91.50 al incluir los valores edáficos además de la edad, la suma de cuadrados del error disminuyó de 4596.79 a 57.52, cuando la altura se predice en función de las características edáficas de las fases de suelo considerando dos horizontes, quedando el modelo (21) como se presenta:

$$H = (\beta_3 * Da1 + \beta_4 * Laa1) * (e^{(-\beta_2 E^{-1})}) \quad (21)$$

Donde:

H = altura m

E = edad años

$\beta_2, \beta_3, \beta_4$ = parámetros de los modelos expuestos

Da1 = densidad aparente en el horizonte A

Laa2 = lamina de agua aprovechable en el
horizonte AC

En cambio, cuando la altura se predice en función de las características edáficas de los tipos de suelo, se observó que los valores de las pruebas estadísticas de ajuste disminuyeron en comparación con los de las fases, pero aun son mejores que los obtenidos mediante el modelo original; obteniéndose en este caso un Pseudo R^2 de 84.25 y una suma de cuadrados del error de 104.17. Esto es debido a que las predicciones se hacen en función del promedio de los horizontes excepto el valor de la lámina de agua aprovechable, quedando el modelo (22) como se presenta a continuación:

$$H = (\beta_3 * LaaP + \beta_4 * EPP) * (e^{(-\beta_2 E^{-1})}) \quad (22)$$

Donde:

H = altura m

E = edad años

β_2 , β_3 , β_4 = parámetros de los modelos expuestos

LaaP = lamina de agua aprovechable en el perfil

EPP = promedio de espacio poroso en el perfil

Para *P. lawsonii*, únicamente se encontró respuesta en las fases de suelo, la mejora al modelo original con respecto a los valores obtenidos en función de las características fue reducida pero se logró mejorar el modelo, pues el pseudo R^2 aumento de 62.94 a 71.80 y la suma de cuadrados del error disminuyó considerablemente ya que de 5469.50 se redujo a 57.62, el modelo (23) quedó constituido de la siguiente forma.

$$H = (\beta_3 * Da1) * (e^{(-\beta_2 E^{-1})}) \quad (23)$$

Donde:

H = altura m

E = edad años

β_2 , β_3 = parámetros de los modelos expuestos

Da1 = densidad aparente en el horizonte A

Respecto a las características químicas, puede notarse que no fueron determinantes, esto coincide con lo expuesto por la mayoría de los autores que han trabajado estas características. Esos autores señalan que en muchos casos no se han encontrado relaciones entre el crecimiento en altura y que cuando se encuentran regularmente son negativas. Algunas de las explicaciones se dan en términos de las relaciones complejas entre las propiedades químicas del suelo; las relaciones podrían ocasionar la inversión de la correlación positiva que sería de esperarse entre el contenido de nutrientes y el crecimiento de los árboles. Así, por ejemplo, nutrientes como aluminio, hierro y manganeso se convierten en tóxicos a valores bajos de pH; otros como el fósforo pueden fijarse en compuestos insolubles (Vicent 1978, Ortega 1986, Pritchett 1986, Madrigal 1986, Vásquez 1987 y Hussain 1987).

Para el caso particular del nitrógeno total, que es una de las determinaciones que mas comúnmente se realizan en los análisis de suelos, la mayor parte de este elemento está fijado como nitrógeno orgánico en el humus (Brady 1984); según este autor un 8 % se puede encontrar en la capa superficial del suelo y hasta un 40 % en el subsuelo en forma fija a las arcillas, en donde está relativamente disponible

a las plantas. El amonio soluble y los nitratos rara vez representan más del 1 o 2 % del nitrógeno total presente. Por lo mencionado y otros procesos químicos, la relación entre el nitrógeno y el crecimiento de los árboles podría estar enmascarada.

Con lo anterior podría hipotetizarse que la relación negativa o la no relación es más bien un efecto que una causa, sobre todo en suelos pobres en nitrógeno fácilmente disponible a las plantas; lo que significa que, los suelos están más pobres en nitrógeno, en aquellos lugares en que la combinación de otros factores permite a los árboles su rápida (fácil) utilización. Esto parecería confirmarse con los resultados de Liegel (1981), quien encontró que el crecimiento en altura de *P. caribaea* var. *hondurensis* se puede predecir más fácilmente a través del contenido de nitrógeno en el follaje que el existente en el suelo (Zamudio y Fierros 1992).

5. CONCLUSIONES

1. Se determinó que las predicciones del crecimiento en altura, se pueden estimar en forma explícita e implícita con resultados satisfactorios, para este tipo de estudios. En la predicción explícita, se observó que se obtienen mejores resultados en cuanto a la bondad de ajuste, cuando se usan las variables: lámina de agua aprovechable, densidad aparente y espacio poroso, en lugar del asintota.
2. El índice de sitio expresado a través de las características físicas del suelo, ayuda a determinar áreas potencialmente útiles para plantaciones forestales.
3. Los modelos que se generaron en el presente trabajo, pueden ser utilizados para generar los planos de rodalización requeridos en los planes de manejo forestal, de tal forma que se podrá proyectar el cultivo adecuado para cada calidad de sitio.

4. El modelo de crecimiento de mejor bondad de ajuste por sus estadísticos presentados y su parsimonia fue el polimórfico de Schumacher para las dos especies de pino.
5. El crecimiento en altura de las especies en estudio es polimórfico.
6. El plan de manejo debe ser diseñado en función de los IS presentes en el área a manejar ya que cada calidad de sitio presenta diferente turno.
7. Los resultados de los modelos por la curva guía y los anamórficos se consideran aceptables, pero no tan confiables como los obtenidos con los polimórficos.
8. Cuando se cuenta con información de análisis troncales o de parcelas permanentes (remediciones), es mejor utilizar la metodología de la diferencia algebraica que la de la curva guía.

6. BIBLIOGRAFIA CITADA

- ACOSTA M., M. 1991. Modelo de crecimiento para *Pinus montezumae* Lamb. en el CEF San Juan Tetla, Puebla. Tesis Maestro en Ciencias Forestales. DiCiFo-UACH. Chapingo, México. 88 p.
- AGUILAR, R.M. 1983. Armonización de curvas de crecimiento y calidad de estación. In Primera reunión sobre modelos de crecimiento y masas forestales. Pub. Esp. No 44 INIF SARH México pp. 169-181.
- AGUIRRE C., O. A. 1984. Estimación de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en la región de Iturbide, Nuevo León. Tesis Ing. Agr. DiCiFo-UACH. Chapingo, México. 71 p.
- y E. M. ZEPEDA B. 1984. Estimación de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., de la región de Iturbide, Nuevo León. Ciencia Forestal, 56(10): pp. 50-64.
- AGUIRRE B. C. 1987. Stand average and diameter distribution growth and yield models for natural even-age stands of *Pinus cooperii*. In partial fulfillment of requirements for the degree of doctor philosophy. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. 120 p.
- ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Vol TT2. Roma. Estudios FAO Montes 22/2 198 p.
- ARTEAGA, M.B. 1985. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región Chignahuapa-Zacatlan, Puebla. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados, Programa Académico Forestal. Montecillos, Méx. 181 p.
- 1983. Influencia del suelo y las características fisiográficas en el crecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Ayotuxtla, Gro.. Tesis Profesional UACH. Chapingo, México. 146 p.
- ASSMAN, E. 1970. The principles of forest yield study. Trans. by S. H. Gardiner. Oxford. Pergamon. 506 p.
- AVERY, T. E. 1975. Natural resources measurement. 2nd. Ed. New York. Mc Graw-Hill. 339 p.

- AVERY, T.E. y BURKHART, H.E. 1983. Forest measurements. 3a ed. McGraw-Hill New York. 331 p.
- BARNES, B. V., K. S. PREGITZER, T. A. SPIES y V. H. SPOONER. 1982. Ecological forest site classification. Society of American Foresters. Journal of forestry 80: pp 493-498.
- BASURCO F., A. 1973. Apuntes de dasometría. Medellín. Universidad Nacional. 121 p.
- BENAVIDES S., J. D. 1987. Estimación de la calidad de sitio mediante índices de sitio del *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede. para el A.D.F. Tapalpa, Estado de Jalisco. Tesis de Ing. Agr. DiCiFo-UACH. Chapingo, México. 80 p.
- BRADY N. C. 1984. The nature and properties of soils. New York, MacMillan. 750 p.
- BOJORGES S., J. A. 1990. Índice de sitio para oyamel (*Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham.) en Zoquiapan, México. Tesis de Ing. Agr. DiCiFo-UACH. Chapingo, México 57 p.
- BORDERS, B. E., BAILEY, R. L. y WARE, K. K. 1984. Slash pine site index from a polymorphic model by joining (splining) nonpolynomial segments with an algebraic difference method. Forest Science 30: pp 411-423.
- BORDERS, B. E., BAILEY, R. L. y CLUTTER, J. L. 1988. Forest growth models: parameter estimation using real growth series. In Proceedings of IUFRO Forest Growth Modelling and Prediction Conference, Minneapolis, MN, August 24-28, 1987. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-120 Vol. 2 pp. 660-667.
- BRICKELL J. E. 1968. A method for constructing site index curves from measurements of tree age and height its application to inland douglas-fir. USda. Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper Int-47. 23 p.
- CARMEAN, W. H. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. Adv. Agronomy. 27: pp 209-269.
- CARRILLO M. E. 1992. Situación actual de la industria forestal en el oriente de Michoacán. Memoria de Experiencia Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. 120 p.

- CASTAÑOS M., L. J. 1962. Evaluación de la calidad de estación de pino patula en el norte de Oaxaca, México. Bol. Téc. Inst. Nal. de Invest. Ftiles. México, No. 2. 32 p.
- CASTILLO S., M. A. 1988. Modelo para estimación de incremento y producción maderable neta en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. y Golf., de la Sabana, Oax. Tesis de Ing. Agr. DiCiFo-UACH. Chapingo, México 81 p.
- CLUTTER, J. L., FORTSON, J. C., PIENAAR, L. V., y BAILEY, R. L. 1983. Timber management: A quantitative approach. New York, Wiley. 333 p.
- COILE, T. S. 1952. Soil and growth of forest. In: A.G. Norman (editor), Advances in Agronomy IV. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin. pp 320-398.
- COX Z., F. 1982. Indices de productividad en la evaluación de la calidad de sitio. In Evaluación de la productividad de sitios forestales. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, Chile. pp 7-27.
- CURTIS, R. O. 1964. A stem-analysis approach to site index curves. Forest Science, 10(2): pp. 241-256.
- CHAVEZ H., Y. y A. F. GOMEZ-TAGLE R. 1985 Principales interacciones entre los suelos forestales y las coníferas del Cerro de la Cruz, Mich. Bol. Téc. No. 10 INIF México. 32 p.
- DANIEL, P.W., U.W. HELMS and F.S. BAKER. 1982. Principios de silvicultura. México, McGraw-Hill. 492 p.
- DAVIS, S. L. y JOHNSON, K. N. 1987. Forest management. 3a ed. McGraw-hill. USA. 730 p.
- DE HOOG, R.O. 1981. Site-Nutrition-Growth relationships of *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Ktze. In southern Brazil. Tesis doctoral. Universitätzu Freiburg in Breisgau 161 p.
- DEMANT A. 1976. El eje neovolcánico Transmexicano. III Congreso Latinoamericano Geología. Excursión No 4 Instituto de Geología UNAM México 96 p.
- DOOLITTLE W. 1957. Site index of scarlet and black oak in relation to Southern Appalachian soil and topography. Forest Science 3(2): pp. 114-124

- EK, A. R. 1971. A formula for white spruce site index curves. Univ. Wisc. Forest. res. Notes No: 161 2p.
- FIERROS G., A. M. 1989. Site quality, growth and yield. and growing space occupancy by plantations of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* in Oaxaca, México. Ph D. Diessertation. Yale University Graduate School. 213 p.
- FIERROS G., A. M., D. SMITH M. y H. RAMIREZ M. 1992. Site index for *Pinus caribaea* var *hondurensis* in "La Sabana", Oaxaca, México. Comm. For. Rev. 71(1):1-6.
- GEYER, W. A., R. D. MARQUARD y J. F. BARBER. 1980. Black walnut site quality in relation to soil and topographyc characteristics in Northeastern Kansas. Journal of Soil and Water Conservation. pp 135-137.
- GOMEZ-TAGLE, R. A. 1985 Levantamiento de los suelos forestales del C.E.F. "Barranca de Cupatitzio" y sus relaciones con la vegetación de coníferas. UNAM. Tesis Maestría. México. 135 p.
- GREY, D. C. 1980. On the concept of site in forestry. S. Afr. Journal of Forestry 111: pp 64-65.
- GUERRA, L. G. C. 1990. Analisis de algunas estrategias para la estimación del indice de sitio en rodales puros coetáneos de *Pinus engelmannii* Carr. Tesis de Ing. Agr. DiCiFo-UACH. Chapingo, México 110 p.
- HÄGGLUND, B. 1981. Evaluation of forest site productivity. Forestry bs. 42(11): pp 515-527.
- HUNTER, I. R. y R. GIBSON A. 1984. Predicting *Pinus radiata* site index from environmental variables. New Zealand. Journal of Forestry Science. 14(1): pp 53-64.
- HUSCH, B., C.H. MILLER and T.W. BEERS. 1971. Forest mensuration. New York, Willey 410 p.
- HUSSAIN M. Z. 1987. Growth studies of plantations of *Pinus caribaea* var. *hodurensis* in Puerto Rico. Ph. D. Dissertation. Yale University School of Forestry and Environmental Studies. New Haven, Conn. 118 p.
- JONES, J. R. 1969. Review and comparison of site evaluation methods. USDA. Forest Service. Rocky Mountain Forest and Range Exp. Sta. Research Paper RM-51. 27 p.
- KLEPAC, D. 1976. Crecimiento e incremento de árboles y masa forestales. U A Ch. Chapingo, Méx. 365 p.

- LIEGEL, L. H. 1981. Seasonal nutrition of 3-and 4-year-old *Pinus caribaea* foxtails and normal branched trees in Puerto Rico, Ph. D. Thesis. North Carolina State University, Raleigh, NC. 141 p.
- LOETSCH, F., F. ZÖHRER y K. E. HALLER. 1973. Forest inventory. Trans. by K. F. Panzer. Munchen, BLV. Vol. 2. 469 p.
- MADER D. R. 1964. Where are we in Soil-site classification? p 23-32 En Applications of Soils Information in Forestry. Nueva York State Coll. Agr. (Ithaca) Misc. Pub.
- MADRIGAL H. S. 1986. Caracterización dasométrica del C.E.F. Barranca de Cupatitzio, Mich. Tesis Profesional U.A.Ch. Chapingo, México 94 p.
- MAS P., J. 1970. Instructivo para realizar análisis troncales. Bol. Div. Inst. Nal. de Invest. Ftales. No. 23 México 23 p.
- _____. 1978. Características del crecimiento de seis especies mexicanas de pino con gran futuro para reforestaciones artificiales. In Memoria Primera Reunion Nacional Sobre Plantaciones Forestales SARH. INIF. Dirección General de Investigación y Capacitación Forestal pp. 27-47.
- MENDEZ R. I. 1983. Algunos métodos estadísticos en investigaciones forestales. In Preimera reunion sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. SARH-INIF Pub. Esp. No 44 México pp 149-161.
- MENDOZA B.M. A. 1978. Análisis de sistemas en dasonomía. Tesis Profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo México. 183 p.
- MENDOZA B.M.A. 1983. Conceptos generales sobre modelaje matemático. In Primera reunion sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. SARH-INIF Pub. Esp. No 44 México pp 35-45.
- MEYER, H.A. 1940. A mathematical expression for height curves. Journal of Forestry 38(5): pp. 415-420.
- MOGREN, E. 1983. Algunas alternativas para el futuro manejo de los bosques mexicanos de coníferas. Trad. Miguel Angel Musalem S. Dasonomía Mexicana. 1(1): pp. 13-15.

- MUSALEM L., F. J. 1977. Tablas de producción preliminares en Atenquique. In Memoria del curso de silvicultura en montes de coníferas. México, D. F. SFF. pp. 409-432.
- MUSALEM S. M. A., C. RODRIGUEZ F., F. CARRILLO A. y G. VERA C. 1986. Proyecciones de la investigación silvícola en los suelos forestales de México. I.N.I.F.A.P. Inédito 25 p.
- ORANTES G., F. R. 1980. Determinación de calidad de estación para *Pinus hartwegii* Lindl. en Zoquiapan, Méx. Tesis Ing. Agr. Esp en Bosques. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. Chapingo, México 77 p.
- y M. A. MUSALEM S. 1982. Determinación de calidad de estación de *Pinus hartwegii* Lindl. en Zoquiapan, Méx. Ciencia Forestal 7(35): pp 3-20.
- ORTEGA, B. H. 1986. Factores edáficos y topográficos que determinan la calidad de sitio en plantaciones jóvenes de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Pavones, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mg. Sc. UCR/CATIE, Turrialba, Costa Rica 110 p.
- PAWLUK, S. y H. F. ARNEMAN. 1961. Some forest soil characteristics and their relationship to Jack Pine growth. Forest Science. 7(2): pp 160-173.
- PIENAAR, L. V. 1965. Quantitative theory of forest growth. Ph D. Dissertation. Univ. of Washington. 176 p.
- PIENAAR L.V. AND K. TURNBULL J. 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model based area growth and yield in even age stand. Forest Sci. 19:2-22.
- PRITCHETT L. W. 1986. Suelos forestales (propiedades, conservación y mejoramiento). Ed. Limusa. México. 634 p.
- RAMIREZ M. H. 1994. Construcción de modelos de crecimiento y su aplicación en el diseño de regímenes silvícolas. In Memoria Simposio de Manejo y Silvicultura. Colegio de Postgraduados. Montesillo México. pp. 25-31.
- RAMIREZ, M. H., BAILEY, R. L. y BORDERS, B. E. 1988. Some implications of the algebraic difference approach for developing growth models. In Proceedings of IUFRO Forest Growth Modelling and Prediction Conference, Minneapolis, MN. August 24-28, 1987. USDA. For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-120 Vol. 2 pp. 731-738.

- RAMIREZ, M. H. y A. M. FIERROS G. 1989. Estimación de crecimiento y rendimiento de *Pinus caribea* var. *hondurensis* a través de su distribución diamétrica. In. Salazar, R. (ed.). 1989. Cuarta reunión del Grupo de Trabajo de IUFRO. Silvicultura en los Neotrópicos. Memoria. Antigua, Guatemala. 3 al 7 de abril de 1989. CATIE, Turrialba, Costa Rica. pp 459-474.
- RAMIREZ M., J. G. 1979. Plan piloto de mejoramiento silvícola "Basaseachi". La Investigación Forestal en las Unidades Forestales y Organismos descentralizados. Memoria de la primera reunión. Durango, Dgo. 1978 INIF, publicación especial No. 15 pp 67-74.
- RAWAT A. S., et al 1973. Detailed nonlinear asymptotic regression studies on tree and stand growth with particular reference to forest yield in Barbaria and India. In "Growth and Yield Models for Tree and Stand Simulation." IUFRO. S. 4.01-4 Ed. by Jaran Fries. Stockholm, Sweden. pp 182-221.
- RICHARDS, L. H. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10: pp 290-300.
- RIVERO, B., D.P. Y E.M. ZEPEDA B. 1990. Principios básicos de regulación forestal. U A Ch. Chapingo, Méx. 261p.
- RODRIGUEZ F., C. 1982. Determinación de la calidad de estación de *Pinus montezumae* Lamb., a través de análisis troncales en el CEF San Juan Tetla, Puebla. Tesis de Maestría. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 134 p.
- ROMAHN DE LA V., C. F. H. RAMIREZ M Y J.L. TREVIÑO G. 1987. Serie de apoyo académico No. 26 DiCiFo UACH, Chapingo, Mex. 85 p.
- ROSALES S., P., M.A. OLAYO G., J. A. MORALES F., R. ALVAREZ D., I. MARTINEZ H. y S. CASTRO Z. 1982. El método de "desarrollo silvícola": Una alternativa en la silvicultura y ordenación de bosques. Tesis Ing. Agr. Esp. en Bosques. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 406 p.
- SCHUMACHER, F. X. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. *Journal of Forestry* 37:819-820.
- SPURR, S.H. y B.V. BARNES. 1982. Ecología Forestal. México. A.G.T. Editor 690 p.

- STAGE, A.R. 1963. A mathematical approach polymorphic site index curves for grand fir. *Forest Science*, 9(2): pp. 67-180.
- STEINBRENNER E. C. 1957. An introduction to forest soils of the Douglas-Fir Region of the Pacific Northwest. Forest Soil Committee of the Douglas-Fir Region. Anderson Hall University of Washington Seattle.
- TARRANT. R. F. 1949. Douglas-fir site quality and soil fertility. *Journal of Forestry*. 47: pp 716-720.
- TOBAR. 1976. Evaluación de la calidad de sitio de las plantaciones de *Pinus caibaea* var. *hondurensis* en relación a los factores edáficos en Cachipo, Edo. de Monagas Venezuela. M.Sc. Tesis. Mérida, Venezuela, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de los Andes. 169 p.
- YANG R.C., A. KOZAR, AND J.H. G. SMITH. 1978. The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves. *Canada V6t 1W5 Can. J. For.* 8: 424-431.
- VASQUEZ, C. W. 1978. Desarrollo de índices de sitio y selección de un modelo preliminar de rendimiento para *Pinus caribaea* var. *hodurensis* en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá. M.Sc. Tesis UCR/CATIE, Turrialba, Costa Rica, 113 p.
- VINCENT, L. W. 1978. Site classification for young caribbean pine in grasslands, Venezuela. Ph. D. Thesis. University of Tennessee, Knoxville. 149 p.
- ZAMUDIO S. F. J. y A. M. FIERROS G. 1992 Predicción de la calidad de sitio para *Pinus caribaea* var. *hodurensis* a través de propiedades edáficas. 16 p.
- ZEPEDA B., E. M. 1984. Ejemplificación de tres procedimientos para caracterizar rodales por su densidad. Universidad Autónoma Chapingo. DiCiFo. Serie de apoyo académico No. 34. Chapingo, México. 43 p.
- ZEPEDA B., E.M. y RIVERO B., P. 1984. Construcción de curvas anamórficas de índice de sitio: ejemplificación del método de la curva guía. *Ciencia Forestal* 51:3-38.
- ZEPEDA B., E. M. 1990. Predictor de rendimientos maderables probables de *Pinus patula* Schiede y Deppe, de Perote, Ver., México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montesillos, México. 331 p.

ZEPEDA B., E. M., S. VERUETTE B., O. ESTRADA M. Y S. ESPARZA
P. 1990. Curvas polimórficas de índice de sitio de edad
base invariante, para tres especies de pino del Noroeste
de Chihuahua. In Bol. Téc. No. 25 Serie Técnica DiCiFo
UACH, Chapingo, Mex. pp 1-40.

7. A N E X O

BIBLIOTECA DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

Cuadro 1. Índice de sitio para *P. douglasiana* mediante el modelo de Schumacher, tipo anamórfico a una edad base de 50 años.

EDAD	IS=22	IS=25	IS=28	IS=31	IS=34
3	0.0209	0.0237	0.0266	0.0294	0.0322
7	1.4358	1.6316	1.8274	2.0232	2.2190
10	3.7203	4.2276	4.7350	5.2423	5.7496
15	7.8016	8.8654	9.9293	10.9931	12.0570
20	11.2975	12.8381	14.3786	15.9192	17.4598
25	14.1079	16.0317	17.9555	19.8793	21.8031
30	16.3600	18.5909	20.8218	23.0527	25.2836
35	18.1855	20.6653	23.1452	25.6250	28.1049
40	19.6871	22.3717	25.0564	27.7410	30.4256
45	20.9403	23.7958	26.6513	29.5068	32.3623
50	22.0000	25.0000	28.0000	31.0000	34.0000
55	22.9068	26.0305	29.1541	32.2778	35.4014
60	23.6910	26.9216	30.1521	33.3827	36.6133
65	24.3754	27.6993	31.0233	34.3472	37.6711

Cuadro 2. Índice de sitio para *P. lawsonii* mediante el modelo de Schumacher, tipo anamórfico a una edad base de 50 años.

EDAD	IS=18	IS=21	IS=24	IS=27	IS=30
3	0.0274	0.0320	0.0366	0.0411	0.0457
7	1.4146	1.6504	1.8861	2.1219	2.3577
10	3.4354	4.0079	4.5805	5.1530	5.7256
15	6.8498	7.9915	9.1331	10.2748	11.4164
20	9.6724	11.2845	12.8965	14.5086	16.1207
25	11.8973	13.8801	15.8630	17.8459	19.8288
30	13.6581	15.9344	18.2107	20.4871	22.7634
35	15.0732	17.5854	20.0976	22.6098	25.1219
40	16.2299	18.9349	21.6399	24.3449	27.0499
45	17.1906	20.0557	22.9208	25.7860	28.6511
50	18.0000	21.0000	24.0000	27.0000	30.0000
55	18.6905	21.8056	24.9206	28.0357	31.1508
60	19.2861	22.5004	25.7147	28.9291	32.1434
65	19.8048	23.1056	26.4064	29.7072	33.0080
70	20.2605	23.6373	27.0141	30.3908	33.7676
75	20.6640	24.1080	27.5520	30.9960	34.4400
80	21.0236	24.5275	28.0315	31.5354	35.0393

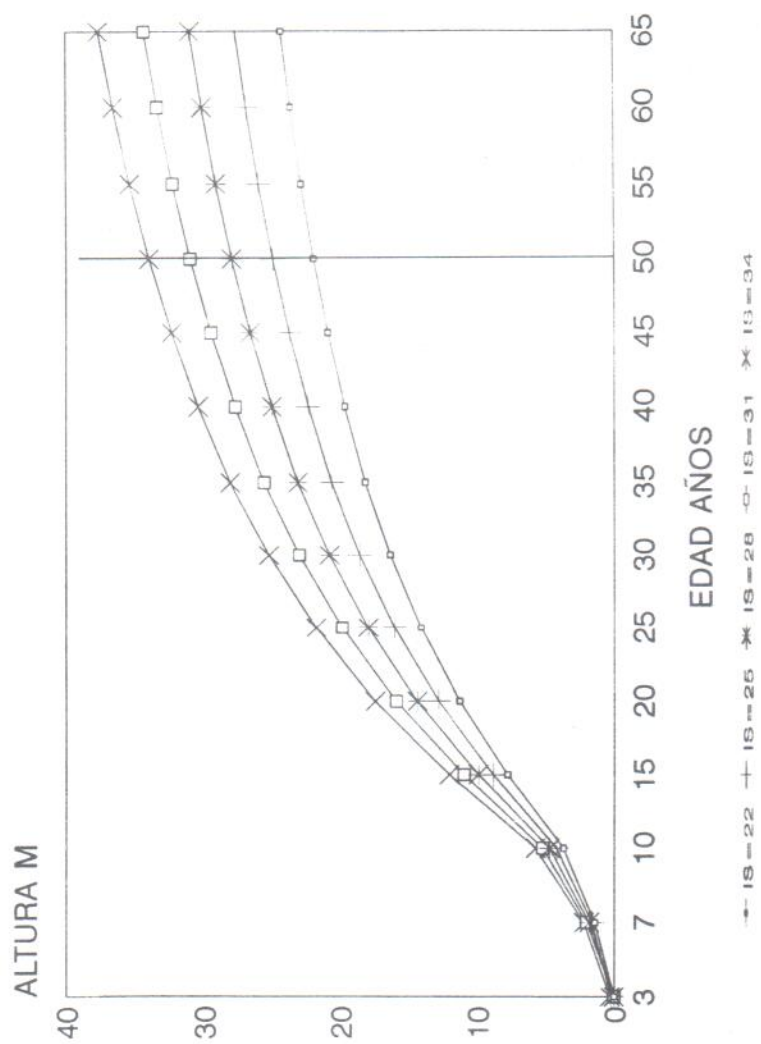


Fig. 1 Índice de sitio para *P. douglasiana* modelo Schumacher, tipo anamórfico.

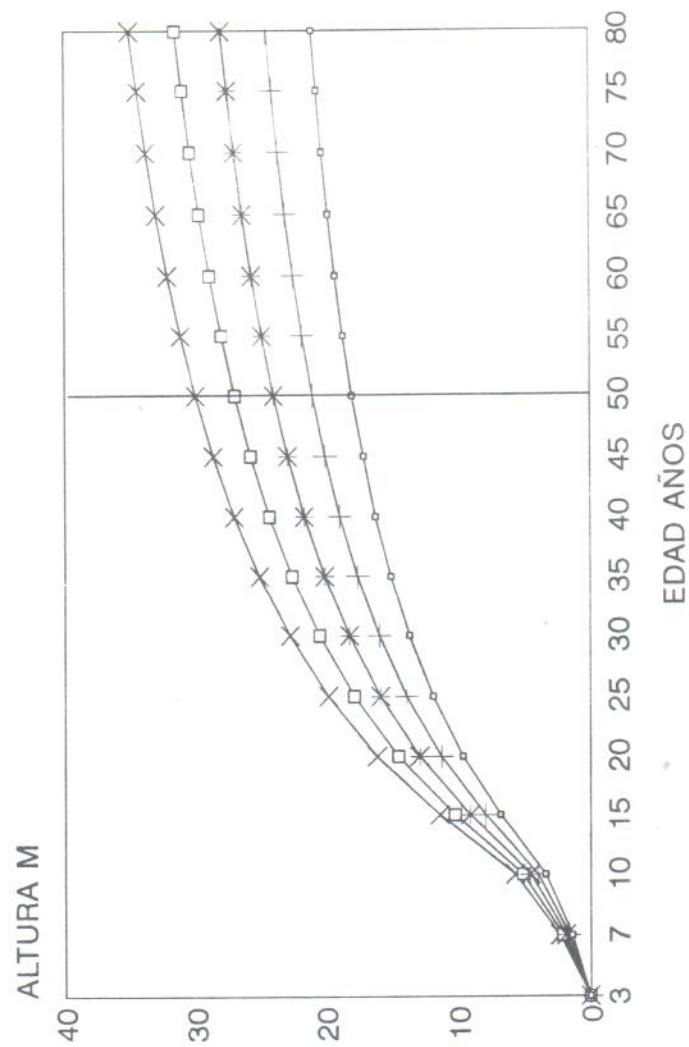


Fig. 2 Índice de sitio para *P. lawsonii* modelo Schumacher tipo anamórfico.

Cuadro 3. Valores del incremento corriente (m/año) para *P. douglasiana* mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico.

EDAD	IS=22	IS=25	IS=28	IS=31	IS=34
3	0.05097	0.05792	0.06487	0.07182	0.07877
7	0.64900	0.73750	0.82600	0.91450	1.00300
10	0.82537	0.93792	1.05047	1.16302	1.27557
15	0.77024	0.87527	0.98030	1.08533	1.19037
20	0.62781	0.71342	0.79903	0.88464	0.97025
25	0.50194	0.57039	0.63884	0.70728	0.77573
30	0.40432	0.45945	0.51459	0.56972	0.62486
35	0.33026	0.37529	0.42033	0.46536	0.51040
40	0.27377	0.31110	0.34844	0.38577	0.42310
45	0.23011	0.26148	0.29286	0.32424	0.35562
50	0.19584	0.22254	0.24925	0.27595	0.30265
55	0.16853	0.19151	0.21449	0.23747	0.26046
60	0.14647	0.16644	0.18641	0.20639	0.22636
65	0.12841	0.14592	0.16344	0.18095	0.19846

Cuadro 4. Valores del incremento corriente (m/año) para *P. lawsonii* mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico.

EDAD	IS=18	IS=21	IS=24	IS=27	IS=30
3	0.06307	0.07358	0.08409	0.09460	0.10511
7	0.59768	0.69730	0.79691	0.89653	0.99614
10	0.71123	0.82976	0.94830	1.06684	1.18538
15	0.63028	0.73533	0.84037	0.94542	1.05047
20	0.50062	0.58406	0.66750	0.75093	0.83437
25	0.39410	0.45978	0.52546	0.59115	0.65683
30	0.31418	0.36655	0.41891	0.47127	0.52364
35	0.25474	0.29720	0.33966	0.38212	0.42457
40	0.21001	0.24501	0.28001	0.31501	0.35001
45	0.17575	0.20505	0.23434	0.26363	0.29292
50	0.14906	0.17391	0.19875	0.22359	0.24844
55	0.12792	0.14924	0.17056	0.19188	0.21320
60	0.11091	0.12940	0.14788	0.16637	0.18485
65	0.09705	0.11322	0.12940	0.14557	0.16174
70	0.08560	0.09987	0.11414	0.12841	0.14267
75	0.07606	0.08873	0.10141	0.11408	0.12676
80	0.06800	0.07934	0.09067	0.10201	0.11335

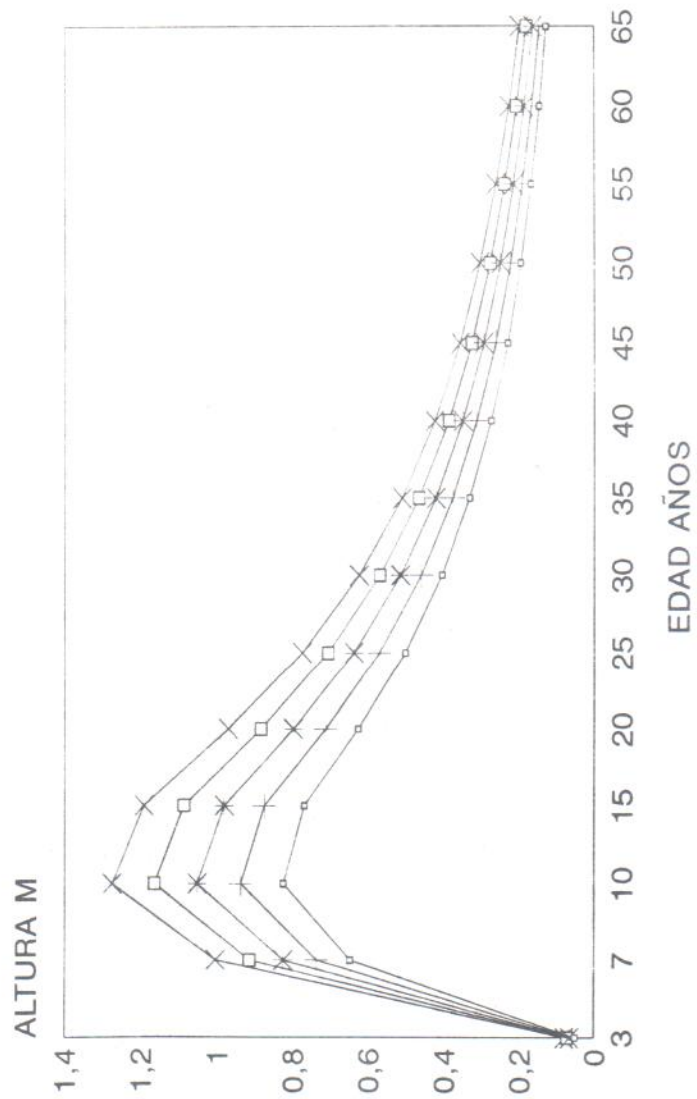


Fig. 3 Incremento corrlente (m/año) para *P. douglasiana* modelo Schumacher tipo anamórfico.

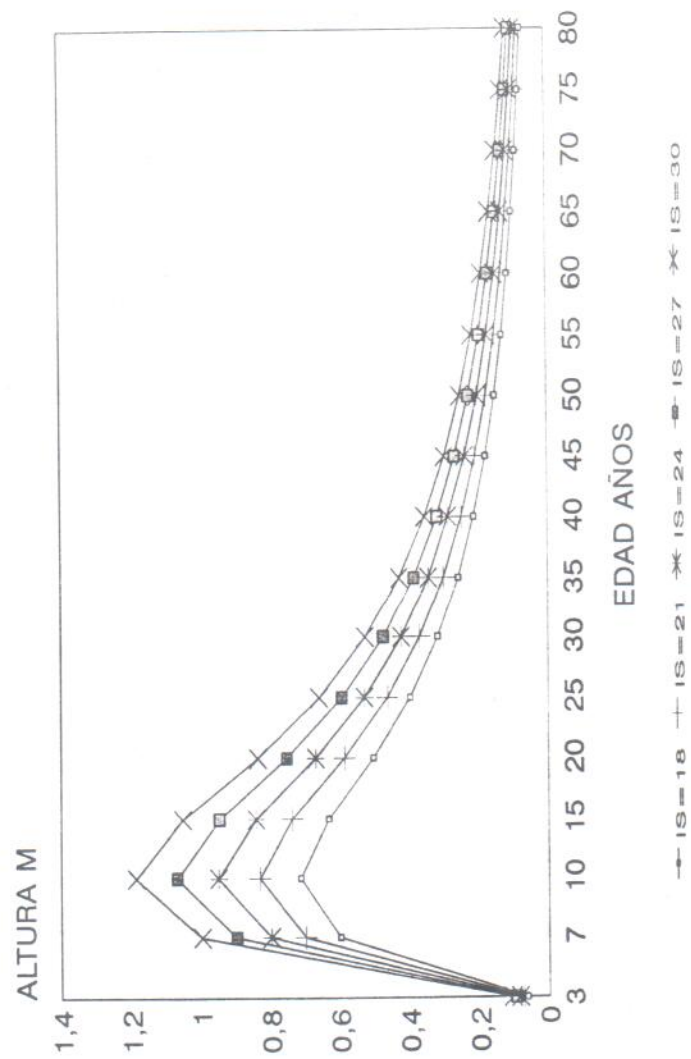


Fig. 4 Incremento corriente (m/año) para *P. lawsonii* modelo Schumacher tipo anamórfico.

Cuadro 5. Valores del incremento medio (m/año) para *P. douglasiana* mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico.

EDAD	IS=22	IS=25	IS=28	IS=31	IS=34
3	0.00695	0.00790	0.00885	0.00980	0.01075
7	0.20511	0.23308	0.26105	0.28902	0.31699
10	0.37203	0.42276	0.47350	0.52423	0.57496
15	0.52010	0.59103	0.66195	0.73287	0.80380
20	0.56487	0.64190	0.71893	0.79596	0.87299
25	0.56432	0.64127	0.71822	0.79517	0.87212
30	0.54533	0.61970	0.69406	0.76842	0.84279
35	0.51959	0.59044	0.66129	0.73214	0.80300
40	0.49218	0.55929	0.62641	0.69352	0.76064
45	0.46534	0.52880	0.59225	0.65571	0.71916
50	0.44000	0.50000	0.56000	0.62000	0.68000
55	0.41649	0.47328	0.53007	0.58687	0.64366
60	0.39485	0.44869	0.50254	0.55638	0.61022
65	0.37501	0.42614	0.47728	0.52842	0.57956

Cuadro 6. Valores del incremento medio (m/año) para *P. lawsonii* mediante el modelo Schumacher, tipo anamórfico.

EDAD	IS=18	IS=21	IS=24	IS=27	IS=30
3	0.00914	0.01066	0.01219	0.01371	0.01523
7	0.20208	0.23577	0.26945	0.30313	0.33681
10	0.34354	0.40079	0.45805	0.51530	0.57256
15	0.45666	0.53277	0.60887	0.68498	0.76109
20	0.48362	0.56422	0.64483	0.72543	0.80603
25	0.47589	0.55521	0.63452	0.71384	0.79315
30	0.45527	0.53115	0.60702	0.68290	0.75878
35	0.43066	0.50244	0.57422	0.64599	0.71777
40	0.40575	0.47337	0.54100	0.60862	0.67625
45	0.38201	0.44568	0.50935	0.57302	0.63669
50	0.36000	0.42000	0.48000	0.54000	0.60000
55	0.33983	0.39646	0.45310	0.50974	0.56638
60	0.32143	0.37501	0.42858	0.48215	0.53572
65	0.30469	0.35547	0.40625	0.45703	0.50782
70	0.28944	0.33768	0.38592	0.43415	0.48239
75	0.27552	0.32144	0.36736	0.41328	0.45920
80	0.26279	0.30659	0.35039	0.39419	0.43799

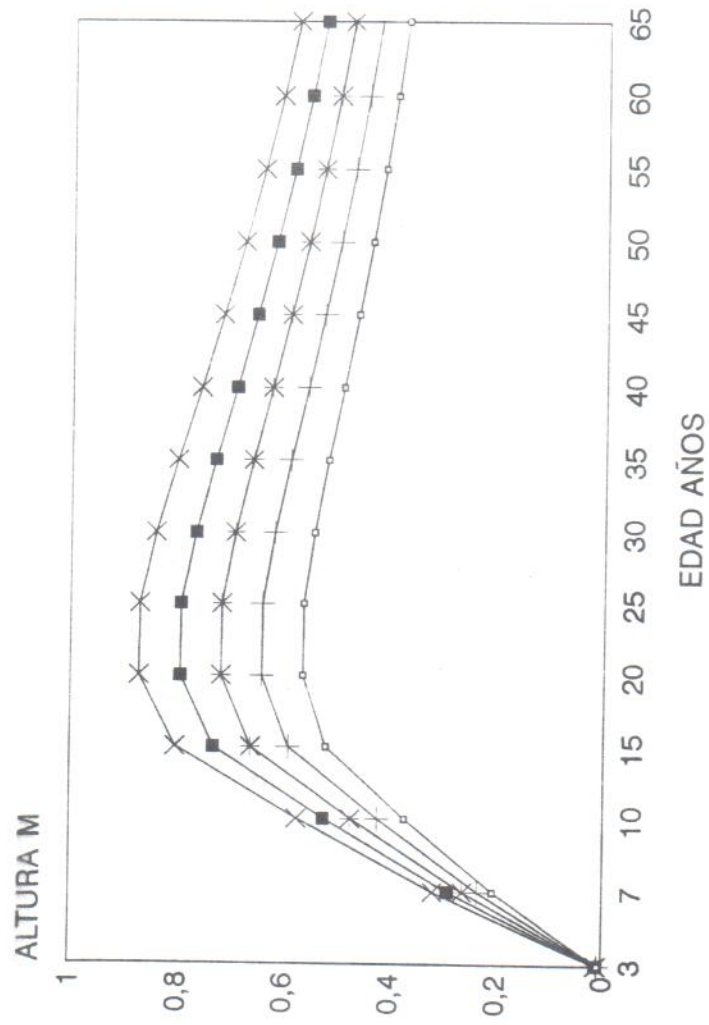


Fig. 5 Incremento medio anual (m/año) para *P. douglasiana* modelo Schumacher tipo anamórfico

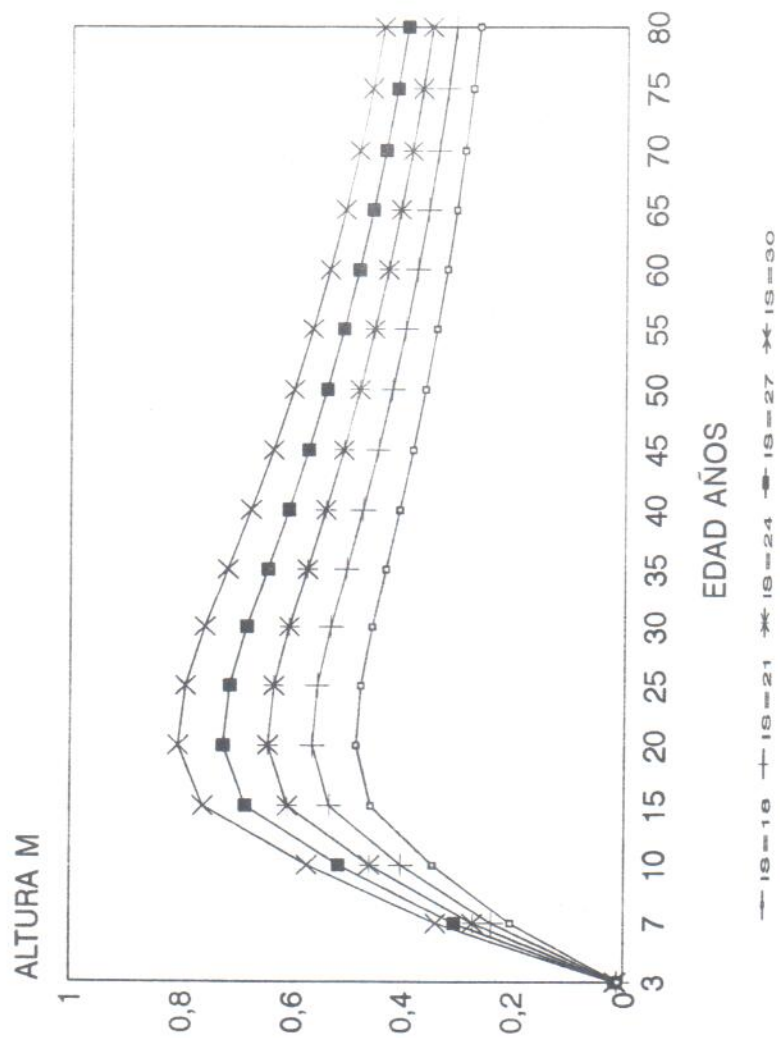


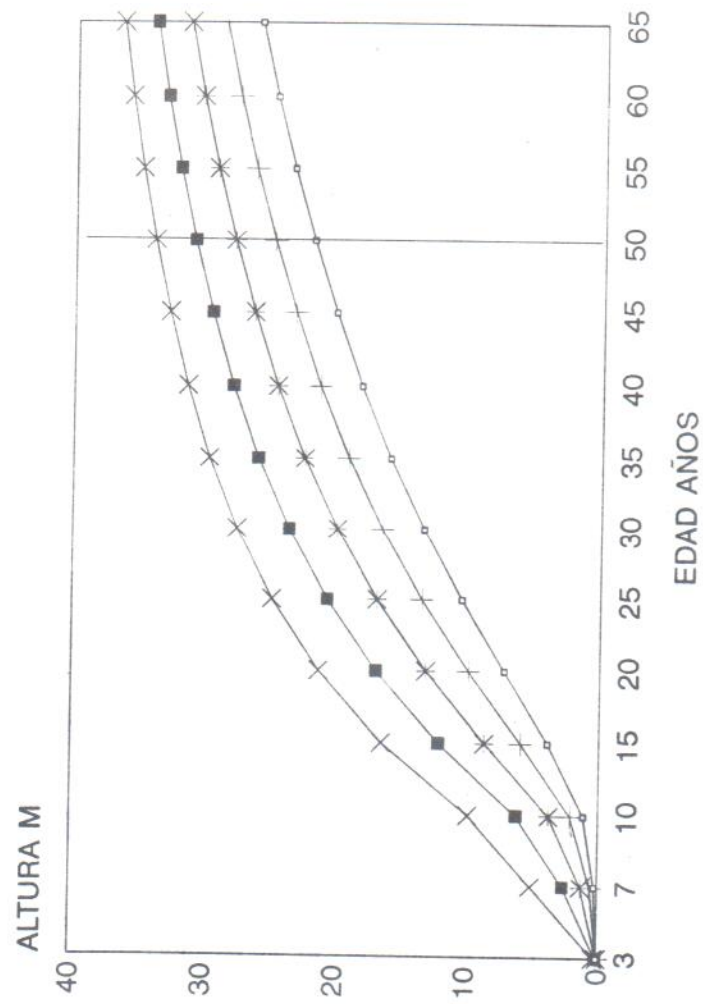
Fig. 6 Incremento medio anual (m/año) para *P. lawsonii* modelo Schumacher tipo anamórfico.

Cuadro 7. Índice de sitio para *P. douglasiana* mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico a una edad base de 50 años.

EDAD	IS=22	IS=25	IS=28	IS=31	IS=34
3	0.0001	0.0015	0.0104	0.0567	0.2645
7	0.2260	0.5632	1.2655	2.6182	5.0647
10	1.1161	2.1150	3.7274	6.2005	9.8404
15	3.8653	5.9189	8.6358	12.1241	16.4958
20	7.1930	9.901	13.1447	16.9536	21.3577
25	10.4412	13.4829	16.9130	20.7314	24.9381
30	13.3857	16.5642	20.0078	23.7068	27.6525
35	15.9848	19.1874	22.5594	26.0901	29.7705
40	18.2602	21.4240	24.6845	28.0336	31.4648
45	20.2516	23.3424	26.4747	29.6447	32.8490
50	22.0000	25.0000	28.0000	31.0000	34.0000
55	23.5422	26.4434	29.3131	32.1549	34.9717
60	24.9097	27.7097	30.4542	33.1500	35.8026
65	26.1286	28.8285	31.4544	34.0161	36.5211

Cuadro 8. Índice de sitio para *P. lawsonii* mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico a una edad base de 50 años.

EDAD	IS=18	IS=21	IS=24	IS=27	IS=30
3	0.0000	0.0002	0.0024	0.0172	0.0998
7	0.0833	0.2506	0.6505	1.5089	3.2025
10	0.5434	1.1746	2.2902	4.1271	6.9893
15	2.3364	3.9058	6.0956	9.0267	12.8249
20	4.8444	7.1221	9.9446	13.3496	17.3725
25	7.5033	10.2128	13.3392	16.8824	20.8425
30	10.0444	12.9868	16.2239	19.7429	23.5328
35	12.3710	15.4186	18.6591	22.0783	25.6645
40	14.4633	17.5368	20.7224	24.0094	27.3891
45	16.3323	19.3835	22.4838	25.6274	28.8102
50	18.0000	21.0000	24.0000	27.0000	30.0000
55	19.4904	22.4223	25.3163	28.1775	31.0099
60	20.8262	23.6809	26.4682	29.1979	31.8774
65	22.0277	24.8009	27.4838	30.0902	32.6304
70	23.1127	25.8029	28.3852	30.8766	33.2900
75	24.0961	26.7041	29.1903	31.5748	33.8723
80	24.9908	27.5183	29.9135	32.1986	34.3903



→ IS=22 + IS=25 * IS=28 ■ IS=31 □ IS=34

Fig. 7 Índice de sitio para *P. douglasiana* modelo Schumacher tipo polimórfico.

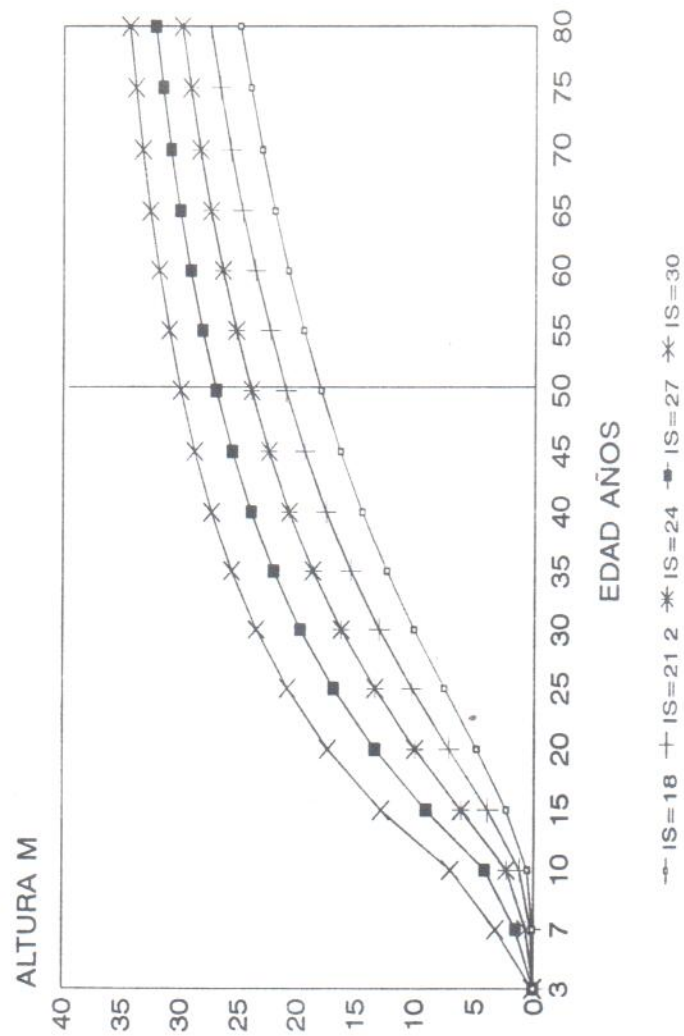


Fig. 8 Índice de sitio para *P. lawsonii* modelo Schumacher tipo polimórfico

Cuadro 9. Valores del incremento corriente (m/año) para *P. douglasiana* mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico.

EDAD	IS=22	IS=25	IS=28	IS=31	IS=34
3	0.00077	0.00540	0.02913	0.12682	0.45554
7	0.17189	0.35488	0.65098	1.07489	1.60191
10	0.41593	0.65297	0.93954	1.24735	1.52510
15	0.64017	0.81215	0.96745	1.08400	1.13625
20	0.67011	0.76422	0.82832	0.85264	0.82752
25	0.62253	0.66600	0.68210	0.66728	0.61839
30	0.55423	0.56820	0.56035	0.52990	0.47618
35	0.48625	0.48356	0.46419	0.42845	0.37665
40	0.42528	0.41338	0.38887	0.35247	0.30478
45	0.37267	0.35587	0.32954	0.29450	0.25141
50	0.32792	0.30873	0.28231	0.24945	0.21078
55	0.29001	0.26988	0.24425	0.21384	0.17917
60	0.25784	0.23763	0.21323	0.18524	0.15413
65	0.23045	0.21065	0.18766	0.16196	0.13397

Cuadro 10 Valores del incremento corriente (m/año) para *P. lawsonii* mediante el modelo Schumacher, tipo pilomórfico.

EDAD	IS=18	IS=21	IS=24	IS=27	IS=30
3	0.00010	0.00105	0.00790	0.04497	0.20191
7	0.07441	0.18437	0.38990	0.72298	1.19018
10	0.23778	0.42340	0.67259	0.96897	1.27277
15	0.45433	0.62570	0.79561	0.94191	1.03797
20	0.52988	0.64177	0.73012	0.78357	0.79089
25	0.52525	0.58898	0.62678	0.63419	0.60727
30	0.48829	0.52011	0.52939	0.51503	0.47615
35	0.44184	0.45367	0.44732	0.42315	0.38152
40	0.39549	0.39506	0.38035	0.35231	0.31173
45	0.35287	0.34502	0.32607	0.29713	0.25908
50	0.31501	0.30277	0.28193	0.25357	0.21852
55	0.28190	0.26717	0.24578	0.21870	0.18668
60	0.25310	0.23710	0.21592	0.19042	0.16125
65	0.22811	0.21158	0.19104	0.16721	0.14064
70	0.20637	0.18980	0.17012	0.14794	0.12372
75	0.18742	0.17111	0.15240	0.13179	0.10966
80	0.17084	0.15498	0.13726	0.11812	0.09785

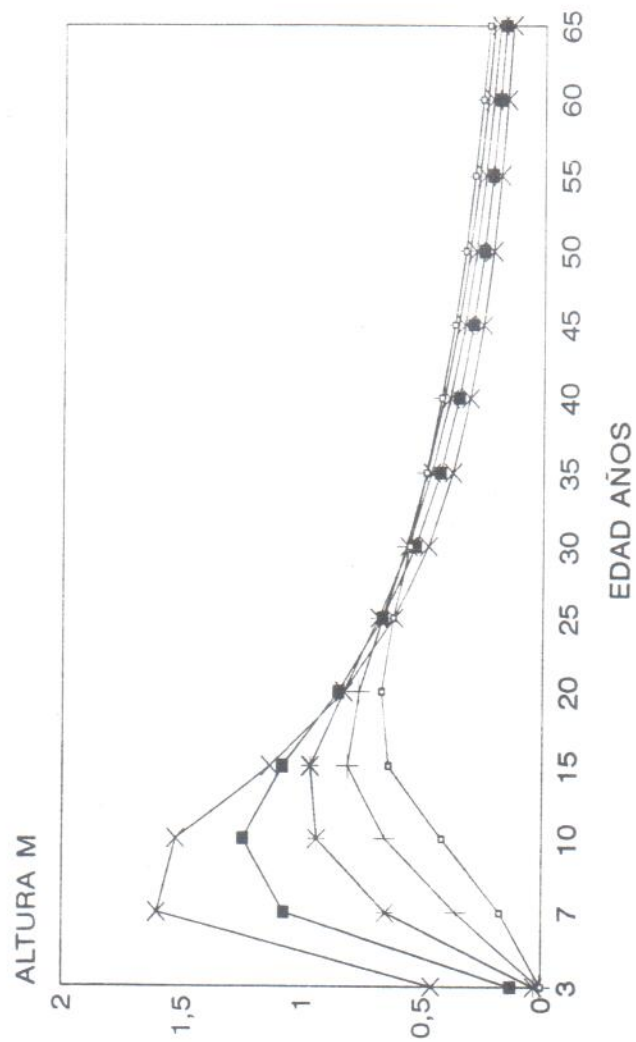


Fig. 9 Incremento corriente (m/año) para *P. douglasiana* modelo Schumacher tipo polimórfico.

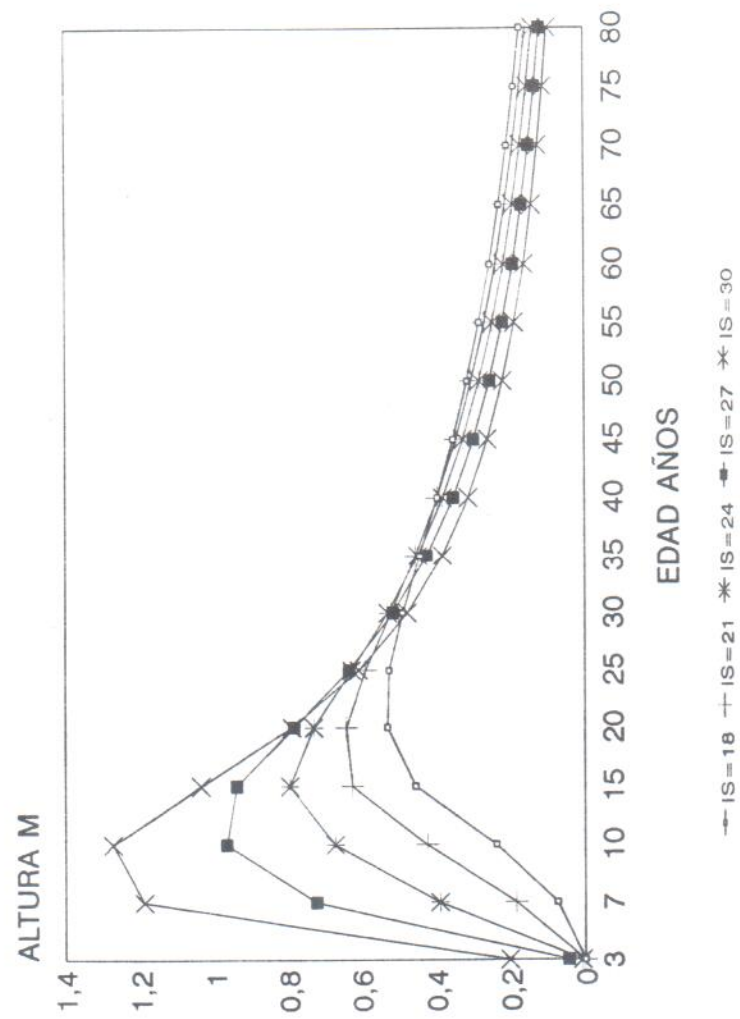


Fig. 10 Incremento corriente (m/año) para *P. lawsonii* modelo Schumacher polimórfico

Cuadro 11 Valores del incremento medio (m/año) para *P. douglasiana* mediante el modelo Schumacher, tipo polimórfico.

EDAD	IS=22	IS=25	IS=28	IS=31	IS=34
3	0.00006	0.00052	0.00347	0.01891	0.08818
7	0.03229	0.08046	0.18078	0.37402	0.72352
10	0.11162	0.21150	0.37274	0.62005	0.98404
15	0.25769	0.39460	0.57572	0.80827	1.09972
20	0.35965	0.49508	0.65724	0.84766	1.06788
25	0.41765	0.53932	0.67652	0.82926	0.99752
30	0.44619	0.55214	0.66693	0.79023	0.92175
35	0.45671	0.54821	0.64455	0.74543	0.85059
40	0.45650	0.53560	0.61711	0.70084	0.78662
45	0.45004	0.51872	0.58833	0.65877	0.72998
50	0.44000	0.50000	0.56000	0.62000	0.68000
55	0.42804	0.48079	0.53297	0.58463	0.63585
60	0.41516	0.46183	0.50757	0.55250	0.59671
65	0.40198	0.44352	0.48391	0.52332	0.56186

Cuadro 12 Valores del incremento medio (m/año) para *P. lawsonii* mediante el modelo Schumacher, tipo polimorfo.

EDAD	IS=18	IS=21	IS=24	IS=27	IS=30
3	0.00001	0.00009	0.00081	0.00575	0.03326
7	0.01191	0.03581	0.09294	0.21555	0.45750
10	0.05435	0.11747	0.22902	0.41271	0.69893
15	0.15576	0.26039	0.40638	0.60178	0.85499
20	0.24222	0.35611	0.49723	0.66748	0.86863
25	0.30013	0.40851	0.53357	0.67530	0.83370
30	0.33481	0.43289	0.54080	0.65810	0.78443
35	0.35346	0.44053	0.53312	0.63081	0.73327
40	0.36158	0.43842	0.51806	0.60024	0.68473
45	0.36294	0.43075	0.49964	0.56950	0.64023
50	0.36000	0.42000	0.48000	0.54000	0.60000
55	0.35437	0.40768	0.46030	0.51232	0.56382
60	0.34710	0.39468	0.44114	0.48663	0.53129
65	0.33889	0.38155	0.42283	0.46293	0.50201
70	0.33018	0.36861	0.40550	0.44109	0.47557
75	0.32128	0.35605	0.38920	0.42100	0.45163
80	0.31239	0.34398	0.37392	0.40248	0.42988

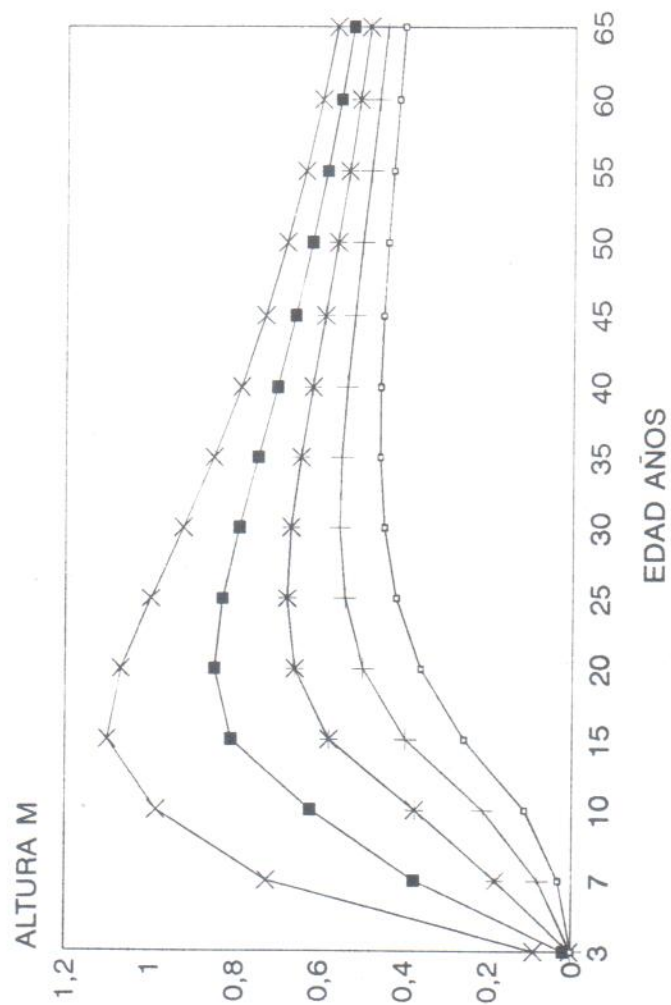


Fig. 11 Incremento medio anual (m/año) para *P. douglasiana* modelo Schumacher tipo polimórfico.

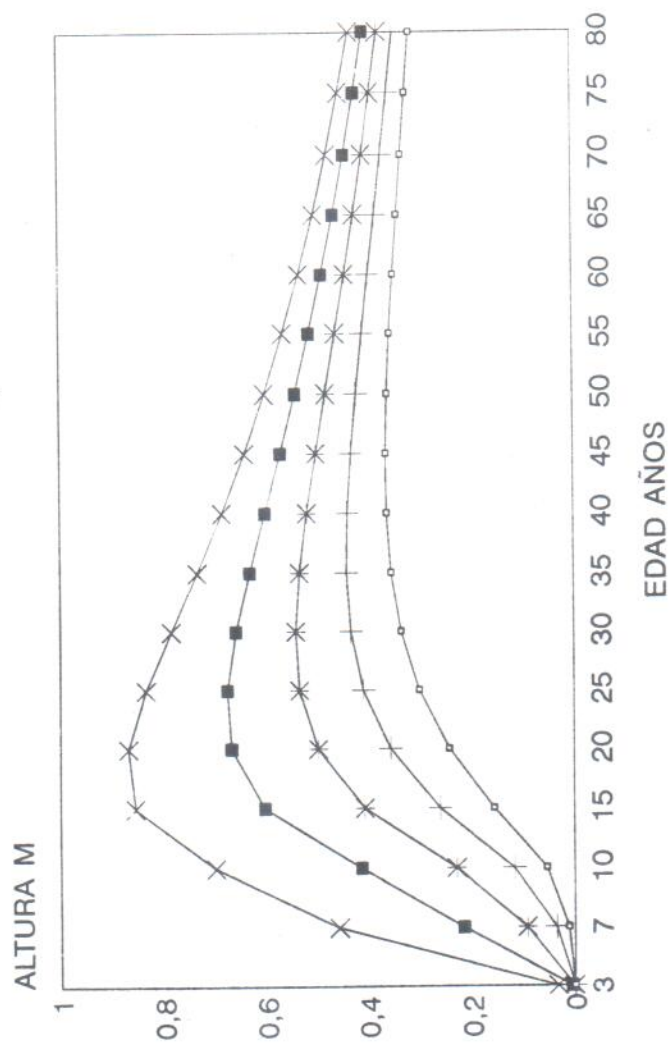


Fig. 12 Incremento medio (m/año) para *P. lawsonii* modelo Schumacher polimórfico