

EVALUACION DE LA CALIDAD DE LAS ESTACIONES FORESTALES. REVISION BIBLIOGRAFICA (*)

ALICIA ORTEGA¹ y G. MONTERO¹

RESUMEN

Este trabajo consiste en una revisión bibliográfica completa de los métodos más utilizados en la evaluación indirecta de la calidad de la estación a nivel mundial y principalmente para masas coetáneas. Se analizan los métodos gráficos, los numéricos, el uso de la vegetación y factores ambientales en dicha evaluación. Por último, se entrega un cuadro resumen con los parámetros a medir en cada método analizado.

1. INTRODUCCION

La capacidad productiva de una estación poblada por una especie dada y tratada a un turno conocido puede ser determinada directamente a través de mediciones repetidas a lo largo de todo el ciclo productivo fijado, y contabilizando el volumen existente y los extraídos en las intervenciones selvícolas, así como la mortalidad natural si se produce. Este procedimiento es lento y costoso en especies de turno medio y largo, por lo cual los forestales se han visto en la necesidad de acudir a indicadores productivos indirectos obtenidos a través de la medición de atributos estacionales intrínsecos o extrínsecos a la masa forestal. Estos atributos o factores pueden agruparse de la siguiente manera:

Factores intrínsecos:

- Altura dominante o media.
- Crecimiento medio máximo.
- Volumen total al final del turno.
- Intercepción.

Factores extrínsecos:

- Del biotopo:
- Clima.
- Litología.

- Edafología.
- Morfología.
- De la biocenosis:
- Especies indicadoras (sociología).
- Asociaciones indicadoras (fitosociología).

Cuando se utilizan factores intrínsecos, el índice de calidad suele ser el valor que toma el factor o atributo a una edad dada de la masa. Cuando se utilizan los factores extrínsecos, el valor del índice suele determinarse a través de relaciones estadísticas en las que los factores extrínsecos suelen entrar como variable independiente y los intrínsecos como variable dependiente, aunque en realidad unos y otros están fuertemente interrelacionados, como se pone de manifiesto en la Figura 1 (WALTER, 1973).

El clima determina el tipo de suelo y de vegetación. La litología influye sobre el suelo y la flora sobre la vegetación, que a su vez está estrechamente interrelacionada con el suelo.

Los factores estacionales que influyen en el crecimiento actúan de forma conjunta e interactuante (JONSSON, 1978), por lo cual se presentan dificultades para separar la influencia de uno o más de ellos a partir de la ejercida por otros. En tales casos el análisis obliga a seleccionar modelos esquemáticos basados en el conocimiento disponible sobre el proceso de crecimiento y sus factores limitantes, tal como hacen HAGGLUND y LUNDMARK (1977) al presentar un modelo en el que se obtiene el índice de calidad de la estación definido co-

¹ Departamento de Sistemas Forestales. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.

(*) Este trabajo forma parte de uno más extenso que se refiere a la creación de un modelo de simulación en masas de pino silvestre que lleva a cabo el Departamento de Sistemas Forestales de INIA.

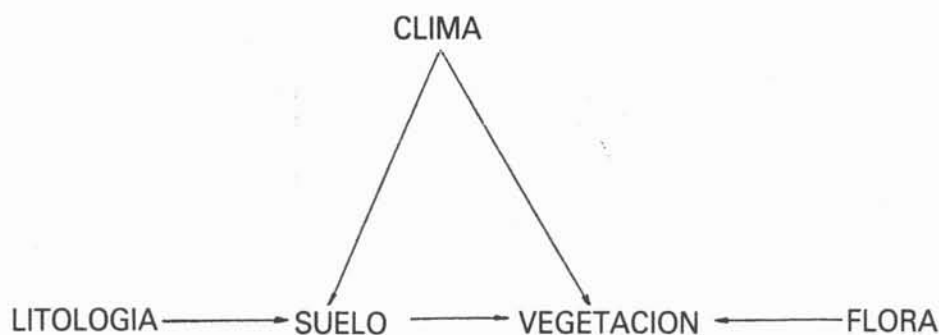


Fig. 1. Esquema de interrelaciones entre factores productivos.

mo la altura dominante a los cien años para *Pinus sylvestris* y *Picea abies*, en función de un grupo de factores extrínsecos o medio ambientales minuciosamente seleccionados. Para la definición del modelo se basan, además, en la ley de BAULE (1917), según la cual, debe partirse del supuesto básico de que «los efectos de los diferentes factores estacionales que influyen en el crecimiento actúan conjuntamente y de manera multiplicativa», es decir, son los efectos los que actúan multiplicativamente y no los factores.

La complejidad de las interacciones limita la utilidad de métodos de regresión sencillos en la obtención del índice, al menos a un nivel de utilización práctica. La dificultad de medición de algunos parámetros del suelo y el poco conocimiento que se tiene de los mecanismos que regulan las interacciones y sus efectos ecofisiológicos han limitado la aplicación práctica de dichos índices a escala de monte. Aunque la calidad de la estación queda mejor definida cuando se tienen en cuenta todos los factores que afectan la capacidad productiva (clima, suelo, vegetación, etcétera), por sencillez y simplificación suelen hacerse estimaciones indirectas a través de uno o más factores que se tratan como si fuesen independientes entre sí, lo cual pocas veces es cierto, pero muchas veces explica un alto porcentaje de la productividad estacional.

El método más ampliamente utilizado y que ha dado mejores resultados ha sido el que utiliza la altura como índice. Se parte de la certeza experimental de que la altura de los árboles dominantes o de los dominantes más los codominantes para una especie y edad dadas está más correlacionada con la producción de madera que ningún otro parámetro de los que definen la capacidad productiva de la estación. El índice de calidad («site index»), en este caso, es un concepto muy concreto: altura que al-

canza una masa a una edad determinada, llamada *edad típica*. La determinación precisa de la edad típica es importante porque puede producir una clasificación errónea de las calidades. Si la evolución de la altura con la edad está representada por curvas polimórficas y los datos proceden de parcelas permanentes o de análisis de troncos, el error podrá ser detectado y corregido variando la edad típica. Si no es así, no podrá detectarse el posible error cometido. En la Figura 2 se pone de manifiesto que existe la posibilidad de que la evolución de la altura con la edad sea distinta para una misma especie, dependiendo de las características de la estación sobre la que se desarrolla.

Este hecho, además de ser lógico, está constatado por numerosos investigadores (SPURR, 1982; CARMEAN, 1975). Las justificaciones podrían ser las siguientes:

- La curva (a) podría presentarse en un suelo en el que la especie crece de forma normal hasta que las raíces alcancen un horizonte enriquecido o un abastecimiento de agua subterránea, después de lo cual el crecimiento se acelera.
- La curva (b) correspondería al comportamien-

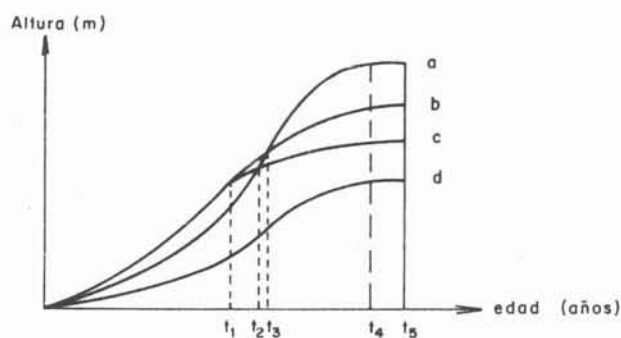


Fig. 2. Distintas evoluciones de la altura con la edad.

to normal de la especie cuando crece sobre un suelo dado sin peculiaridades específicas.

- La curva (c) representa la evolución de la altura con la edad cuando la especie crece sobre un suelo en el que la profundidad está limitada por razones físicas o biológicas. El crecimiento en altura sería normal hasta el punto en el que la profundidad del suelo se convierte en factor limitante, ralentizándose el crecimiento. Este caso es frecuente en repoblaciones artificiales realizadas sobre suelos en los que existe una capa de arcilla entre los 40 y 60 cm de profundidad y, probablemente, ha sido la causa del fracaso de muchas de ellas.
- La curva (d) podría presentarse cuando la especie crece sobre un suelo con bajo nivel de fertilidad pero sin peculiaridades específicas.

La Figura 2 indica también que, al menos teóricamente, siempre existe una edad, en este caso t_3 , a partir de la cual el orden jerárquico de las curvas se estabiliza hasta alcanzar la altura máxima posible (t_3).

La edad típica es la edad a la cual se cuantifica y se fija el índice, por lo cual, si se quiere relacionar la posición relativa de la curva a dicha edad con la producción de madera que presumiblemente se puede obtener a un turno dado (t_4) (y ésta es la aplicación más importante del índice), tendremos que tomar una edad típica superior a t_3 . Si el turno fijado para la especie fuese igual o menor que t_3 , la jerarquización de las calidades sería distinta, dependiendo de donde se tome la edad típica t_1 , t_2 , t_3 o cualquier edad intermedia. Curvas que aparecerán como iguales en un punto pueden resultar distintas si se toma la edad típica en otro punto.

En condiciones «normales» de evolución de la altura con la edad, lo que supone que no existen factores especiales que la alteren fuertemente (casos de las curvas b y d), lo habitual es tomar la edad típica próxima a la mitad del turno, al final del turno, o al finalizar el crecimiento en altura de la especie. La elección de una u otra dependerá del turno y del conocimiento que se tenga sobre el modo de crecimiento de la especie. En las especies forestales con turnos medios o largos (80-120 años) la mitad del turno tiende a coincidir, en algunos casos, con la edad de terminación del máximo crecimiento en altura, que es otro de los criterios que

algunos autores utilizan para fijar la edad. La elección de la edad típica próxima al turno o a la edad de ralentización del crecimiento en altura tiene la ventaja de que a partir de ese punto no se van a producir cambios en la posición de las curvas. La fijación de esta edad próxima a la mitad del turno tiene como ventaja el poder conocer la calidad de la estación en masas más jóvenes y predecir las producciones que podrán obtenerse al final del turno. Es deseable que esta edad coincida con la edad de finalización del máximo crecimiento en altura, a partir de lo cual es menos probable que se produzcan cambios en la posición relativa de las curvas. En cualquier caso, la edad típica será distinta para distintas calidades de estación de una misma especie.

Las consideraciones hechas sobre la evolución de la altura y la fijación de la edad típica pueden extenderse, con pequeñas matizaciones, a cualquiera de los métodos que utilizan el valor alcanzado, a una edad previamente fijada, por alguno de los factores intrínsecos mencionados como índice de la calidad de la estación.

Los métodos de construcción de curvas de calidad permiten una jerarquización de las mismas, identificándolas con un número romano que indica la posición relativa de cada curva, I, II, III, IV, V, etcétera, dependiendo del número de calidades que se hayan definido. Esta identificación, por sí sola, no proporciona información suficiente para inferir la capacidad productiva de la especie y además no permite comparar de manera sencilla e inmediata las curvas obtenidas para una misma especie en distintas zonas geográficas. Para facilitar la comparación de las calidades obtenidas en distintas zonas ecológicas y/o geográficas, algunos autores caracterizan a cada curva con una cifra que representa alguna variable dasométrica de la masa de la cual procede, añadiendo así, a la jerarquización relativa, un indicador de mayor contenido productivo. Estas variables de masa suelen ser el crecimiento medio máximo ($m^3/\text{Ha/año}$), o la altura dominante o media a la edad típica. Esta forma de proceder permite comparar curvas de calidad y tablas de producción mediante el crecimiento medio máximo, la altura dominante o la altura media, independientemente de la zona geográfica de donde procedan y de la calidad relativa que se les hubiese asignado (I, II, III, IV, V, etcétera).

Los técnicos y gestores forestales reciben más información cuando se les habla de una masa de una cierta especie de una zona geográfica dada que tiene un crecimiento medio máximo de 10 m³/Ha/año o una altura dominante de 20 m a los cincuenta años, que si se les dice que se trata de una masa de calidad I para esa zona.

La bondad de la altura como indicador de la calidad radica en la correlación que existe entre altura y volumen. Según la ley de EICHHORN, la producción total en volumen de masas homogéneas de una especie dada dentro de una región climáticamente homogénea es esencialmente función de la altura. Esto implica la adopción de varias hipótesis, que se pueden resumir en: la relación entre la altura dominante y la producción total es independiente de la edad, de la estación y de la densidad de la población o, más aún, del tipo e intensidad de las claras practicadas.

Si la independencia de la relación altura dominante/volumen total, tanto de la edad como de la estación, es aceptada por muchos, las tendencias más recientes acentúan la necesidad de dividir en varios niveles la producción observada en un mismo lugar para una edad y una altura dominante idénticas (ASSMANN y FRANZ, 1965; HAMILTON y CHRISTIE, 1971, y otros. La ley de EICHHORN puede tener un gran interés práctico debido a que proporciona la variación de la producción total (RONDEAUX, 1977).

En lo que concierne a la densidad, se admite que dentro de límites no bien determinados para nuestras especies, el crecimiento corriente en volumen no depende de la intensidad de las claras.

En estas condiciones será, sin duda, más estricto precisar que la ley de EICHHORN concierne a la producción total correspondiente a la ley de crecimiento corriente máximo (DECOURT, 1973).

Investigaciones posteriores han matizado la ley en los siguientes aspectos:

- Se adapta mejor a masas de coníferas que de frondosas.
- La relación es mejor cuando se utiliza el volumen de la masa total en lugar del volumen de la masa principal.
- La ley es válida cuando se utiliza en masas

con una densidad comprendida dentro de los límites del área basimétrica óptima definida por ASSMAN (1970), lo que permite, a través de intervenciones selvícolas, modificar el volumen individual, el volumen principal y secundario y el área basimétrica, ofreciendo la posibilidad de construir tablas de producción de silvicultura variable para cada clase de calidad.

El índice de calidad aporta información sobre la capacidad productiva de la estación y sobre la silvicultura que deba aplicarse. En todo caso, no importa en qué medida un método indirecto pueda reflejar la variación en el ambiente, su importancia radica en el hecho de que puede convertirse en un estimador preciso de la máxima producción a una edad predeterminada.

2. INDICE DE SITIO

Un método común de la evaluación de la calidad de la estación en bosques coetáneos ha sido el índice de sitio, el cual corresponde al punto de intersección del gráfico altura/edad con su ordenada a la edad de referencia.

Las curvas de índice de sitio han sido y son ampliamente usadas, tanto por su fácil interpretación y alta significación productiva como por su utilidad práctica para la correcta aplicación de las tablas de producción y su operatividad de cuanto a la toma de datos.

Según CAJANDER (1926), Huber en 1924 utilizó el índice de sitio en Alemania. Su uso llegó a Escandinavia (JONSON, 1914) y a los Estados Unidos (STERRET, 1914). No mucho después, en los Estados Unidos, el concepto fue discutido en una serie de artículos (PARKER, 1916; ROTH, 1916, 1918; SPRING, 1917; BATES, 1918, y especialmente FROTHINGHAM, 1921) y fue comparado con las relaciones volumen-edad, tipos de vegetación y factores ambientales como posibles índices alternativos, pero se llegó a la conclusión de que la relación altura-edad tiene mayor significación productiva, por sí sola, que ninguna otra.

Las curvas de índice de sitio pueden ser desarrolladas a partir de información de crecimiento en altura, de parcelas permanentes y del análisis de troncos. Sin embargo, comúnmente están basadas en datos de varias parcelas temporales de muestreo. En la

muestra deben estar incluidas todas las clases de edad y de calidades de estación.

2.1. Alturas consideradas

Los criterios para la elección de los árboles en los que se medirá la altura son variables y han evolucionado desde los primeros trabajos realizados. En general, son tres las alturas que se han utilizado en los estudios de calidad de estación mediante índices de sitio.

- Altura media.
- Altura dominante.
- Estatura.

2.1.1. *Altura media*

La altura media corresponde al promedio aritmético de la altura de todos los árboles de la muestra considerada.

A medida que se ha avanzado en los estudios, la altura media ha sido reemplazada por la altura dominante que corresponde al promedio de la altura de una muestra de los árboles dominantes o dominantes más codominantes.

Las ventajas de utilizar la altura media son las siguientes:

- a) Su medición es sencilla.
- b) La altura total (media) es, de los factores que intervienen en la formación del volumen, el parámetro que mejor acusa las variaciones de la calidad de la estación.
- c) La altura media y la dominante están muy correlacionadas, por lo que mediante procesos estadísticos (o gráficos) se pueden hacer comparaciones y transformar la una en la otra.

Sus desventajas son:

- a) Las situaciones extremas de espesura afectan a la altura total.
- b) Las claras por lo bajo elevan la altura media, produciéndose saltos bruscos en su evolución.
- c) La evolución de la altura, sobre todo en la primera mitad del turno, refleja las condiciones iniciales de origen y tratamientos culturales del suelo y vuelo de la masa.

- d) La técnica habitual supone que la forma de la curva es la misma para todas las calidades, lo cual no es cierto, debido, principalmente, a diferencias de las características del suelo.

2.1.2. *Altura dominante*

La principal ventaja de la altura dominante como parámetro indicador de la producción es que es menos sensible a las claras y, en general, a cualquier tratamiento selvícola.

Las desventajas son:

- a) Dificultad interpretativa de establecer límites en la dinámica evolutiva de la masa dominante.
- b) Se produce un intercambio de los pies que forman el piso dominante, los dominantes no son los mismos en cada momento del turno, al menos en las primeras edades de la masa.
- c) Estos árboles destacados en determinadas ocasiones representan condiciones excepcionales de origen genético o edáfico ajenas a la calidad media de la estación.

El criterio para la definición de la altura dominante no es uniforme. Sin embargo, ha habido una evolución en el tamaño de la muestra en el sentido de disminuirla cada vez más.

En la Commonwealth se utiliza generalmente el concepto de «Altura Superior», la cual está referida a la media aritmética de la altura de los 250 árboles/Ha de mayores diámetros.

Las variantes más importantes de la altura dominante han sido:

- Altura de los 247 árboles más gruesos/Ha. Este sistema, referido a la edad de 50 años, ha sido el empleado en las Tablas Inglesas de Hummel.
- Altura correspondiente al árbol cuya sección normal es la media de los 100 pies más gruesos/Ha (ASSMAN, 1970).
- Altura dominante de Weise, correspondiente al pie de sección normal media entre el 20% de los árboles más gruesos de la distribución diamétrica.

- Altura dominante definida por el árbol cuyo diámetro es $d + 3\sigma$ siendo d el diámetro normal medio aritmético y σ la desviación típica de la distribución diamétrica.

2.1.3. Estatura

Se basa en el criterio biológico de estimar la bondad de la estación por la altura alcanzada por la masa al final del turno, es decir, cuando haya alcanzado su total desarrollo fisiológico. Este método fue aplicado en Dinamarca con buenos resultados. Para trazar las curvas se supone que la altura media alcanzada en la Clase V de Calidad es la mitad de la alcanzada a la misma edad en la Clase I. Las clases intermedias las obtiene dividiendo el intervalo en partes iguales.

Este método tiene la ventaja de que se podría aplicar a las masas irregulares. Su gran desventaja es que resulta difícil predecir la altura máxima que alcanzará una masa inmadura (PITA, 1964), aunque posteriormente se han usado algunos modelos de la curva logística corregida que permiten simular la altura total que puede alcanzar la masa al final de su rotación en función de la pendiente de la curva en los primeros 5-10 años de la masa (CANCIO, 1988).

2.2. Metodología

El tratamiento de la información para la determinación del índice de sitio ha evolucionado desde los métodos gráficos anamórficos, en el sentido de que se ha reconocido la necesidad de una mayor precisión en la representación de la productividad de una estación dada en función de este índice, ya sea en forma gráfica o en su forma numérica.

2.2.1. Métodos gráficos

Los métodos gráficos se refieren a la representación de la altura *versus* la edad de una masa dada, sin la utilización de fórmulas o modelos, y a través de dicha representación se establecen las diversas curvas de índice de sitio.

2.2.1.1. Método de las fajas

Este método data de 1877 y se asocia con el nombre de VON BAUR (Alemania). En este método,

primero se llevan a ejes cartesianos las alturas sobre las edades. Luego se dibujan dos curvas límites, una delimitando el borde superior de los datos y la otra el borde inferior. El espacio comprendido entre las dos curvas límites se divide en fajas de igual anchura mediante curvas armonizadas. Estas fajas vienen a ser las curvas de índice de sitio.

Las objeciones a este método son:

- Las curvas guías se basan en los datos extremos y no en los medios.
- Los datos de los extremos provienen de muy pocas parcelas de la muestra.
- La forma de las curvas de crecimiento de las clases intermedias viene determinada por la forma de las curvas de crecimiento de las mejores y peores estaciones.

2.2.1.2. Método de las curvas armónicas

Este método es el seguido en el caso de parcelas permanentes. Los datos de altura sobre edad se llevan a ejes cartesianos. Luego se dibuja una curva media única («Guidin curve» o curva directriz) para una edad conveniente («Age index» o edad típica) a partir de la cual se completa el período de crecimiento rápido, el que preferiblemente se toma menor a la edad de corta o turno de la especie estudiada, normalmente 1/2 de su turno.

Se selecciona un número conveniente de intervalos iguales de altura que limitarán las diferentes clases de calidad de la estación. A continuación se dibujan una serie de curvas armónicas respecto a la directriz, con su misma forma y características, diferenciándose de ésta sólo por un porcentaje fijo.

Algunos autores han aplicado los principios de anamorfosis o nomogramas a esta técnica.

Los supuestos en que se basa el método y que pueden ser objetados, son los siguientes:

- Los datos de las parcelas son representativos del rango de estaciones por clase de edad y, consecuentemente, el diagrama disperso altura/edad indica adecuadamente la forma de las curvas.
- El efecto de las diferencias de estación sobre el crecimiento en altura es relativamente el mismo a cualquier edad.

- Las curvas de crecimiento para cada estación tienen la misma forma.

El primer supuesto sólo puede admitirse mediante la elección de una técnica de muestreo consistente, eficiente y suficiente, pero aún así, pudiera suceder que en las masas no existan todas las clases de edad o calidad.

Con respecto al segundo supuesto, ha sido estudiado en detalle por numerosos autores (BRUCE y SCHUMACHER, 1950; CURTIS, 1964; BRICKWELL, 1968, etcétera). En este caso se debe trabajar con el coeficiente de variación de la altura para cada clase de edad, y en función de éste, estimar la posición respecto a la curva directriz en las distintas edades.

Por último, con respecto a la forma de las curvas de crecimiento, según BECK (1971), la curva de índice de sitio es simplemente una curva de crecimiento de una determinada entidad genética bajo una serie de condiciones ambientales, por lo que se encuentran diferentes formas de curvas para diferentes combinaciones de árboles y condiciones ambientales. Por tanto, las curvas de calidad son esencialmente polimórficas; es decir, que varían de una estación a otra, y la función a usar debería ser tan flexible que las curvas correspondientes a los distintos índices de sitio tomaran distintas formas y demostraran, por ejemplo, que el crecimiento en altura culmina antes en mejores sitios (BULL, 1931).

Este tema ha sido estudiado por numerosos autores, tales como CARMEAN (1956), CURTIS (1964), MCGEE y CLUTTER (1967), BAILEY y CLUTTER (1974), GOLDEN y otros (1981), etcétera.

2.2.1.3. Método de las curvas naturales

De acuerdo con CAJANDER (1926), las curvas pioneras de HUBER fueron curvas naturales de índice de sitio. BULL (1931) las introdujo en Estados Unidos y su principio está bien ilustrado en las curvas de índice de sitio para plantaciones de *Pinus resinosa* en Conecticut. En dicho trabajo se describe el curso actual del crecimiento en altura para cada árbol muestreado por medición de la altura en cada verticilo. Los datos de altura-edad para todos los árboles en una clase de índice de sitio simple son elaborados para formar una curva de índice de

sitio para esa clase. Ninguna curva depende de datos de otra clase de calidad.

El mismo principio ha sido desarrollado donde el conteo de verticilos no es posible. Los datos básicos son el conteo de anillos medidos a intervalos a lo largo del tronco del árbol apeado. Esto recibe el nombre de *análisis de tronco*.

El polimorfismo de las curvas de índice de sitio ha dado origen a este método, que se basa en seguir la evolución de la altura con la edad en cada parcela con la mayor exactitud posible por medio de alguno de los siguientes procedimientos:

- Midiendo la altura todos los años durante un turno, o cada 5-10 años. Este procedimiento es lento y supone parcelas fijas.
- Análisis de tronco de un reducido número de árboles dominantes.
- Distancia o longitud de los verticilos (crecimiento en altura de cada año).
- Combinación de procedimientos.

El método consiste en hallar la curva natural media para cada calidad y representarlas gráficamente. Luego se clasifican las calidades por el valor de h_t a la edad típica.

2.2.2. Métodos numéricos

La forma de las curvas definidas por fórmulas matemáticas tienen varias ventajas sobre las curvas obtenidas gráficamente:

- A través de ellas se obtienen parámetros que pueden estar relacionados con la competencia, hábitat u otros factores que puedan influir en las curvas.
- El cálculo mediante ordenadores permite análisis eficientes para mayor cantidad de información.

Sin embargo, los métodos numéricos serán más precisos que los gráficos, sólo en la medida en que el modelo de crecimiento en altura describa adecuadamente la variación de la altura en función de la edad en cada situación particular y que los supuestos estadísticos usados en el ajuste de los parámetros del modelo sean válidos.

En general, los métodos matemáticos pueden ser agrupados del siguiente modo:

Métodos matemáticos	Datos de parcelas temporales	Curvas proporcionales. Método del mín.-máx.
	Datos de parcelas permanentes	Regresión jerárquica sin I. S. Regresión múltiple con I. S. <i>a priori</i> .

y estos cuatro métodos pueden referirse a un modelo simple de altura, como la ecuación de SCHUMACHER, por ejemplo, o cualquier otra de las que se verán más adelante (ALDER, 1980).

- A) Curvas proporcionales: Se basa en que en cada clase de edad todos los sitios tienen igual probabilidad de estar representados. Se ajusta una ecuación al conjunto global de datos de las parcelas de muestreo por regresión lineal. Esto da la tendencia de crecimiento de la altura media, asumiendo que en cada clase de edad todas las estaciones tienen igual probabilidad de estar representadas. Una vez que la curva de crecimiento ha sido ajustada, pueden trazarse curvas de la misma forma que pasen por diferentes valores del índice de sitio.
- B) Mínimo-máximo: Es más flexible que el método anterior pero requiere un mínimo de observaciones múltiples en cada clase de edad (mínimo tres). El procedimiento es el siguiente:
- En cada clase de edad se calcula la media de H_0 para todas las parcelas y los valores máximos y mínimos de H_0 .
 - Se ajustan tres regresiones diferentes a cada conjunto de observaciones para los valores medios, máximos y mínimos, respectivamente.
 - Los coeficientes de cada una de las tres curvas pueden ser armonizados para obtener una sola ecuación. En caso de tener muchos datos, en *cada clase de edad* se justifica una variante más compleja en que las observaciones se ordenan de mayor a menor y cada punto se asigna a una clase de sitio S de acuerdo a:

$$S = (i-1/2)/n$$

donde i es la posición de la parcela después de la ordenación y n es el número de parcelas en la clase de edad. Una vez hecho esto, se puede hacer un análisis de regresión múltiple.

Como en la práctica es difícil que existan datos suficientes en cada clase de edad y que cada calidad de estación se encuentre bien representada en cada una de estas clases, se trabaja más frecuentemente con parcelas permanentes, o bien, análisis de tronco.

- C) Métodos de regresión jerárquica: Estos métodos son de dos tipos. Uno de ellos utiliza variables condicionales (o variables 0-1). Este método, según la revisión bibliográfica hecha, no ha sido utilizado en la construcción de curvas de índice de sitio, pero el enfoque es realizable. El otro método, descrito por primera vez por BAILEY y CLUTTER (1974), implica el uso de estimadores de pendientes (o coeficientes de regresión) común y de término independiente común a partir de la matriz de covarianza.
- D) Métodos de regresión múltiple: Esto puede utilizarse cuando el índice de sitio o clase de sitio puede ser determinado *a priori*. Una vez determinado esto, se tendrán tres variables por observación:
- Altura dominante: H_0
 - Edad: A
 - Clase o índice de sitio: S

La regresión múltiple puede usarse para ajustar un modelo que relacione H_0 , A y S usando diferentes transformaciones. Se han utilizado dos tipos de modelos:

- i) Modelos con restricciones: para usarlos con curvas de índice de sitio en las cuales la altura se expresa en relación al índice de sitio y la edad en relación a la edad índice A_i . La regresión ajustada no tendrá término independiente. Este tipo de modelo está forzado a dar una altura dominante H_0 igual al índice de sitio cuando la edad es igual a la edad típica A_i . El modelo siguiente constituye un ejemplo:

$$(H_0 - S) = b_1(A - A_i) + b_2(A - A_i)^2$$

- ii) Modelos irrestrictos con término independien-

te: cuando se usa el índice de sitio, más bien la clase de sitio, las curvas deben ser condicionadas después del ajuste para asegurar que la altura dominante corresponde al índice de sitio en la edad índice.

Las ecuaciones más usadas han sido las sigmoideas y se han desarrollado aquellas que permiten una mayor flexibilidad en el ajuste de los datos disponibles.

Algunas ecuaciones que se han usado y posteriormente han dado origen a curvas modificadas son:

SCHUMACHER (1939):

$$H_i = H_{max} \exp(b/A^i)$$

donde

H_i : altura dominante;

H_{max} : parámetro a ser ajustado y que representa la máxima altura que la especie podría alcanzar;

b, K : parámetros de la ecuación;

A : edad del rodal.

Esta ecuación ha sido usada para expresar el componente edad en la altura, en estudios de suelo-sitio.

MEYER (1940):

$$H = 4.5 + a\{1 - \exp(-bD)\}$$

donde

H : altura total;

D : diámetro a 1,3 m;

a : parámetro de la ecuación que representa la máxima altura y corresponde a la asíntota de la curva. Está estrechamente relacionada a la estación;

b : parámetro relacionado a la especie.

Esta ecuación fue usada posteriormente por McLINTONCK y BICKFORD (1957) para desarrollar una clasificación de sitio basándose en el diámetro para abeto rojo. También ha sido usada por STOUT y SHUMWAY (1982) para clasificación de sitio en seis especies forestales, obteniéndose buenos resultados, y por ORTEGA y MONTERO (1988) en pino silvestre, con resultados poco satisfactorios.

LUNDQVIST (1957) utilizó una función para ajustar curvas de altura a partir de mediciones de in-

cremento en altura para rodales de pino y abeto, de la siguiente forma:

$$H = a \exp(-b/A^i)$$

con el incremento de altura dado por:

$$I = [cba \exp(-b/A^i)]/A^{i+1}$$

donde

H : altura total;

A : edad;

a, b, c : parámetros de la ecuación.

La curva sigmoidea de altura puede ser estimada a partir de una regresión lineal del logaritmo del porcentaje de crecimiento en altura sobre el $\log$ de la edad. El punto de inflexión de la altura sobre la edad, del máximo incremento anual en altura es:

$$A_i = \{cb/(c+1)\}$$

La expresión de LUNDKVIST está muy relacionada con la de SCHUMACHER, la cual, expresada en las mismas variables, sería:

$$\ln(1/H) = \ln b - 2 \ln A$$

$$H = a \exp(-b/A)$$

A partir de entonces se han desarrollado numerosas fórmulas matemáticas para curvas anamórficas y polimórficas.

En dichas fórmulas, el denominador común es la transformación generalizada de H por $\log H$ y de A por $1/A$; es decir, se usa la fórmula original de SCHUMACHER (BURKHART y STRUB, 1974; BURKHART *et al.*, 1972; COILE y SCHUMACHER, 1964; LENHART, 1972 a, b , y otros).

2.2.2.1. Curvas anamórficas

Las curvas anamórficas o proporcionales de índices de sitio están basadas en el supuesto de que $\log(H)$ es una función lineal de $(1/A)$. Si hay datos disponibles de altura-edad para m sitios (o parcelas), el sistema anamórfico resulta del ajuste:

$$\log H = a + b(1/A)^i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

donde

a : parámetro específico del i -ésimo sitio;

b : parámetro de pendiente de la regresión;

c : parámetro de linearización (frecuentemente $c = +1$).

Este modelo genera un sistema de curvas proporcionales de índice de sitio con una tasa relativa de crecimiento constante $(dH/dA)/H$ a lo largo de todos los sitios a una edad dada.

Algunos de los modelos utilizados han sido los de FEDUCCIA *et al.* (1979), SMALLEY y BAILEY (1974), quienes desarrollan sistemas anamórficos de curvas empleando la regresión antes mencionada.

2.2.2.2. Curvas polimórficas

Partiendo de la relación anterior, para obtener un sistema polimórfico, reescribiremos

$$\log H = a + b_i(1/A)^c \quad i = 1, 2, \dots, m$$

donde

b_i : parámetro específico del sitio;
 $(dH/dA)/H$: indica que la tasa relativa de crecimiento es una función de la edad y del sitio (BAILEY y CLUTTER, 1974).

LENHART y CLUTTER (1971) aplicaron curvas polimórficas con el siguiente modelo:

$$\log H = 1.5469 - 11.406/A + (0.76481 \log SI - 0.83419)$$

2.2.2.2.1. Segmentos

Revisando varios modelos de índices de sitio, se observa que algunos se ajustan mejor a edades inferiores, en tanto que otros lo hacen mejor a edades superiores. A partir de estas consideraciones se comenzó a usar la regresión polinómica segmentada (GALLANT y FULLER, 1973; FULLER, 1969), para desarrollar un sistema de ecuaciones donde cada ecuación podría ser usada sobre un «dominio de la edad» dado.

El ajuste de las curvas combinadas de sitio es mejor que un modelo simple a lo largo del rango completo de edades, y tiene las siguientes propiedades:

- La altura es 0 cuando la edad es 0.
- La altura a la edad típica iguala al índice de sitio (pasa a través del índice de sitio a la edad crítica).
- Cada curva tiene su asíntota superior separada.
- Las curvas son invariantes con respecto a la

edad crítica (la misma edad crítica para todas las curvas).

En general, se ha trabajado con curvas anamórficas para edades menores y polimórficas para edades superiores.

La forma general del modelo es:

$$\begin{aligned} Y_1 &= f_1(x) & 0 \leq x \leq a_1 \\ Y_2 &= f_2(x) & a_1 \leq x \leq a_2 \\ Y_n &= f_n(x) & a_{n+1} \leq x \leq \infty \end{aligned}$$

donde $f_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, n$ es una función polinómica de x sobre el i -ésimo segmento. Las ecuaciones se unen en los puntos $a_1, a_2, \dots, a_n$ mediante restricciones implícitas en el modelo. FULLER (*op. cit.*) discutía la estimación de los parámetros de f_i con puntos fijos de unión y GALLANT y FULLER (*op. cit.*) cubrieron la estimación de los puntos de unión a partir de los datos.

Los requisitos del modelo de incremento son que la solución debe ser cerrada, como una ecuación diferencial, y ser polinomial. Estos requisitos del modelo de incremento en altura vienen expresados en su forma general por:

$$dy/dx = b_0 + b_1 y + g(x)$$

donde

dy/dx : tasa de crecimiento instantánea (estimada como una diferencia finita);
 b_0, b_1 : parámetros estimados por técnicas de regresión;
 y : altura de los árboles a la cual ocurre dy/dx ;
 $g(x)$: función polinomial de la edad a la cual ocurre dy/dx .

Para obtener una curva suave total de altura, la ecuación de incremento en altura debe ser continua en los puntos de unión. Esto se puede lograr usando las constantes de integración de segmentos adyacentes, para asegurar igual altura en el punto de unión (DEVAN y BURKHART, 1982).

2.2.2.2.2. Derivadas

Este método consiste en modelar la tasa de crecimiento en altura directamente mediante el ajuste de un modelo de incremento de altura a los datos obtenidos por remediciones o análisis de tronco (LENHART, 1970; DEVAN y BURKHART, *op. cit.*).

Tal modelo, normalmente una ecuación diferencial, es ajustado directamente a partir de los datos observados de incremento de altura y luego integrado sobre la edad para obtener la altura como una función de la edad.

Este método se basa en dos supuestos:

- A partir de altura y edad de sucesivas mediciones, el promedio de dos mediciones es asumido como una aproximación por las finitas diferencias.
- Si H_i es la altura y A_i es la edad, ambas al tiempo i , entonces la expresión:

$$d(\ln H)/d(1/A) = (\ln H_i - \ln H_{i-1}) / (1/A_i - 1/A_{i-1})$$

se usa como una aproximación a la derivada. Gráficamente se expresa en la Figura 3.

2.2.2.2.3. Funciones de crecimiento

Las dos principales características de las curvas de crecimiento, en general, son:

- Cuando la edad se aproxima a infinito son asintóticas a la recta $W=A$.
- Existe un punto de inflexión en la curva correspondiente a una determinada edad que varía según la especie y dentro de la especie con la calidad de la estación. Esto indica que el crecimiento corriente anual es creciente hasta dicha edad; culmina, es decir, alcanza su máximo en ella, y luego decrece hasta que nuevamente se acerca a «0», lo que se logra en la plena madurez, o hasta que el árbol o la masa mueren.

Si un modelo cumple con estos dos principios generales, dicho modelo es satisfactoriamente preciso.

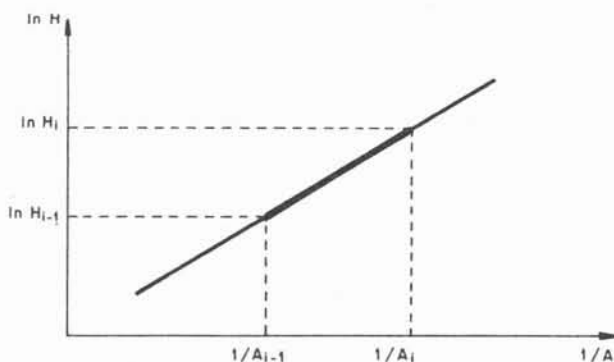


Fig. 3. Aproximación a una derivada entre dos mediciones sucesivas.

Se ha establecido que la función general de crecimiento desarrollada por RICHARDS (1959) es la más adecuada para la construcción de un sistema de curvas de índice de sitio mediante funciones de crecimiento.

BRICKELL (1968), LUNDGREN y DOLID (1970), BECK (1971), HAGGLUND (1972), RAWAT (1973), y otros, han utilizado satisfactoriamente dicha función en la construcción de curvas de calidad, aunque la metodología utilizada es diferente según los autores.

Un método adecuado es el de MARQUARDT (1963), que se puede utilizar para cualquier caso de regresión no lineal asintótica. Otro método es el de STEVENS (1951), que parece ser el más apropiado para el caso forestal puesto que fue desarrollado especialmente para la función general de crecimiento de RICHARDS.

La función desarrollada por RICHARDS es una aplicación del trabajo de BERTALANFFY (1951) y se ha utilizado muy frecuentemente en biometría.

La función generalizada desarrollada por RICHARDS (*op. cit.*) es la siguiente:

Función de crecimiento corriente:

$$dW/dT = nW^m - KW$$

Función de crecimiento:

$$W = A(1 - b \exp(-kt))^{1/(1-m)}$$

donde

- W : tamaño o valor de la magnitud a la edad T ;
 A : valor límite de dicha magnitud;
 A, b, K y m : son los parámetros de crecimiento en la función.

Esta función es, además, una ampliación de otras funciones ampliamente conocidas:

- Función monomolecular de crecimiento que se obtiene cuando $m=0$. No tiene punto de inflexión y su tasa de crecimiento declina linealmente cuando se incrementa W . Es usada para representar las últimas porciones de la vida de un individuo.

$$W = A(1 - b \exp(-kt))$$

cuya tasa de crecimiento es $k(A - W)$

- Función autocatalítica de crecimiento (conocida también como función logística), que se ob-

tiene en el caso de que $m=2$ y es simétrica con respecto a su punto de inflexión.

Su tasa relativa de crecimiento declina linealmente cuando se incrementa W .

$$W = A/(1 - b \exp(-kt))$$

cuya tasa de crecimiento es $KW(A-W)/A$

- Cuando m tiende a 1, se obtiene la función de GOMPERTZ, que reemplaza a la función autocatalítica en algunos casos, pero es asimétrica.

$$W = A \exp(-b \exp(-kt))$$

cuya tasa de crecimiento es $KW/\ln(A/W)$

2.2.2.2.4. Ecuaciones diferenciales

Otra forma de modelar la evolución de la altura en función de la edad es mediante el uso de ecuaciones diferenciales. El modelo presenta la forma:

$$dH(t) = b\{a - H(t)\}dt + \sigma(t)dw(t)$$

con la condición inicial:

$$H(t_0) = H_0 + \varepsilon_0$$

donde

- H : altura total;
- t : edad;
- w : proceso estandarizado de WIE-
NER representando la «variación
ambiental»;
- ε_0 : variable aleatoria de distribución
normal;
- $a, b, c, t_0, H_0, \sigma$: parámetros a ser estimados.

además, se asume que hay errores de medición en las alturas medidas, b , que satisfacen:

$$b = H + \sigma_m \varepsilon$$

donde

- ε : variable normal estándar independiente;
- σ_m : parámetro a ser estimado.

La integración de la ecuación diferencial da:

$$H = a\{1 - (1 - H_0/a)\exp(-b(t - t_0))\}^{1/c} + \mu(t)$$

donde $\mu(t)$ es un término de error aleatorio con una distribución dependiente de los parámetros.

El modelo se aplica a una parcela o rodal particu-

lar. Alguno de los 8 parámetros ($a, b, c, t_0, H_0, \sigma, \sigma_m$ ó σ_0) puede ser diferente para los diferentes rodales, reflejando la variación en la calidad de la estación. Un modelo para una región o un bosque debe especificar cómo difieren los parámetros entre rodales. En una versión particular del modelo, los parámetros pueden ser fijos a valores dados, pueden ser condicionados a tener el mismo valor para todas las parcelas (valor no especificado) o pueden ser libres de tomar diferentes valores para diferentes parcelas. También es posible tener relaciones entre los 8 parámetros básicos fijos o condicionados a un mismo valor. Esto se hace definiendo nuevos parámetros secundarios que están en función de los originales.

Una versión se especifica clasificando sus parámetros en:

- Fijos: valor dado.
- Globales: igual valor para todas las parcelas.
- Locales: libre.

Una vez definidos los parámetros, se calcula la función de máxima verosimilitud para el modelo y se buscan los parámetros que maximizan la función. Específicamente, se puede usar el método de Newton modificado, que minimiza $-2 \ln L$, donde L es la función de verosimilitud.

Es necesaria una buena estimación inicial de los parámetros para ahorrar tiempo y reducir el riesgo de no convergencia o mínima local (GARCÍA, 1980, 1983, 1984).

2.3. Intercepción

Este método se basa en la medición del crecimiento en altura durante una cierta fase de desarrollo del árbol a partir de cierta altura inicial, variable según los diferentes estudios llevados a cabo, y es especialmente útil en masas jóvenes en que la medición de la altura dominante presenta serias dificultades lo que se traduce en errores en la determinación del índice de sitio.

Algunos investigadores (WAKELEY, 1954; WAKELEY y MARRERO, 1958, y otros) han destacado los siguientes aspectos:

- Antes de que el rodal alcance la altura del pecho, el desarrollo en altura es frecuentemente

alterado por diversos factores y, por tanto, no es un buen indicador de la productividad de la estación.

- Las tradicionales curvas de índice de sitio frecuentemente tienen errores en los rodales jóvenes debido a que la altura de los árboles de dicho rodal aún se encuentra bajo la influencia de la densidad inicial, plantación, etcétera.
- Cuando las curvas de índice de sitio son usadas en rodales jóvenes, errores pequeños en la determinación de la edad provocan grandes errores en el índice de sitio.

BULL (1931) investigó en la utilización de este método y utilizó el número de verticilos entre dos alturas predeterminadas, 1 y 4,5 m, como un indicador de la productividad. Sin embargo, llegó a la conclusión de que este indicador no era preciso.

Por otra parte, los investigadores antes mencionados (WAKELEY y MARRERO, 1958) han usado el crecimiento en altura de cinco años, que toma la longitud total de los cinco años de crecimiento en altura a partir de la altura al pecho (1,3 m).

Debido a que el método de la intercepción no necesita determinación de edades, se evitarían los problemas antes mencionados.

El método es, por supuesto, limitado a especies con un patrón regular de crecimiento en altura y tiene las desventajas de que se ve afectado por las fluctuaciones climáticas a corto plazo y de que no distingue entre los sitios en los cuales la tasa inicial de crecimiento no se corresponde con las tasas posteriores.

En algunos estudios el índice de sitio está dado por:

$$SI = a + b \text{ (intercepción)}$$

donde a y b son parámetros de la regresión lineal.

Sin embargo, DAY, BEY y RUDOLPH (1960) determinaron que una polinomial de segundo grado daba un mejor ajuste que una recta.

Con el objetivo de obtener una mayor precisión, RICHARDS, MORROW y STONE (1962) calcularon distintas funciones del tipo $IS = a + b$ (intercepción) para diferentes tipos de suelo, pero no encontraron diferencias significativas entre ellas. Por otra parte, WARRACK y FRASER (1955) y BECK (1971)

compararon intercepción a 3 y 5 años, y ambos estudios concluyeron que los 5 años daban una estimación superior. OLIVER (1972) probó con 1, 2, 3, 4, 5 y 6 años para *Pinus* sp. y encontró que a la altura de 4 años se producía un rápido incremento que luego comenzaba a disminuir, por lo que recomendó los 4 años.

Por otra parte, ALBAN (1972), BLYTH (1974) y HAGGLUND (1976) probaron diferentes alturas iniciales para medir la intercepción. En las investigaciones de ALBAN (*op. cit.*) y HAGGLUND (*op. cit.*) la mejor altura inicial fue sobre los 2,5 m. Por su parte, BLYTH (*op. cit.*) encontró que la mejor altura inicial era de 3 m como mínimo.

En la siguiente Figura 4 se observan las diferentes mediciones que se deben realizar.

Una variación de este método es el de las curvas polimórficas de STAGE (1963), que se basa en la intercepción que representa el crecimiento a lo largo de diez años después de que el árbol dominante alcanzó una cierta altura. La racionalización de éste es similar a la del método de intercepción anterior; es decir, que la calidad de la estación es función de la tasa de crecimiento de un árbol de una cierta al-

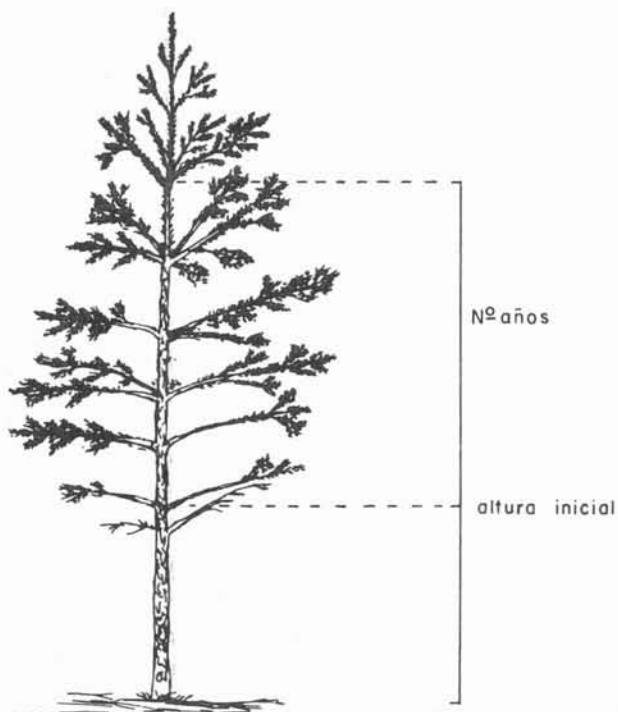


Fig. 4. Mediciones a realizar en el método de intercepción.

tura; sin embargo, se supone que la tasa de crecimiento es la porción superior de la curva de altura/edad es un mejor indicador de la capacidad del sitio que la altura en una edad particular. De acuerdo con este método, el índice de sitio se puede redefinir como «clasificación de los sitios según el incremento que alcanza un árbol dominante de altura estándar». Este método se diseñó para *Abies grandis*, que es una especie tolerante y constituye una forma de analizar la dinámica de los rodales de edad no uniforme, así como la de otros rodales en los cuales prevalece la saturación.

2.4. Método basado en el diámetro

Basado en que el objetivo de los índices de sitio es el de medir la productividad de una estación dada, JONES (1969) critica la relación altura/edad debido a que la altura es sólo un componente de la producción en volumen y dicha relación no explica totalmente la productividad de la estación.

MADER (1976) ha revisado la última crítica con mayor detalle. CARMEAN (1975) también ha examinado este problema asociado con estimaciones dadas de la productividad potencial del sitio.

El crecimiento en diámetro, el otro componente del incremento en volumen, es considerado más sensible que el crecimiento en altura a las variaciones de los factores ambientales; sin embargo, su uso ha sido bastante moderado debido a su dependencia de la densidad del rodal.

Interpretaciones más recientes (DREW y FLEWELLING 1977) de los estudios de producción/densidad sugieren que la productividad por unidad de área, independientemente de la densidad inicial y del régimen de claras, tiende a converger en el tiempo.

STOUT y SHUMWAY (1982) establecieron una metodología basada en la ley de rendimientos decrecientes postulada por DAVID RICARDO (1772-1823), la cual fue validada para cultivos agrícolas por JUSTUS V. LIEBIG (1874-1956) y que establece que la productividad se aproxima a un límite y que, por tanto, el incremento de dicha productividad tiende a «0». La ley del efecto de los factores limitantes postulada por A. MISTERLICH en 1940 es una versión de la ley anterior diseñada para aplicaciones prácticas, donde:

$$dy/dx = K(Y_{\max} - Y)$$

la respuesta (dy) de un factor limitante (dx) es proporcional (K) a la diferencia entre los valores máximos ($Y_{\max}$) y actuales (Y). En la medida de que Y se aproxima a $Y_{\max}$, la tasa decrecerá proporcionalmente.

Si x representa el tiempo, Y será una función de crecimiento, pero al mismo tiempo representa una formulación de la hipótesis general de crecimiento por la cual el incremento es dependiente de la diferencia entre el tamaño actual y el final.

En el caso de una masa forestal, debido a que el de dosel debe soportar un gran volumen de ramas y fustes en la etapa de madurez, como H crece hasta un límite metabólico, se puede esperar que a medida que el árbol se acerca a su madurez disminuye el incremento del crecimiento de la altura con respecto al diámetro, hasta que dicho incremento se aproxima a «0», lo que nos lleva a formular la ley de MISTERLICH en los siguientes términos:

$$db/dD = -b(S-H)$$

es decir, un incremento en el diámetro (D) supondrá un incremento en altura (H) proporcional a su potencial remanente (PRODAN, 1968), el cual, a su vez, está determinado por la calidad de la estación, por lo que la relación proporcional entre altura y diámetro es usada para estimar la calidad de la estación de forma independiente de la edad. La obtención de curvas de calidad de estación sin implicar a la edad permite, por una parte, eliminar el problema de la elección de la edad típica, y, por otra, el que en el momento de la determinación de las curvas altura/edad no suelen estar presentes todas las clases de edad.

MEYER (1940) sugirió el siguiente modelo para un caso forestal:

$$Y = 1,3 + S(1 - \exp bD)$$

donde

- H : altura total;
- D : diámetro a 1,3 m;
- S : coeficiente del sitio (asíntota superior);
- b : coeficiente relacionado a la especie;
- 1,3: corrección para la medición de altura a 1,3 m.

STOUT y SHUMWAY (1982) para cada especie agruparon los datos de cada árbol en clases de sitio. A cada grupo se le aplicó un análisis de regresión no

lineal de mínimos cuadrados basado en la ecuación de MEYER. A partir de los coeficientes obtenidos, b y S , se establecieron dos conjuntos de hipótesis nulas y los resultados son los siguientes:

Los coeficientes por especie, b , no fueron significativamente diferentes entre clases de sitio cada 3 metros. Sin embargo, la hipótesis nula de S igual para cada clase de sitio fue rechazada. El tamaño de S incrementa cuando aumenta el valor del índice de sitio; sin embargo, en una aplicación de este método en España (ORTEGA y MONTERO, 1988), se concluyó que los ajustes daban mejores resultados tanto con b como con S diferentes.

2.5. Fuente de errores

La precisión del Índice de Sitio estimado es una importante medición de la utilidad de un método particular de estimación del Índice de Sitio. Algunos factores contribuyen a esta precisión, por ejemplo:

- Error de muestreo: El I. S. es frecuentemente estimado a partir de un muestreo de parcelas que se generaliza al rodal. Este rodal es usado como un indicador de la productividad del sitio y puede ser considerado como una muestra para todos los posibles rodales cumpliendo ciertas especificaciones.
- Errores aleatorios o sistemáticos en la elección de árboles de altura dominante dentro de las parcelas.
- Diferencias aleatorias o sistemáticas entre el desarrollo de la actual altura dominante y las curvas de I. S. Los errores sistemáticos pueden, por ejemplo, ser causados por el uso de expresiones analíticas inadecuadas para las funciones que fundamentan las curvas. Un error aleatorio puede ser, por ejemplo, variación de las condiciones hídricas entre años (HAGGLUND, 1981).

Algunas de las fuentes de errores sistemáticos fueron discutidas por BECK y TROUSDELL (1973). Ellos hacen notar el riesgo evidente de sesgo cuando se usan datos de parcelas temporales para la construcción de curvas de I. S. Una importante razón para este sesgo es que la distribución de I. S. es distinta para distintas edades. Esto ocurre porque las rotaciones son más cortas en los mejores sitios.

MCQUILKIN (1974) demuestra que muy pequeñas diferencias en edad (10-15 años) entre árboles usados para establecer el I. S. en el mismo rodal tienen un efecto significativo en los valores del índice y propone algunas reglas para manejar situaciones en que hay pequeñas diferencias entre árboles en un rodal.

LLOYD (1975) presenta un profundo análisis de la varianza de un estimador de I. S. comenzando por el concepto de que el I. S. es una variable aleatoria definida de forma general pero exacta. Este autor expresa el desarrollo en altura de un árbol como una ecuación cúbica en edad. A partir de esta ecuación deduce la varianza de un I. S. estimado y también la probabilidad de clasificar en forma errónea las parcelas cuando se asume un cierto rango en las clases de I. S.

Por otra parte, en las curvas convencionales de Índice de Sitio se asume que los datos de las parcelas de muestreo representan una distribución normal de la calidad del sitio dentro de cada clase de edad. Es posible, sin embargo, que la curva media de cada sitio usada en el cálculo de las curvas para sitios buenos y pobres esté sesgada si ciertas clases de edad contienen preponderancia de parcelas en sitios buenos o, por el contrario, pobres. Es decir, la curva media del sitio puede no ser aplicable a ciertas clases de sitio, localidades o tipos de suelo que no fueron adecuadamente representados por los datos de la parcela de muestreo (CARMEAN, 1956).

Se han realizado estudios de suelo/sitio que han producido métodos para ser usados en la construcción de las curvas de I. S. Estas curvas son estadísticamente independientes de los factores ambientales relacionados con el crecimiento en altura de los árboles dominantes y codominantes y está más cercana a la expresión verdadera que existe entre altura y edad de los árboles. El estudio consiste en ecuaciones de regresión múltiple que expresan la altura total de los árboles dominantes en términos de la edad y factores asociados al suelo, precipitación y topografía, para cada grupo de suelo.

Resultados de este análisis demuestran que la altura total de los árboles está relacionada con la edad total de los árboles para todos los grupos de suelo y que la altura de los árboles también está relacionada con la precipitación, altitud y ciertas condiciones del suelo.

Para cada tipo de suelo se obtienen coeficientes de regresión de la variable edad, independiente del efecto de los factores del suelo, precipitación y altitud. Estos coeficientes se usan en la siguiente ecuación para calcular la curva adecuada de cada sitio:

$$\log H = \log SI + b_1(1/x_1 - 0,01)$$

donde

$\log H$: log de la altura total de los árboles dominantes;

$\log SI$: log del índice de sitio;

b_1 : coeficiente de la variable edad;

x_1 : edad total, en años.

En todo caso, se podrá evitar caer en errores en un alto porcentaje evitando las extrapolaciones, debido a que aún no se ha desarrollado ningún método que las permita y por otra parte con un gran conocimiento del problema a resolver; es decir, utilizar aquellos modelos que estadísticamente comparados con la realidad prueban ser los más apropiados.

3. CALIDAD DE LA ESTACION EN FUNCION DE LA VEGETACION

La presencia, abundancia y tamaño relativo de las diversas especies en el bosque reflejan la naturaleza del ecosistema del cual forman parte y a partir de esto sirven como indicadores de la calidad de la estación.

La correlación puede o no ser aparente debido a que la vegetación también refleja los efectos de la presencia competencia vegetal, sucesos pasados en la historia de la vegetación tales como sequía, incendios y ataque de insectos, y muchos otros factores. En todo caso, las características de la estación se reflejan lo suficiente en la vegetación como para utilizarla con éxito en muchos casos.

Tanto las especies arbóreas como las del sotobosque sirven para este propósito. Las especies arbóreas tienen la ventaja de tener vida prolongada, se identifican fácilmente en todas las estaciones del año y algunas especies tienen una amplitud ecológica tan estrecha que su presencia es indicativa de una localización particular, aunque la mayor parte de los árboles tienen una amplia adaptación ecológica, de tal manera que su presencia tiene así un

menor valor como indicador, pero su abundancia y su tamaño relativo son útiles para este fin.

Por otra parte, las especies vegetales en el sotobosque, aunque son más propensas a estar influidas por la densidad, la historia pasada y la composición del bosque en mayor medida que las especies arbóreas, tienen, en muchos casos, una tolerancia ecológica más restringida y pueden, por tanto, ser más útiles como indicadores vegetales.

Sin embargo, cabe recordar que la variación de la localización toma frecuentemente la forma de un gradiente más que de clases de estación distinta y mutuamente excluyentes. Los cambios tienden a ser graduales y el continuum se puede describir mejor en términos de un gradiente ecológico.

El enfoque vegetacional puede ser de clasificación u ordinal.

3.1. Clasificación

MALSTROM (1949) cita dos trabajos finlandeses (PAT, 1862; NORRLIN, 1871) en los cuales el ecosistema forestal fue clasificado de acuerdo con la vegetación pero con la consideración explícita del hábitat.

Sin embargo, el trabajo que ha recibido una mayor atención ha sido el de CAJANDER (1909, 1926), quien subdividió el hábitat forestal de Finlandia en un completo conjunto de tipos de sitio definidos por la vegetación baja (sotobosque) clímax utilizando el concepto de policlímax. El criterio usado fue el de similitudes ambientales (CAJANDER, 1926; KALELA, 1960) y se asumió que para el propósito forestal todos los hábitats que caen dentro de un tipo de sitio pueden ser considerados uniformes. Por medio de estudios de crecimiento se desarrollaron tablas de producción para los diferentes «tipos de sitio» (ILVESSALO, 1927, 1937; CARBONIER, 1954). Además, estos «tipos de sitio» han proporcionado un marco de referencia válido para investigadores y silvicultores durante muchos años.

COILE (1938), un defensor del suelo como característica a utilizar en la evaluación del sitio, cuestionó si la vegetación clímax podría ser reconocida después de severos disturbios y de fuertes intervenciones selvícolas y si el sotobosque de arraigamiento superficial podría reflejar las características del

suelo más profundo con que se encuentran las raíces de los árboles.

Por otra parte, IILVESSALO admite que puede haber errores en la asignación de sitios, pero que dichos errores normalmente se producen en los umbrales de las clasificaciones.

Sistemas operacionales de *tipos de sitio* han sido desarrollados y probados en Suecia (ENEROTH, 1931; MALSTROM, 1949; ARNBORG, 1953). Sin embargo, el índice de sitio permanece como la manera estándar de estimación de la productividad. Los *tipos de sitio* son usados sólo como un marco de referencia para prescripciones selvícolas. La conclusión de la experiencia en Suecia ha sido de que los *tipos de sitio* incluyen demasiada variabilidad. MALSTROM (*op. cit.*) y ARNBORG (1960) sugerían que el crecimiento del árbol es más sensible que la composición de la vegetación a diferencias de altitud, orientación, pendiente y tratamientos pasados.

En Canadá y Estados Unidos se han realizado clasificaciones del hábitat en función de la vegetación. Específicamente en los Estados Unidos, DAUBENMIRE (1952), DAUBENMIRE y DAUBENMIRE (1968), LAYSER (1974) y PFISTER y ARNO (1980) han presentado métodos para la clasificación de hábitats definidos por diversas asociaciones de plantas. El tipo de hábitat expresa el potencial clímax de la vegetación.

MACLEAN y BOLSINGER (1973) aplicaron el método Angloamericano Clements para la descripción de la vegetación. Estos investigadores expresan el índice de sitio como una función de la ocurrencia de un número de plantas indicadoras en que cada especie representa una variable y no hay agrupación de estas especies.

3.2. Ordinación

GLEASON (1926, 1939) cuestionó la realidad de las «asociaciones de plantas» y consideró la composición de la vegetación como una respuesta a variaciones ambientales e históricas. Por su parte, CURTIS y colaboradores desde 1951 han demostrado que la vegetación es un continuo, aunque los segmentos de tal continuo estén geográficamente disjuntos.

GOODAL (1953 a, b; 1954) propuso el término «ordinación» para el arreglo de la vegetación a lo

largo de ejes, «ordenada» en función de alguna otra variable. Por ejemplo, WIEDEMANN (1929, cit., por BAKUZIS) arregló los «tipos de sitio» finlandeses en función de gradientes teóricos de humedad y nutrientes. En este mismo sentido se ha trabajado, principalmente en Suecia (MALSTROM, 1949; ARNBORG, 1953) y Estados Unidos (SPURR, 1982).

En general, el concepto de ordinación implica que la vegetación se estudia en combinación con otras características, tales como humedad, nutrientes, luz, calor, radiación solar, potasio intercambiable, porcentaje de arcilla, etcétera, pero es necesario un gran conocimiento de la ecología regional de la vegetación para la determinación de los gradientes.

Este concepto también es conocido como «espectro indicador», referido a una lista de plantas (árboles, arbustos y hierbas) clasificados de forma teórica, de acuerdo a ciertos sitios. Por ejemplo, puede comenzar con sitio seco-infértil y terminar con sitio húmedo-fértil, luego en el campo se comprueba cómo está presente el indicador vegetal (si es común o abundante) y a qué calidad de sitio corresponde.

Un refinamiento de la técnica de espectros es agrupar las plantas con exigencias ecológicas similares y utilizar los grupos para distinguir diferentes estaciones.

En los bosques de coníferas no perturbados de las Montañas Rocosas del norte de los Estados Unidos, DAUBENMIRE (1952) y DAUBENMIRE y DAUBENMIRE (1968) utilizaron grupos de especies del sotobosque denominados «uniones subordinadas» en combinación con las especies de la masa arbórea de último establecimiento (uniones dominantes) para distinguir las asociaciones forestales. El área colectiva de una asociación forestal dada, el tipo de hábitat (el tipo de vegetación clímax sobre un hábitat o localización dada), indica condiciones similares del medio ambiente y bióticas, es decir, un ecosistema. Las uniones del sotobosque están compuestas por una a 25 especies. Los tipos de hábitat diferentes se distinguen por las combinaciones específicas de las uniones de la masa arbórea y el sotobosque. En algunos casos, la unión de la masa arbórea es el determinante principal del tipo de hábitat, mientras que en otras situaciones la unión del sotobosque es más importante.

Por ejemplo, las curvas polimórficas del índice de

sitio del pino ponderosa en siete tipos de hábitats indican que los ecosistemas delimitados por la vegetación tienen una calidad de estación sustancialmente diferente (DAUBENMIRE, 1961).

4. FACTORES DEL SUELO Y TOPOGRAFICOS

La determinación de la calidad de la estación en relación a la topografía y el suelo ha sido de gran interés en regiones o áreas que presentan estas características altamente variables y para aquellas áreas que no están muy pobladas, cubiertas con especies no deseadas o con árboles inapropiados para los datos del índice de sitio (SPURR y BARNES, 1982).

Los estudios de la relación suelo-sitio requieren la medición o estimación de muchas variables del suelo y de la estación, denominadas variables independientes, y relacionan éstas a través del análisis de regresión múltiple con la altura del árbol o con el índice de sitio.

Las ecuaciones derivadas de estos estudios se usan para desarrollar tablas de predicción de sitio y gráficas para estimar el índice de sitio en el campo. En importantes estudios de la relación suelo-sitio, la combinación de las variables independientes pueden determinar de un 65 a un 85% de la variación en altura de los árboles o del índice de sitio observado en el gráfico de campo (CARMEAN, 1975). Aunque muchas variables pueden utilizarse para desarrollar ecuaciones precisas, algunas de éstas pueden ser de difícil medición, por lo que, generalmente, se desarrollan ecuaciones menos precisas utilizando variables que se identifican más fácilmente y luego se comprueban en el campo.

Es necesario hacer dos observaciones fundamentales:

- Lo que se obtiene es una correlación, por lo que no necesariamente es una determinación de causa y efecto.
- Frecuentemente la variable dependiente ha sido el índice de sitio obtenido de curvas armonizadas, lo que conlleva los errores propios de dicho método.

Una vez realizada esta aclaración, se analizarán los factores que afectan al crecimiento potencial de los

árboles. Los que contribuyen en mayor medida a esto son:

- La cantidad de suelo ocupado por las raíces de los árboles y la disponibilidad de humedad y nutrientes en dicho suelo.
- Profundidad efectiva del suelo o profundidad del suelo superficial; es decir, espesor del suelo que es ocupado o es capaz de ser ocupado por las raíces del árbol.
- Posición del nivel freático durante la estación de crecimiento.
- También es significativo el que un estrato seco, grueso, pueda convertirse en una barrera efectiva a la penetración de las raíces de la misma forma que lo puede ser un estrato altamente compacto e impermeable, como es el caso de un suelo altamente resistente.

COILE (1952) resumió los primeros estudios, que concluyen en la gran significación de las medidas de profundidad del suelo. Dichas conclusiones son que los factores que más frecuentemente se encuentran como principales determinantes son:

- Profundidad del horizonte A sobre un subsuelo compacto.
- Profundidad de la capa menos permeable (normalmente el horizonte B).
- Profundidad del suelo moteado (indicativo de la profundidad media del drenaje restringido).
- Grosor del manto del suelo sobre el lecho rocoso.

Otras características importantes son aquellas del perfil del suelo que afectan la humedad, el drenaje y la aireación del suelo: la naturaleza física del perfil, textura general y estructura del horizonte menos permeable (normalmente B2).

Con respecto a otra característica como es la topografía, se encuentra estrechamente relacionada al microclima y a las propiedades físicas del suelo que determinan las condiciones de aireación y humedad de éste. CARMEAN (1967) encontró que las ecuaciones basadas únicamente en los rasgos topográficos explicaban más del 75% de la variación total del encino negro en el sudeste de Ohio (Estados Unidos), lo cual explica por qué la topografía

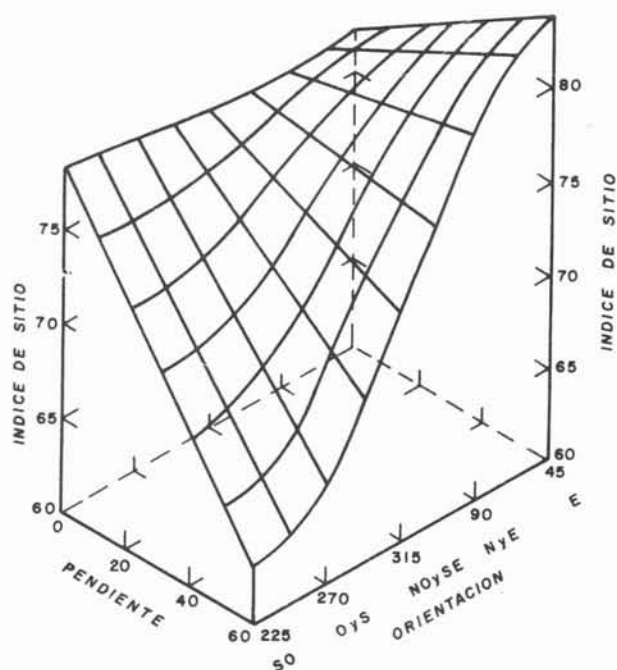


Fig. 5. Relaciones entre la orientación, la pendiente y el índice de sitio.

está estrechamente asociada con los rasgos más importantes del suelo, tales como la profundidad del horizonte A, textura del subsuelo, contenido de rocas y contenido de materia orgánica. Las relaciones de orientación, pendiente e índice de sitio se ilustran en la Figura 5.

La predicción del índice de sitio basándose en las características del suelo, en Estados Unidos, ha resultado de gran eficacia en muchas áreas de tierras elevadas para árboles de madera dura (RALSTON, 1964; CARMEAN, 1977); sin embargo, es ineficaz para árboles de madera dura de las tierras bajas sobre suelos aluviales de la zona central del sur.

Con respecto al uso de las series de suelos, por ser estas unidades demasiado heterogéneas, no sirven como base, por sí solas, para la evaluación de la calidad de la estación. La variación de la productividad forestal dentro de una unidad taxonómica de suelo es demasiado amplia para ser aceptable, pero al incorporarse factores específicos del suelo y topográficos se puede mejorar su eficiencia como variable predictora.

5. METODO DE MULTIFACTORES

Debido a que la calidad de la estación es la suma total de los factores que afectan la capacidad de la

tierra para producir, el método de los multifactores se refiere al estudio cuantitativo global de la productividad forestal e integra aquellos elementos que, según las características de la estación, sirvan como predictores de la productividad. Desde esta perspectiva, la modelización constituye el aspecto más importante. En este sentido, M'HIRIT (1982), con ocasión de un trabajo exhaustivo sobre los cedros del Rif marroquí, ha propuesto la siguiente relación general:

$$P = f(F_1, F_2, F_3, F_4)$$

en que

- P : corresponde a productividad;
- F_1 : corresponde a componentes biológicos;
- F_2 : corresponde a componentes ecológicos;
- F_3 : corresponde a componentes antrópicos;
- F_4 : corresponde a componentes dendrométricos.

En términos generales, el método se puede resumir en las siguientes etapas:

- Elección de una superficie (dentro de una zona climática dada) y de estaciones a partir de las cuales se puedan ajustar las ecuaciones predictoras.
- Distribución de las parcelas de muestreo, las cuales deben cubrir todos los posibles estados de desarrollo (edades) y de condiciones de productividad.
- Medición de alturas dominantes, edades, factores topográficos, edáficos, fitosociológicos y eventualmente climáticos.

Las variables a medir deben ser brutas, lo más simples posibles, sin necesidad de análisis de laboratorio complejos o grandes transformaciones. En materia fitosociológica, por ejemplo, el inventario florístico deberá considerar un número limitado de plantas indicadoras lo más representativas posible del medio. De esta manera, es posible predecir los valores de la altura dominante para varias especies en relación a diversos factores del medio y, por tanto, los datos colectados permiten cubrir un máximo de casos (RONDEAUX, 1977).

Este método permite numerosas aplicaciones, algunas de las cuales son:

- La predicción de la productividad de medios cubiertos o no por el bosque.

- La elección objetiva de las especies forestales más adaptadas desde el punto de vista de la producción leñosa.
- Establecimiento de mapas de potencialidad forestal (zonas de isopotencialidad) (PAGUE, 1970) y la posibilidad de definir o de precisar, sobre bases objetivas, el tipo y grado de manejo del bosque.
- Realización progresiva de un inventario de la población y la determinación de la producción utilizable (por ejemplo, maderable).

5.1. Aplicaciones del método

Desde hace más de cincuenta años se utilizan en Europa métodos intensivos que contienen múltiples factores, y métodos similares pero más extensivos han proliferado en Canadá. Uno de los trabajos más completos y desarrollados es el de Baden-Württemberg, que se realizó con fines prácticos de administración de recursos, pero que describe y estudia la estructura, productividad y proceso del sistema, y aunque en la práctica se considera que es demasiado detallista, oneroso y poco práctico, el modelo es claro y se puede elegir el nivel de profundidad de éste en función de las necesidades u objetivos predeterminados.

A continuación se presenta un resumen de este trabajo.

Sistema Baden-Württemberg

Baden-Württemberg es un Estado situado en la parte sudoeste de Alemania de, aproximadamente, 36.000 km², con una gran diversidad de condiciones climáticas, geológicas y de suelo. Existe un mosaico de patrones de vegetación, en parte debido a su medio ambiente variable y en parte como resultado de perturbaciones provocadas por el hombre.

El método consiste en una síntesis de los factores de localización más importantes en los niveles regionales y locales del sistema. En la Figura 6 se presenta el modelo del sistema de clasificación.

La primera etapa es la de *clasificación regional*, en la que se definen siete amplios paisajes forestales, y las áreas de crecimiento se distinguen por diferencias significativas en el clima, la topografía y el suelo. Las áreas de crecimiento no son homogéneas y

se subdividen en distritos de crecimiento basados en diferencias más sutiles, especialmente microclimáticas, pero también en material parental, suelo y vegetación. Cada distrito es caracterizado por uno o más tipos de bosques naturales dominantes cuya composición está determinada en gran medida por el clima. La vegetación natural del bosque es de primordial importancia al determinar los límites de los distritos de crecimiento y debido a que muchos de los lugares sufrieron alteraciones antropógenas, se consideró análisis de polen, historia forestal y estudio de la vegetación del piso inferior. A través de este estudio se reconstruyó la vegetación del período que comienza, aproximadamente, el año 1.500 a.C. y termina en la Edad Media.

Luego viene la etapa de *clasificación local y cartografía*, en la que cada distrito de crecimiento se subdivide en unidades de sitio. Una unidad incluye sitios individuales (el área ocupada por un grupo de árboles), que, aunque no son idénticos, tienen similares potenciales selvícolas y tasa de crecimiento y productividad equivalentes para las especies arbóreas más importantes. La unidad de localización se determina en el campo por las diferencias locales en la topografía, factores de suelo tales como la textura, estructura, acidez, profundidad y capacidad de retención de humedad, y la vegetación de la masa arbórea y el sotobosque.

Cada unidad de sitio está caracterizada por un tipo local de sotobosque y además se encuentra florísticamente delineada a través del uso de grupos de especies ecológicas. Una unidad de sitio está caracterizada por la presencia o ausencia de determinados grupos o de la abundancia relativa de las especies en los respectivos grupos. La tendencia gradual de las diferencias se observa claramente cuando las unidades de sitio se sitúan a lo largo de un gradiente de humedad. Las unidades en los extremos opuestos de los gradientes se distinguen fácilmente por los grupos de especies. Sin embargo, las unidades de sitio adyacentes pueden ser similares en sus grupos de especies y se diferencian en el campo por los rasgos del suelo y topográficos.

Después de un reconocimiento del bosque y de la determinación de una lista tentativa de unidades de sitio, se realiza un mapa utilizando estos tres caracteres, acompañado con un informe detallado describiendo los rasgos más importantes de cada unidad, así como recomendaciones para la elección

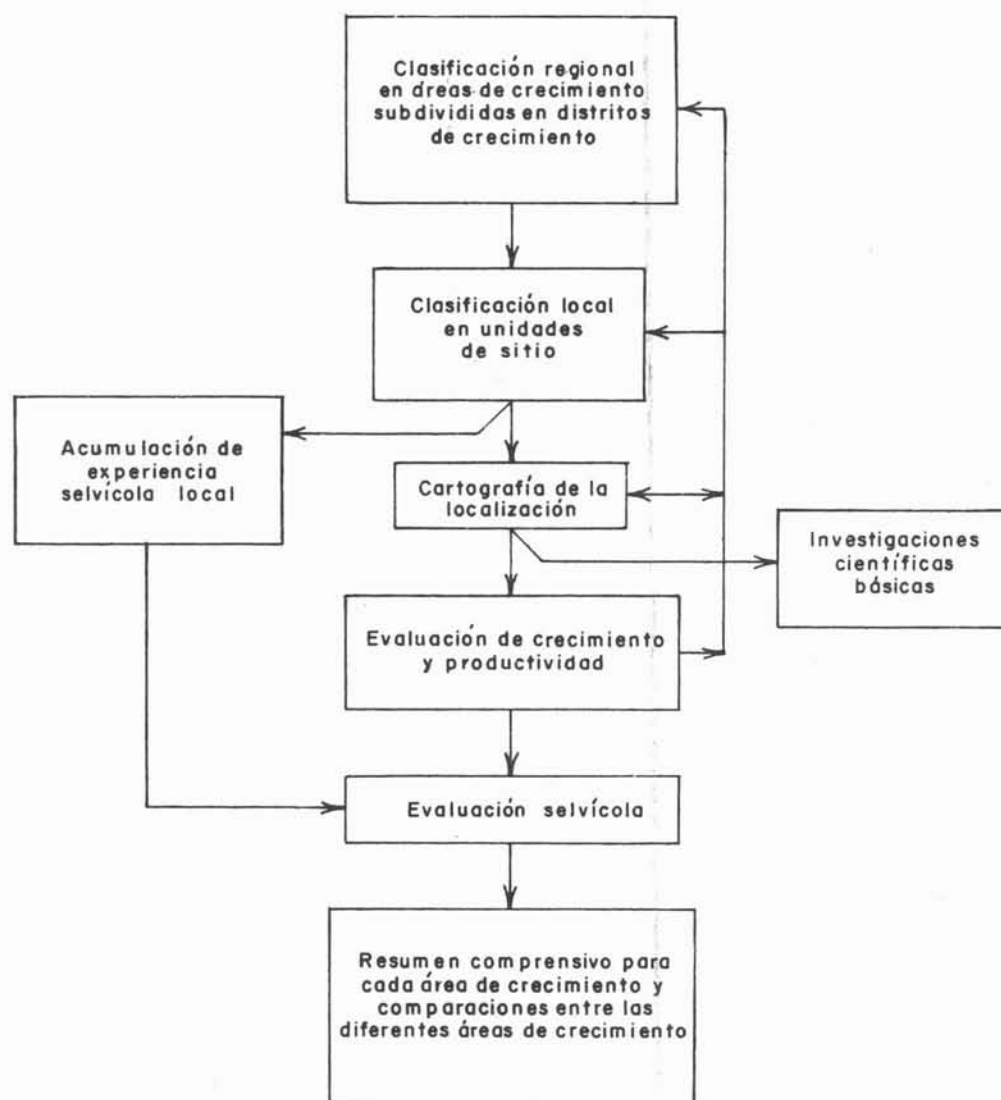


Fig. 6. Modelo del sistema de clasificación de la localización en Baden-Wurtemberg (Alemania).

de especies, riesgos de la acción del viento o ataques micóticos, edad de rotación, etcétera.

Posteriormente, en la etapa de *crecimiento y productividad* se determinan la tasa de crecimiento, el índice de sitio y la productividad para las especies más importantes de un distrito o grupo relacionado de distritos sobre la determinación cartográfica, utilizando gráficas de muestras y análisis de tronco en las unidades de sitio más importantes. Se puede determinar la productividad en volumen de tronco para las especies mayores en cada unidad de sitio y, además, comparar la productividad de las estaciones dentro de un distrito o entre distritos a partir de lo cual se pueden agrupar las unidades de sitio de productividad similar en *grupos de productividad*.

La *evaluación selvícola* es la etapa siguiente y se refiere a la evaluación de método en términos selvícolas. Las diferencias en las unidades de sitio afectan directamente tanto a las decisiones como a la elección de las especies, técnicas de establecimiento, regímenes de corta, clara, y los riesgos posibles de acción del viento, degradación del suelo, plagas y enfermedades.

Aplicación del análisis multifactorial en América

Sistemas de clasificación similares al de Baden-Wurtemberg han sido utilizados en otros Estados de Alemania Occidental, Austria y Alemania democrática, pero en América del Norte y Australia se desarrollaron métodos menos detallistas y a un nivel más extensivo.

En general, en estos trabajos se ha caracterizado la productividad de una estación y se han individualizado clases de crecimiento caracterizadas por una agregación de criterios ponderados.

En el país donde más se han desarrollado estos métodos ha sido en Canadá, donde usando técnicas de fotogrametría aérea, se han clasificado grandes extensiones de territorio basándose en un enfoque combinado de fisiografía y vegetación. Entre los más interesantes están el método de HILLS (1960) en Ontario y el de biogeocenosis de KRAJINA (1965) en Columbia Británica.

El método de HILLS se basa en dos aspectos principales, que son:

- Uso de la fotointerpretación para clasificar y evaluar grandes áreas a menudo inaccesibles.
- Preponderancia de los rasgos fisiográficos fácilmente reconocibles desde el aire y que permanecen a lo largo del tiempo.

El método de clasificación se realiza por la combinación de los tipos de estación fisiográfica y tipo de vegetación, para conformar el tipo total de estación de acuerdo con el esquema de la Figura 7.

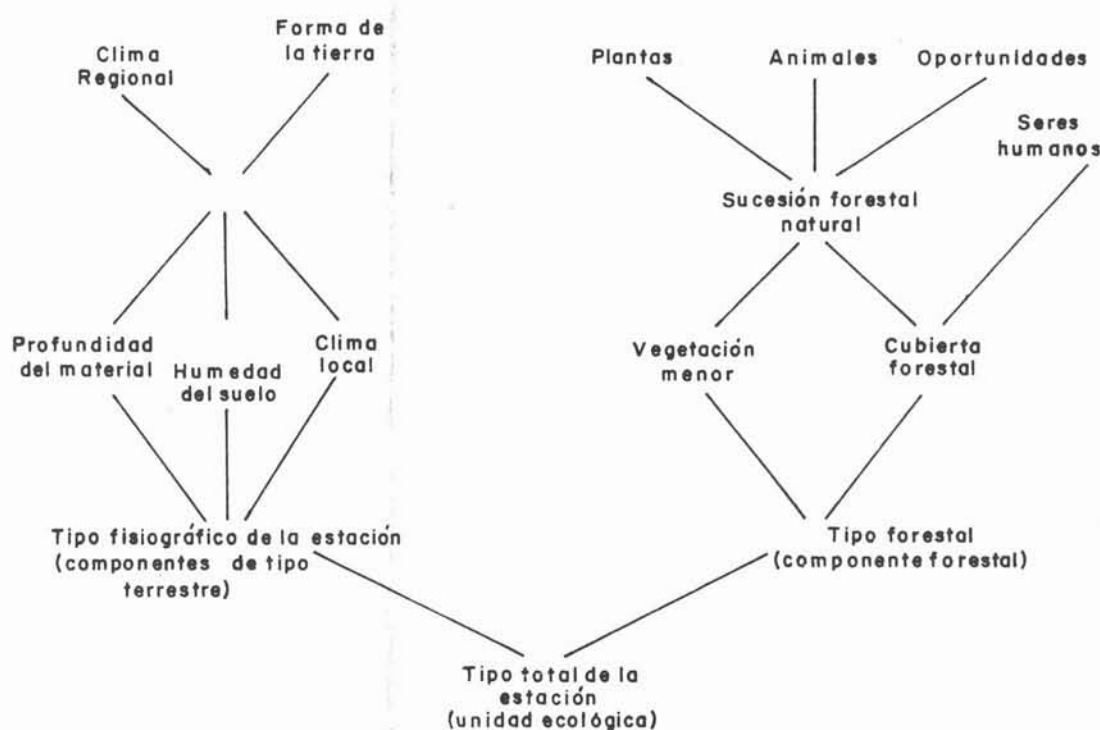


Fig. 7. Esquema de la determinación de la estación.

Previo a la clasificación de las estaciones se desarrolló un marco en el que se subdividió Ontario en 13 regiones de estaciones a partir de las diferencias climáticas más importantes. A su vez estas regiones se subdividían en distritos de estaciones donde el criterio seguido era el fisiográfico, geológico y edáfico.

La evaluación de la producción actual y potencial no era tan rigurosa como la de Baden-Wurtemberg, pero cumplía ampliamente con el objetivo de clasificación.

6. METODO MIXTO

Este método tiene por objeto medir la relación entre la altura dominante a una edad dada (u otro índice dendrométrico) y factores ambientales. La mayor importancia de este método reside en que permite estimar el índice de sitio en ausencia de la población.

La construcción de tablas de producción mediante técnicas matemáticas permite centrar la atención sobre la variabilidad existente en la relación entre el volumen total y la altura dominante. Investigaciones recientes consisten en asociar índices den-

drométricos y variables del medio, bien para definir nuevos índices (índices mixtos), bien para elaborar modelos de crecimiento o funciones de producción.

La medición del índice de sitio en relación con algunos factores limitantes del medio necesitan el recurso de modelos más elaborados. Esta aproximación *factorial* se puede llevar a la práctica de la siguiente manera:

- Elección previa de factores ambientales relacionados con la altura dominante.
- Eliminación de variables muy difíciles de coleccionar o demasiado complejas.
- Determinación de la muestra en las poblaciones aptas para las mediciones que presenten todos los elementos de variabilidad (edad, condiciones ecológicas).
- Toma de datos.
- Regresión de la altura dominante con las variables explicativas, presentando la contribución más significativa en la precisión de la estimación (examen de la matriz de correlación, introducción o eliminación de variables).

Los factores más relevantes que pueden ser probados mediante técnicas estadísticas se pueden presentar de la siguiente forma:

$$HD = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n$$

en que

HD: altura dominante a la edad típica;
 $x_1 \dots x_n$: variables ambientales o combinación de ellas;
 $a_0 \dots a_n$: constantes de regresión.

Este modelo se basa en la aditividad de los factores de productividad, aunque una variable puede ser una combinación de variables simples.

Otra forma más directa de enfocar el problema es utilizando un modelo del tipo:

$$H_i = f_1(t) \times f_2(t) \times \dots \times f_n(t)$$

en que $f_n(t)$ corresponde a una función relacionada a un factor o interrelación de ellos y cada función se relaciona con la otra de manera multiplicativa.

Entre estas variables, es conveniente señalar la im-

portancia del suelo (profundidad, textura, drenaje...), de la topografía (pendiente, altitud, exposición, geomorfología) (COILE y SCHUMACHER, 1953; PAGE, 1970) y del clima.

Los métodos estadísticos más utilizados, y cuyos resultados son bastante aceptables, son el de análisis de componentes principales (con el objetivo de seleccionar variables linealmente independientes que aporten un mayor porcentaje de explicación a la varianza total) y la regresión múltiple, generalmente paso a paso (*stepwise*) que relaciona al índice de sitio con el resto de las variables (HUNTER y GIBSON, 1984; WHITE, 1982a; WHITE, 1982b).

Una aplicación del método de componentes principales y de la formación de enjambres de VAN den DRIESCHE se ha llevado a cabo (GANDULLO, 1972) en *Pinus halepensis* Mill. para determinar los diversos ecosistemas sobre los que se desarrolla esta especie y sus calidades de estación. Las variables estudiadas son: déficit de agua, superávit de agua, precipitación anual, terrosidad, arcillosidad, limosidad, pendiente, pH, materia orgánica y carbonato cálcico como variables independientes y la calidad de la estación como variable dependiente. Como principal resultado con respecto a la determinación de las calidades de estación, se concluye que «el porcentaje de la variación del índice de calidad explicado por las 10 variables consideradas es, aproximadamente, del 50%».

Por otra parte, GANDULLO *et al.* (1974) estudiaron el óptimo ecológico del *Pinus radiata* D. Don en España y a partir de él determinaron la mayor o menor influencia de ciertos parámetros ecológicos en la calidad de la estación mediante análisis de regresión múltiple a partir del cual se estableció la siguiente ecuación de pronóstico:

$$\begin{aligned} \text{calidad} = & 2,100108 + 0,0027x_1 + \\ & + 0,000027x_2^3 - 0,000042x_2^2 - 0,006187x_2^3 - \\ & - 0,00003x_3^2 + 1,064016x_4 - 1,258609 \, 1/x_6 \end{aligned}$$

en que

x_1 : altitud;
 x_2 : limo-55;
 x_3 : arena;
 x_4 : $\frac{\text{arcilla-35}}{\text{TF}}$;
 x_5 : C/N-18;
 $1/x_6$: frío;
 x_7 : tierra fina.

con un coeficiente de determinación de 0,287.

También en España, en Galicia (BARA y TOVAL, 1983), se ha realizado un estudio de las siguientes variables: análisis químico de suelos, análisis mecánico, análisis foliar, altitud, pendiente, orientación, profundidad, temperaturas medias mensuales, criterio de GAUSSEN y parámetros dasométricos y se ha utilizado el análisis multivariante obteniéndose la siguiente ecuación:

$$I = 1,1525 - 0,000509A + 0,211798P - 0,002952Ca - 0,000932K$$

en que

I: índice de calidad en función de la altura dominante;

A: altitud (m);

P: profundidad del suelo (m);

Ca: calcio del suelo;

K: potasio del suelo.

con un coeficiente de determinación de 0,48.

Cabe señalar que en la gran mayoría de estos trabajos las ecuaciones obtenidas sólo tienen un carácter exploratorio debido a la poca proporción de la varianza que queda explicada por dichos modelos.

Un problema que se debe considerar en este tipo de análisis es la necesidad de cuantificar las variables cualitativas del medio con el fin de poder integrarlas en los análisis de regresión. La codificación numérica de estas variables supone, en efecto, que la información cualitativa discontinua sea representada en forma de escalas continuas crecientes o decrecientes. Una forma lógica pero subjetiva y sujeta a la experiencia del investigador es la codificación, cuando el caso lo permita, con valores (por ejemplo, de 1 a 9) que representen la mayor o menor relación entre las variables consideradas y la productividad (KINLONCH y PAGE, 1966).

El problema es, sin duda, más complicado en el caso de ecuaciones construidas principalmente en función de plantas indicadoras o asociaciones de plantas. Generalmente éstas intervienen en los modelos de regresión con el valor 0 ó 1 si están presentes (MAC LEAN y BOLSINGER, 1973). Este método es muy útil a considerar cuando la vegetación y la distribución natural de especies que la componen sintetizan muy bien el conjunto de condiciones del medio. En la práctica, esta hipótesis es, por otra parte, confirmada por el hecho de que la ausencia de especies o de grupos de especies representativas de tal o cual medio contribuyen de manera significativa a la explicación de la variabilidad de la altura dominante.

7. DENDROCRONOLOGIA

Otro método que no ha sido muy utilizado en la determinación de la calidad de la estación, pero que en algunos casos ha dado buenos resultados, es el de la dendrocronología; es decir, la medición del crecimiento en los anillos anuales.

ERMICH, RUTKOWSKI, BEDNARZ y FELIKSK (1976) han comparado series de anillos de crecimiento anual para distintos individuos de *Picea* sp. en el mismo sitio y distintos sitios y encontraron que árboles creciendo en mejores sitios tenían un crecimiento más regular que aquellos que crecían en sitios malos.

El grado de similaridad entre árboles creciendo en el mismo sitio fue llamado «coeficiente de similitud» y puede ser considerado como una medida de la calidad de la estación.

Este método puede ser útil en aquellos casos en que sea necesario comparar estaciones sólo en términos cualitativos.

SUMMARY

This work is a bibliographic revision of the most usual methods throughout the world, to evaluate indirectly the site quality, mainly in reference to even-aged forest stands. In this evaluation are analysed graphic and numerical methods besides the use of the vegetation and environmental factors. Finally, a summary table with all the required parameters for each analysed method, is given.

BIBLIOGRAFIA

- ALBAN, D. H., 1972: *An improved growth intercept method for estimating site index of red pine*. USDA Forest Service, Research Paper, North Central Forest Experiment Station NC-80.
- ALDER, D., 1980: *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos*. Vol. 2. Predicción del rendimiento. Estudio FAO: Montes 22/2. 80 pp.
- ARNBORG, T., 1953: «Det nordsvenska skogstypsschemat». En *Review and Comparison of Site Evaluation Methods* 1969 USDA Forest Service, Research Paper RM-51. 27 pp.
- ARNBORG, T., 1960: «Can we find a common platform for the different schools of forest type classifications». En: Symposium on forest types and forest ecosystems. *Silva Fenn.* 105: 13-15.
- ASSMANN, E., 1970: *The Principles of Forest Yield Study*. Pergamon Press. Oxford. New York. 506 pp.
- ASSMANN, E., y FRANZ, F., 1965: «Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern». *Forstwiss. Cbl.* 84 (1-2): 13-43.
- BAILEY, R. L., y CLUTTER, J. L., 1974: «Base-Age Invariant Polymorphic Site Curves». *Forest Sciences*, 20 (2): 155-159.
- BAKUZIS, E. V.; DUCAN, D. P., y HANSEN, H. L., 1960: *Application of the method of synecological coordinates in a study of forest geographical subdivisions of Minnesota*. Minn. Forest. Notes. 99. 2 pp.
- BARA, T. S., y TOVAL, H. G., 1983: *Calidad de Estación del Pinus pinaster Ait. en Galicia*. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales N.º 24. 166 p.
- BATES, C., 1918: «Concerning site». *J. Forest*, 16: 383-388.
- BAULE, B., 1917: «Zu Mitscherlichs Gesetz der physiologischen Beziehungen». En: *Site index estimation by means of site properties. Scots pine and Norway spruce in Sweden*. Studia Forestalia Suecica Nr 138, 1977. 38 pp.
- BECK, D., 1971: *Polymorphic site index curves for white pine in the Southern Appalachians*. USDA Forest Service, Research Paper SE-80. 8 pp.
- BECK, D., y TROUSDELL, K. B., 1973: *Accuracy of Prediction*. USDA Forest Service. Research Paper SE-108. 7 pp.
- BERTALANFFY G. VON, 1951: *Theoretische Biologie*. Band 11, Bern.
- BLYTH, J. F., 1974: «The importance of initial check and tree form in the estimation of yield class as a growth index for site assessment». *Scottish Forestry*, 28 (3): 198-210.
- BRICKWELL, 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, Res. Paper INT-47. 23 pp.
- BRUCE, O., y SCHUMACHER, F., 1950: *Forest Mensuration*. McGraw Hill Book Company. New York. 483 pp.
- BULL, H., 1931: «The use of polymorphic curves in determining site quality in young red pine plantations». *J. Agr. Res.* 43: 1-28.
- BURKHART, H. E., y STRUB, M. R., 1974: «A model for simulation of planted loblolly pine stands». En: *Growth Models for Tree and Stand Simulation* (Ed. J. FRIES). Royal College of Forestry. Stockholm, Sweden. 128-135 pp.
- BURKHART, H. E.; PARKER, R. C.; STRUB, M. R., y OBERWALD, R. G., 1972: *Yields of old-field loblolly pine plantations*. Div. For. and Wildl. Resour., Van Polytech Inst. and State Univ. Publ. FWS-3-72. 51 pp.
- CAJANDER, A. K., 1909: «Ueber Waldtypen». En: *Review and Comparison of Site Evaluation Methods*. USDA Forest Service, Research Paper RM-51, 1969.
- CAJANDER, A. K., 1926: «The theory of forest types». *Acta Forest. Fenn.* 29. 108 pp.
- CANCIO, A., 1988: *Comunicación personal*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Departamento de Sistemas Forestales.

- CARBONNIER, R., 1954: «Definition and methods». pp. 3-23. En: *Fennoscandian Forestry Union, a symposium on forest land and classification of site in the Fennoscandian countries* (Transl. by USDA Forest Service from Svenska Skogsvardsforen. Tidskr. 52: 189-208).
- CARMEAN, W., 1956: «Suggested Modifications of the Standard Douglas-fir Site Curves for Certain Soils in Southwestern Washington». *Forest Sciences*, 2 (1): 242-250.
- CARMEAN, W., 1967: «Soil survey refinements for predicting black oak site quality in southeastern Ohio». *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 805-810.
- CARMEAN, W., 1975: «Forest site quality evaluation in the United States». *Adv. Agron.*, 27: 209-269.
- CARMEAN, W., 1977: «Site classification for northern forest species». En: *Proc. Symposium on intensive Culture of Northern Forest Types*. pp. 205-239. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. NE-29.
- COILE, T. S., 1938: «Forest classification of forest sites with special reference to ground vegetation». *J. Forest.* 36: 1062-1066.
- COILE, T. S., 1952: «Soil and the growth of forest». *Advanc. Agron.*, 4: 329-398.
- COILE, T. S., y SCHUMACHER, F. X., 1953: «Site index of young stands of loblolly pine plantations in the Piedmont plateau region» *J. For.* 51: 432-435.
- COILE, T. S., y SCHUMACHER, F. X., 1964: *Soil-site relations, stand structure and yields of slash and loblolly pine plantations in the Southern United States*. T. S. Coile, Inc., 296 pp.
- CURTIS, R. O., 1964: «A Stem-Analysis Approach to Site Index Curves». *Forest Sciences*, 10 (2): 241-256.
- DAUBENMIRE, R., 1952: «Forest vegetation of northern Idaho and cadjacent Washington and its bearing on concepts of vegetation classification». *Ecological Monographs*, 22: 301-330.
- DAUBENMIRE, R., 1961: «Vegetative indicators of rate of height growth in ponderosa pine». *Forest Sci.* 7: 24-34.
- DAUBENMIRE, R., y DAUBENMIRE, J. B., 1968: *Forest vegetation of eastern Washington and northern Idaho*. Washington Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin N.º 60.
- DAY, M. W.; BEY, C. F. y RUDOLPH, V. J., 1960: «Site index for planted Red Pine by the 5-year growth intercept method». *J. For.* 58: 198-202.
- DECOURT, N., 1973: «Production primaire, production utile: méthodes d'évaluation, indices de productivité». En: *Ecologie forestière. Station et production ligneuse*. *Ann. Sci. Forest.*, 30 (3): 219-238.
- DEVAN, J. S., y BURKHART, H. E., 1982: «Polymorphic Site Index Equations for Loblolly Pine Based on a Segmented Polynomial Differential Model». *Forest Sciences*, 28 (3): 544-555.
- DREW, T. J., y FLEWELLING, J. W., 1977: «Some recent Japanese theories of yield-density relationships and their application to Monterey pine plantations». *Forest Sciences*, 23: 517-534.
- ENEROTH, O., 1931: «Om skogstyper och föryngringsförhållanden inom lappmarken». En: *Review and Comparison of Site Evaluation Methods*. USDA Forest Service, Research Paper RM-51, 1969. 27 pp.
- ERMICH, K.; RUTKOWSKI, B.; BEDNARZ, Z., y FELIKSIK, E., 1976: «The degree of similarity of dendrochronological curve as an indicator of site conditions». *Tree-ring Bulletin*, 36: 1-8.
- FEDUCCIA, D. P.; DELL, T. R.; MANN, W. F.; CAMPBELL, T. E., y POLMER, B. H., 1979: *Yields of unthinned loblolly pine plantations on cutover sites in the west Gulf Region*. USDA Forest Service, Research Paper SO-148. 88 pp.
- FROTHINGHAM, E. H., 1921: «Classifying forest sites by height growth». *Journal of Forestry*, XIX (4): 374-381.
- FULLER, W. A., 1969: «Grafted polynomials as approximating functions». *Australian J. Agric. Econ.* 13: 35-46.
- GALLANT, A. R., y FULLER, W. A., 1973: «Fitting segmented polynomial models whose join points have to be estimated». *J. Am. Stat. Assos.* 68: 144-147.
- GANDULLO, J. M., 1972: *Ecología de los Pinares Españoles. III. Pinus halepensis Mill.* Min. de Agricultura. INIA. Madrid.

- GANDULLO, J. M.; GONZÁLEZ ALONSO, S., y SÁNCHEZ PALOMARES, O., 1974: *Ecología de los Pinares Españoles. IV. Pinus radiata. D. Don. Min. de Agricultura. INIA. Madrid.*
- GARCÍA, O., 1979: «Modelling stand development with stochastic differential equations». En: *Mensuration for Management Planning of Exotic Forest Plantations*, FRI Symposium N.º 20, DA Elliott (ed.), 315-333. Rotorua: Forest Research Institute, New Zealand Forest Service.
- GARCÍA, O., 1980: «A stochastic differential equation model for the height growth of forest stands». Paper presented at the 5th Australian Conference, Sydney, August 1980.
- GARCÍA, O., 1983: «A Stochastic Differential Equation Model for the Height Growth of Forest Stands». *Biometrics* 39: 1059-1072.
- GLEASON, H. A., 1926: «The individualist concept of the plant association». *Torrey Bot. Club Bull.*, 53: 7-26.
- GLEASON, H. A., 1939: «The individualist concept of the plant association». *Amer. Midland Natur.*, 21: 92-110.
- GOODALL, D. W., 1953a: «Objective methods for the classification of vegetation. I. The use of positive interspecific correlation». *Australian J. Bot.* 1: 39-63, illus.
- GOODALL, D. W., 1953b: «Objective methods for the classification of vegetation. II. Fidelity and indicator value». *Australian J. Bot.*, 1: 434-456, illus.
- GOODALL, D. W., 1954: «Objective methods for the classification of vegetation. III. An essay in the use of factor analysis». *Australian J. Bot.* 2: 304-324.
- GOLDEN, M. S.; MELDAHL, R., KNOWE, S. A., y BOYER, W. D., 1981: «Predicting site index for old field loblolly pine plantations». *South J. Appl. For.* 109-114.
- HAGGLUND, B., 1972: *Site Index Curves for Norway Spruce in Northern Sweeden*. Dep. Forest Yield Resp., Royal Coll. For., Stockholm, Res. Notes. 21. 54 pp.
- HAGGLUND, B., 1976: *Skattning av höjdboniteten i unga tall-och grandbestand*. Rapporter och Uppsatser, Institutionen för Skogsproduktion, N.º 39.
- HAGGLUND, B., y LUNDMARK, J. E., 1977: *Site index estimation by means of site properties. Scots pine and Norway spruce in Sweeden*. Studia Forestalia Suecica Nr 138. 38 pp.
- HAGGLUND, B., 1981: «Evaluation of Forest Site Productivity». *Forestry Abstract*, Review Article. Vol. 42 (11): 515-527.
- HAMILTON, G. J., y CHRISTIE, J. M., 1971: *Forest management tables (metric)*. Forestry Comission Booklet N.º 34. 201 pp.
- HILLS, G. A., 1960: *Forest site evaluation in Ontario*. Ontario Dep. Lands and Forests Res. Rep. 42. 64 pp.
- HUNTER, I. R., y GIBSON, A. R., 1984: «Predicting *Pinus radiata* site index from environmental variables». *New Zealand Journal of Forestry Sciences*, 14 (1): 53-64.
- ILVESSALO, Y., 1927: *Methods for preparing yield tables*. Silva Fenn. 5, 30 pp.
- ILVESSALO, Y., 1937: *Growth of natural normal stands in central North-Suomi (Finland)* Commun. Inst. Forest. Fenn. 24 (2): 1-149.
- JONES, J. R., 1969: *Review and comparision of site evaluation methods*. USDA Forest Service. Research Paper RM-51. 27 pp.
- JONSON, T., 1914: «Om bonitering av skogsmark». En: *Review and comparision of site evaluation methods*. USDA Forest Service, Research Paper RM-51, 1969. 27 pp.
- JONSSON, B., 1978: «A growth model as a basis for long term forecasting of timber yields (a preliminary version)». En: *Growth models for long term forecasting of timber yields*. Virginia Polytecnic Institute and State University. FWS-1-78: 119-137.
- KALELA, A., 1960: En: *Symposium on forest types and forest ecosystems*. Silva Fenn. 105: 115-116.
- KINLONCH D., y PAGE, G., 1968: «Quantitative techniques for relating site conditions to the produc-

- tivity of certain conifers in North Wales». En: *Proc. 6th World Forestry Congress, April 1966*. Comercial y Artes Gráficas, S. A., Barcelona. 1.438-1441.
- KRAJINA, V., 1965: *Ecology of the Pacific Northwest and of western Canadian arctic and subarctic*. 1965 progress report. Univ. Brit. Columbia, Dep. Bot. 31 pp.
- LAYSER, E. F., 1974: «Vegetative classification: its application to forestry in the northern Rocky Mountain». *Journal of Forestry* 72 (6): 354-357.
- LENHART, J. D., 1970: *Yield of old field loblolly pine plantations in the Georgia Piedmont*. Ph D thesis Univ. Georgia, Athens. 107 pp., 1968. Diss. Abstr. Int. 30 (8): 3450-B.
- LENHART, J. D., 1972a: *Cubic volume yields for unthinned old-field loblolly pine plantations in the Interior West Gulf Coastal Plain*. Stephen F. Austin State Univ., Texas Forestry Paper 14. 46 pp.
- LENHART, J. D., 1972b: «Predicting survival of unthinned, old-field loblolly pine plantation», *Jour. Forestry* 70: 754-755.
- LENHART, J. D., y CLUTTER, J. L., 1971: *Cubic-foot yield tables for old-field loblolly pine plantations in the Georgia Piedmont*. Georgia Forest Research Council, Report 22. Series 3. 12 pp.
- LLOYD, F. T., 1975: *An estimator of variance for a site index predictor using a family of cumulative total height growth curves as the model*. Thesis. North Carolina State University, Microfilm.
- LUNDGREN, A., y DOLID, W., 1970: *Biological growth functions describe published site index curves for Lake States timber species*. USDA Forest Service, Res. Paper NC-36. 9 pp.
- LUNDKVIST, B., 1957: «Om höjdtvecklingen i kulturbestand av tall och gran i Norrland». En: A Mathematical Approach to polymorphic Site Index Curves for Grand Fir. *Forest Science*, 9 (2): 167-180.
- MACLEAN, C. D., y BOLSINGER, C. L., 1973: *Estimating productivity on sites with a low stocking capacity*. USDA Forest Service, Research paper, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station PNW 152.
- MADER, D. R., 1976: «Soil-site productivity for natural stands of white pine in Massachusetts». *Soil Science Society of America Journal*, 40 (1): 112-115.
- MALMSTROM, C., 1949: «Studier över skogstyper och trädslagsfördelning inom Västerbottens län Medd». En: *Review and Comparison of Site Evaluation Methods*. USDA Forest Service, Research Paper RM-51, 1969. 27 pp.
- MARQUARDT, D. W., 1963: «An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters». *J. SIAM* N.º 11: 431-441.
- MEYER, H. A., 1940: «A mathematical expression for height curves». *J. Forest*, 38: 415-420.
- MCGEE, C. E. y CLUTTER, J. L., 1967: «A study of site index for planted slash pine». *J. For.*, 65: 491-493.
- MCINTOCK, T. F., y BICKFORD, C. A., 1957: *A proposed site index for red spruce in the Northeast*. USDA. For Serv. Sta. Paper NE 93. 32 pp.
- MCQUILKIN, R. A., 1974: *Site index prediction tables for black, scarlet and white oaks in southeastern Missouri*. USDA Forest Service, Research Paper, North Central Forest Experiment Station, NC-108.
- M'HIRIT, O., 1982: *Etude écologique et forestière des Cédrais du Rif marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la productivité du Cèdre*. Thèse ès-Sciences, Université Aix Marseille III. Faculté Saint Jérôme, 1-43, vol. 1, annexes.
- NICOLÁS, A., y GANDULLO, J. M., 1969: *Ecología de los pinares españoles. II, Pinus sylvestris L.* Ministerio de Agricultura. INIA, Madrid.
- NORRLIN, J. P., 1871: «Bidrag till sydöstra Tavastlands flora». En: *Review and Comparison of Site Evaluation Methods*. USDA Forest Service, Research Paper RM-51, 1969. 27 pp.
- OLIVER, W. W., 1972: *Height intercept for estimating site index in young ponderosa pine plantations and natural stands*. USDA Forest Service, Research Note. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, PSW-276.
- ORTEGA, A., y MONTERO G., 1988: «Evaluación de la calidad de la estación en masas de *Pinus Sylvestris*

- L. utilizando la relación altura-diámetro». En: *Symposium Floresta e O Ordenamento do Espaço de Montanha*. Vila Real, Portugal. En prensa.
- PAGE, G., 1970: «Variation of site-index and basal area within the forest types of Newfoundland's Avalon Peninsula». *Bimonthly Research Notes*, 26 (1): 49-50.
- PARKER, H. A., 1916: «Addenda (to Roth, 1916)». En: *Review and comparison of site evaluation methods*. USDA. Forest Service, Research Paper, RM-51. 1969, 27 pp.
- PFISTER, R. D., y ARNO, S. F., 1980: «Classifying forest habitat types based on potential climax vegetation». *Forest Sciences*, 26: 52-70.
- PITA, C. P., 1964: *La calidad de la estación en las masas de P. sylvestris de la Península Ibérica*. Anales del Instituto Forestal. 25 pp.
- PRODAN, M., 1968: *Forestry Biometrics*. Engl. Trans. Pergamon Press. Oxfor. 446 pp.
- RALSTON C. W., 1964: «Evaluation of Forest Site Productivity». *International Review of Forestry Research* Romberger, Mikda (eds). pp.: 171-201.
- RAWAT, A. S., 1973: *A mathematical model for the site quality of seven important tree species in Bavaria, Germany*. Forschungsbericht, Nr. 10.
- RICHARDS, F. J., 1959: «A flexible growth function for empirical use». *J. Exp. Bot.* 10 (29): 290-300.
- RICHARDS, N. A.; MORROW, R. R., y STONE, E. L., 1962: *Influence of soil and site on red pine plantations in New York*. Bulletin, Cornell Agricultural Experiment Station N.º 977.
- RONDEAUX, J., 1977: «Estimation de la productivité forestière: principes et méthodes». *Annales de Gembloux*, 83: 5-17.
- ROTH, F., 1916: «Concernig site». *Forest. Quart.* 14: 3-12.
- ROTH, F., 1918: «Another word on site». *J. Forest.* 16: 749-753.
- SCHUMACHER, F. X., 1939: «A new growth curve and its application to timber yield studies». *J. For.* 37: 819-820.
- SMALLEY, G. W., y BAILEY, R. L., 1974: *Yield tables and stand structure for loblolly pine plantations in Tennessee, Alabama, and Georgia Highlands*. USDA Forest Service, Research Paper SO-96. 81 pp.
- SPRING, S., 1917: «Site and site classes». *J. Forest.* 15: 102-103.
- SPURR, S. Y., y BARNES, B., 1982: *Ecología Forestal*. AGT Editor, México. 690 pp.
- STAGE, A., 1963: «A Mathematical Approach to Polymorphic Site Index Curves For Grand Fir». *Forest Sciences*, 9 (2): 167-180.
- STERRETT, W. D., 1914: *Forest management of loblolly pine in Delaware, Maryland, and Virginia*. USDA Bull. II. 59 pp.
- STEVENS, W. L., 1951: «Asymptotic Regression». *Biometrics*, 7 (3): 247-267.
- STOUT, B. B., y SHUMWAY, D. L., 1982: «Site Quality Estimation Using Height and Diameter». *Forest Sciences*, 28 (3): 639-645.
- WAKELEY, P. C., 1954: *Planting the southern Pines*. Agric. Monog. USDA, 18. 233 pp.
- WAKELEY, P. C., y MARRERO, J., 1958: «Five-year intercept as site index in southern pine plantations». *Journal of Forestry*, 56 (5): 332-336.
- WALTER, H., 1973: *Vegetation of the Earth in Relation to climate and the Ecophysiological Conditions*. English Universities Press, London.
- WARRACK, G. C. y FRASER, A. R., 1955: *Estimation of site quality in juvenile Douglas-fir stands*. Res Note B. C. For. Serv. 28. 5 pp.
- WHITE, E. J., 1982a: «Relationship between height growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and site factors in Great Britain». *Forest Ecology and Management*, 4: 225-245.
- WHITE, E. J., 1982b: «Relationship between height growth of stand and open-grown single trees of

scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and site factors in Great Britain». *Forest Ecology and Management*, 4: 247-259.

WIEDEMANN, E., 1929: «Die ertragskundliche and waldbauliche Brauchbarkeit der Waldtypen nach Cajarander in sächsischen Erzgebirge». En: *Review and comparison of site evaluation methods*. USDA. Forest Service Research Paper RM-51, 1969. 27 pp.

APENDICE 1

A continuación se presenta un cuadro resumen en el que se indican las mediciones necesarias para llevar a cabo cada método desarrollado en este trabajo. El orden en que se presentan en este cuadro es el mismo seguido en el desarrollo de la revisión.

Método	Parámetros a medir
Gráficos:	
Fajas	Altura, edad.
Curvas armónicas	Altura, edad.
Curvas naturales	Altura, edad.
Numéricos:	
Curvas anamórficas	Altura, edad.
Curvas polimórficas	Altura, edad.
Segmentos	Altura, edad.
Derivadas	Altura, edad.
Funciones de crecimiento	Altura, edad.
Ecuaciones diferenciales	Altura, edad.
Intercepción	Crecimiento de verticilos a partir de una cierta altura.
Diámetro	Diámetro a la altura del pecho (1,3 m), altura, edad.
Vegetación	Inventario de sotobosque clímax, árboles, hierbas, arbustos, tablas de producción, otras características, humedad, nutrientes, luz, calor, radiación solar, etcétera.
Suelo y topografía	Cantidad de suelo ocupado por las raíces de los árboles, disponibilidad de humedad y nutrientes, profundidad del suelo, presencia de suelo moteado, presencia de capas impermeables, textura, estructura, orientación, pendiente, topografía.
Multifactores	Altura dominante, edad, factores topográficos, edáficos, fitosociológicos y eventualmente climáticos.
Mixto	Altura dominante, factores edáficos, topográficos, climáticos, fitosociológicos.
Dendrocronología	Crecimiento de anillos en análisis de tronco.