

EL SITIO

1.- El concepto de sitio y la variación espacial

Aún cuando el nombre “sitio” tenga una clara connotación espacial, el concepto fundamental que conlleva no se refiere al espacio en sí, sino a las condiciones que lo caracterizan. En dasometría el interés central de este concepto está en la caracterización del potencial de crecimiento que se asocia a una localidad o área determinada.

Los factores fundamentales que determinan el crecimiento, son:

1. Factores **climáticos**: La temperatura del aire, la humedad, la energía radiante., precipitación, viento, etc.
2. Factores **edáficos**: La profundidad efectiva, las propiedades físico químicas, la humedad, el pH, los microorganismos, etc.
3. Factores **topográficos**: pendiente y forma del relieve, altitud y exposición
4. Factores de **competencia**: otros árboles, vegetación menor, animales, hombre, etc

Los factores anteriores, pueden ser descritos en términos de ciertas características numéricas específicas. Por ejemplo, oferta de agua disponible bajo el suelo, profundidad efectiva de la raíz, acumulación de humus en el horizonte “A”, nivel de fósforo disponible en el suelo, y así sucesivamente para cada factor (Lavery, 1986). En realidad, todos los factores intervienen por sí solos o en una gran interacción dando como resultado un crecimiento potencial específico.

Si se intenta hacer la descripción de un área a través de un muestreo, se observará que probablemente no exista ningún punto igual a otro. La naturaleza se construye a partir de cambios a veces graduales o a veces abruptos pero que con el correr del tiempo y los procesos de dinámica ambiental se suavizan espacialmente.

El patrón de **variación espacial**, puede ser modelado como una “gran tendencia” de variaciones direccionales graduales, y “pequeñas perturbaciones de orden local” más bien aleatorias. Las grandes tendencias surgen como respuesta al conjunto de interacciones más relevantes para explicar el fenómeno, en cambio los “ruidos locales” obedecen a la presencia de otros factores, que se apartan de la “gran tendencia” y que gravitan en la respuesta específica en ese punto.

En general, los factores del sitio pueden tener una variación espacial con un patrón característico que hace que existan interdependencias entre ellos. Cuando existen discontinuidades espaciales en alguno o varios de los factores del sitio, la dinámica natural se encarga de “suavizar” esos espacios creando zonas de transición entre un sitio y otro. Para efectos prácticos, - cuando se intenta hacer inferencias locales- resulta ineficiente informarse en detalle sobre la distribución espacial de todos factores de sitio, y resulta más práctico modelar el comportamiento global o la “gran tendencia”. Para ello existen métodos geostatísticos, que permiten modelar estas variaciones espaciales a partir de una realización o muestra de la población. (Corvalán, P, Gouet, R y Reyes, C. 1998)

Si se observan las variaciones espaciales del crecimiento en plantaciones monoespecíficas y coetáneas se observará que existen zonas de mayor productividad que el promedio, así como zonas de menor crecimiento. Así por ejemplo, las muestras tomadas cercanas a lomajes convexos ubicados en las cumbres

tendrán menor productividad que los fondos de quebradas del mismo rodal. Allí es muy probable que el factor crítico sea la disponibilidad hídrica en los períodos de crecimiento.

La mayoría de los datos biológicos y ecológicos tienen una representación espacial, continua o discreta, que determina la estructura del paisaje o ecosistema del que son parte. En general, el sitio podría entenderse como una variable regionalizada, esto es, una variable que se distribuye en el espacio de manera correlacionada (Pannatier, 1996). Ejemplos de variables regionalizadas son la profundidad de horizontes del suelo o la biomasa vegetal por unidad de superficie, así, si $Z(x)$ es el valor de la característica z en el punto x , $Z(x)$ es una variable regionalizada. Desde el punto de vista matemático una variable regionalizada es simplemente una función $Z(x)$ que adopta un valor para cada punto x del espacio (Samper y Carrera, 1990).

La característica esencial de las funciones aleatorias es que cada realización puede concebirse como la suma de una componente *estructurada* y otra aparentemente *errática*. En términos estadísticos, usando la técnica de análisis de varianzas de una vía, una variable aleatoria Z en el punto x esta definida como (Jongman *et al.*, 1995):

$$z(x) = b_0 + b_j + \varepsilon \quad [1]$$

Donde b_0 es la media general del atributo para toda el área, b_j es la diferencia entre la media de la sub-área j y la media general. Por otra parte, ξ es el error independiente y normalmente distribuido con media 0 y varianzas σ^2 . En la ecuación [1] b_j representa la variación espacial a "gran escala", y puede obtenerse por regresión lineal, superficial o cúbica de los datos observados. Esta técnica es conocida como *análisis de tendencias superficiales* porque se aplica a datos obtenidos de un espacio bidimensional, siendo un caso especial de regresión lineal múltiple en la cual la variable de interés, Z , se regresa en función de las variables de posición (x,y) . La línea, superficie, o volumen resultante representa el cambio espacial gradual, a gran escala, del atributo Z . La variación a pequeña escala, o componente aleatorio ξ , se representa por las desviaciones de la regresión o errores del modelo (Jongman *et al.*, 1995). Un análisis consistente de los fenómenos naturales debería considerar ambos aspectos, estructurado y errático.

Existen innumerables razones por las cuales es conveniente medir la calidad del sitio, ya sea para predecir el crecimiento, planeamiento de cosechas, medidas de conservación y mitigación ambiental entre otros.

Existen cuatro **factores** que determinan ampliamente el rendimiento y crecimiento de los rodales de una especie o composición de especies:

- 1) Edad del rodal,
- 2) La calidad de sitio
- 3) La densidad del rodal y,
- 4) Tratamientos silviculturales

Los efectos de los factores competitivos son de menor importancia en la evaluación del sitio por ser transitorios y pueden ser alterados por tratamientos silvícolas. La idea fundamental es aislar el efecto del sitio en condiciones estables de edad, de densidad y de tratamientos silviculturales.

2.- Clasificación del sitio

Los sitios pueden ser clasificados de manera **cuantitativa** y **cuantitativa**. Siempre que sea posible es preferible una clasificación cuantitativa para evitar la subjetividad. En el contexto de la producción de

madera, la **calidad de sitio** se usa para definir el **potencial para producir madera** dada una especie o un tipo forestal. Esta definición de calidad de sitio tiene sentido sólo para *la* o *las* especies y sus condiciones de manejo específicas. Lo que es bueno para una especie no necesariamente lo es para otra.

Es esencial medir e interpretar el sitio con fidelidad ya que en conjunto con la densidad del rodal, controla el tamaño, cantidad y valor de los productos. El sitio debe ser **mapeado** para el manejo de los bosques. Estos mapas son la base del pronóstico del rendimiento, la regulación y las intervenciones silvícolas de los rodales.

La **calidad de un sitio** puede ser **medida** ya sea a través de **los factores** que definen el crecimiento de un rodal o a través de su **respuesta**. De cualquier modo son interactuantes: la respuesta modifica el ambiente y vice-versa.

Las dos formas de evaluar el sitio son:

- **Midiendo uno o más factores** considerados **asociados** con el crecimiento de los árboles. De ésta manera, se intenta evaluar el sitio en términos de los factores causales en sí mismos.
- **Midiendo alguna característica de los árboles** o la vegetación menor considerada sensible al sitio. Este enfoque evalúa el efecto del ambiente en la vegetación.

3.- Medición de los factores asociados con el crecimiento

De los numerosos factores ambientales que afectan el crecimiento de los árboles, aparentemente el más importante es el **suelo**. Sin embargo, las características significativas en el crecimiento de los árboles no siempre son las mismas. La humedad, textura, profundidad, cantidad de arcilla en el horizonte A y B, nivel de nutrientes y temperatura tienen diferentes efectos proporcionales, dependiendo de la clase de suelo y especie.

Una evaluación del sitio a partir de las características del suelo tiene dos ventajas fundamentales:

- Puede ser hecha **independientemente** de la presencia o ausencia del bosque,
- El suelo es comparativamente **estable** y su gradiente de cambio espacial es baja.

Desgraciadamente, es difícil establecer las características de suelo más importantes que afectan el crecimiento. Por esta razón, el uso de las características del suelo *per se* tiene limitaciones como indicador de la productividad. Las investigaciones generalmente consisten en relacionar la altura del rodal (como indicador del sitio) con los factores del suelo.

Es común encontrar relaciones funcionales que estiman la altura del rodal en función de la edad y factores ambientales significativos las cuales requieren de grandes bases de datos para alimentar y formular los modelos. En términos prácticos, su uso es a veces inoperante o poco eficiente, ya que la sola medición de los factores predictores del sitio resulta muy costosa.

Cuando se intenta definir el sitio en **grandes agregaciones de superficie**, tales como regiones geográficas o grandes cuencas es común utilizar la **información climática** (precipitación, número de días nublados, número de heladas, temperatura media máxima del verano, temperatura mínima media en invierno) y mapas de suelo al nivel de asociaciones y/o fases. Con esta información es posible conseguir una buena **estratificación preliminar** de la población que permite realizar la toma de muestras y luego la modelación del sitio (García, 1970).

4.- Medición a través de las características de la vegetación

Las características de la vegetación que se pueden medir, en relación con la calidad del sitio son:

- **La cantidad de biomasa producida**
- **Especies indicadoras**
- **Alguna variable simple de tamaño del rodal**

Cantidad de biomasa producida

Dado que el concepto de sitio se refiere a productividad, su más directa medida es la cantidad de biomasa que crece en un área en un período de tiempo dado. Sin embargo, la evaluación de sitio hecho de esta manera es de limitado valor práctico, ya que es costoso, compleja y no exento de errores de medición o de estimación. Además depende de la especie, la densidad y las prácticas silvícolas anteriores.

En bosques donde se han establecido regímenes de manejo y son aplicados consistentemente, es posible usar esa información volumétrica como indicador de la calidad de sitio. Es el caso de los bosques de Nueva Zelandia y Australia en pino insigne (Lewis, N, and Ferguson I. 1993). En el caso chileno aún no se han establecidos regímenes estandarizados por largo tiempo para poder emplearlos.

La capacidad del sitio para producir biomasa depende de:

- Fluctuaciones estacionales y continuas en el complejo de factores atmosféricos y de suelo que constituyen en sitio.
- La composición de especies del rodal en el sitio.
- El manejo del rodal.

De esta manera, un sitio plantado tiene una capacidad productiva sólo en términos de una especie dada. El objetivo de estratificar un bosque en calidades de sitio es distinguir las tasas de crecimiento de sus rodales.

Las especies indicadoras

Este sistema está basado en la teoría que señala que ciertas especies llamadas “plantas indicadoras” reflejan la calidad del sitio para una determinada especie o tipo forestal, lo cual es razonable ya que la composición de especies refleja la fertilidad del suelo y es a menudo un buen indicador de disponibilidad de humedad de suelo en los horizontes superiores.

Los sistemas de clasificación de sitio basados en este concepto han resultado exitosos en rodales relativamente poco alterados (bosques extensos de muy simple composición). En Suecia se han mapeado 8 zonas y 24 índices de sitio para las distintas especies nativas en las cuales se describen entre otros aspectos el tipo de vegetación que ocupa el sotobosque (Nilsson, N. 1990)

Las limitaciones de la aplicabilidad del sistema son:

- Requiere considerable conocimiento ecológico y botánico
- Está restringido a bosques de composición simple (ej.: bosques boreales y australes)
- La vegetación menor está afectada por la composición del dosel superior, la densidad y las prácticas silvícolas anteriores
- La vegetación menor es de raíces poco profundas y puede ser independiente de las condiciones que ocurren en horizontes de suelo más profundos y que afectan el crecimiento de los árboles

A pesar de ello, las plantas indicadoras pueden ser de ayuda en la evaluación del sitio.

Alguna variable simple de tamaño del rodal

Determinación de la curva altura-edad

La variable de tamaño más usado es la **altura del rodal**. El diámetro es poco fiable dado que es muy sensible a la densidad del rodal (Husch, 1993). Para muchas especies, el crecimiento en altura de los árboles más grandes en el rodal está correlacionado con la capacidad productiva del sitio y es poco afectado por la densidad del rodal y las cortas intermedias. Naturalmente se verá afectado en los inusuales raleos “por lo alto”. Por ello, la altura predominante del rodal y sus expresiones equivalentes (altura “top”, altura media dominante) son las más comúnmente usadas para clasificar sitios.

La relación de ésta altura con la edad “a una edad constante” y denominada edad clave es ampliamente usada en la evaluación de calidad del sitio. En rodales coetáneos puros es llamado índice de sitio.

El éxito del índice de sitio se debe a que:

- La altura es un componente del volumen, y por lo tanto es proporcional a éste
- La altura y la edad son fáciles de determinar
- El crecimiento en altura está poco afectado por la densidad del rodal
- El índice de sitio provee una expresión numérica para la calidad de sitio

Nota: La calidad de sitio en términos de volumen puede ser medida a través de índices de productividad. El índice de sitio se refiere sólo a un factor de la calidad del sitio y altamente correlacionado con él.

La relación entre la altura y la edad, en bosques coetáneos puros originados de monte alto -para un sitio constante-, siempre tiene la forma de una curva sigmoídea. Para definir los parámetros del modelo de crecimiento se puede utilizar información de parcelas temporales, parcelas permanentes, análisis de tallo o una combinación de ellos. Lo ideal es medir parcelas permanentes. Si ello no es posible se puede utilizar análisis de tallo y finalmente si tampoco es posible, se puede utilizar parcelas temporales. Esa jerarquía en la selección de la información tiene que ver con la calidad de la información base y de los supuestos con que se construyan los modelos.

Métodos de medición

Si sólo se dispone de parcelas temporales se puede seguir el siguiente procedimiento:

- a.- Establecer parcelas temporales, cubriendo todo el rango de sitios y edades en los rodales mayores a 6 u 8 años. Se deben excluir plantaciones inferiores a esa edad dado que se ven afectados muy fuertemente por otras condiciones ajenas al sitio mismo, tales como calidad de la plantación, condiciones climáticas, daños por animales etc.
- b.- Determinar la altura predominante en cada parcela
- c.- Plotear la altura predominante vs edad y
- d.- Ajustar las curvas

Para usar este método es imprescindible probar que no existe correlación entre el índice de sitio y la edad, ya que de otra manera sesgaría la estimación (García, 1970)

Otra alternativa es establecer unidades de muestreo semi-permanentes y medir la altura predominante varias veces en un período de hasta 10 años para dar alguna idea de la tendencia altura edad sobre un rango de sitios y edades. Este procedimiento provee mejor evidencia que una simple nube de puntos. Si se asume que los árboles predominantes siempre lo han sido en el desarrollo del rodal, y es posible medir los anillos de crecimiento anual, entonces es posible construir directamente las curvas altura edad mediante análisis de tallo (Corvalán et al., 1987)

La edad clave debe ser tal que, por un lado el rodal haya completado su etapa de desarrollo lineal y esté cerca de alcanzar su máximo potencial y por otro lado, la edad no debe ser demasiado alta que restrinja la base de datos a emplear. Un buen criterio es $2/3$ de la edad de rotación. En pino insignie en Chile se utiliza 20 años (García, 1970) y en canelo 35 años (Corvalán, et al., 1987).

Existen tres tipos de curvas altura vs edad de acuerdo a la naturaleza que ellas tengan:

- Curvas anamórficas. En este tipo, la altura de cualquier curva en la familia es una proporción constante de la altura de cualquier otra curva a la misma edad
- Curvas polimórficas disjuntas. La proporcionalidad no existe entre curvas, pero ellas nunca se cruzan en el rango de edades de interés
- Curvas polimórficas no disjuntas. La proporcionalidad no existe entre curvas, pero ellas se cruzan en el rango de interés.

Cuanto más completa y conocida es la relación altura edad, es más confiable decidir que tipo de curva es.

Las funciones más conocidas para el ajuste son:

- Chapman-Richards
- Von Bertalanffy,
- Schumacher.

Método de intercepción de crecimiento

Una alternativa para evaluar el sitio basado en datos de altura del rodal es usar la información de su crecimiento en un corto período de tiempo. Es posible sólo si se conoce el patrón de elongación anual, para poder medir el período y su elongación.

Los valores de intercepción de crecimiento pueden ser utilizados directamente como indicador de sitio o para estimarlo como función lineal del crecimiento periódico en altura. Este método evita la medición directa de la edad, si se tiene un período común y reconocible para medir la elongación del período.

Método para utilizar el Índice de Sitio una vez construido

Una vez construidas las curvas de índice de sitio, cualquiera sea su modelo y forma de construcción, se debe: i) tomar una muestra válida estadísticamente de unidades muestrales, idealmente sistemáticas en un arreglo en retículo cuadrado para cubrir toda el área de estudio, ii) determinar la altura en cada punto de la grilla y, iii) ubicar para cada punto la relación altura predominante vs edad y buscar en la familia de curvas la más cercana a ese punto. Esa será su índice de sitio. Cada punto tendrá un índice de sitio que variará de acuerdo a las condiciones de crecimiento que tenga.

Para rodales multietáneos esta relación no puede ser utilizada, dado que no existe una edad del rodal sino más bien un desarrollo en tamaño. Por ello se utiliza la relación altura vs DAP en árboles dominantes y se fija un diámetro normal clave (DAP clave) para la especie de interés. En este sentido la capacidad del sitio se expresa en el desarrollo en altura que alcanza una especie para lograr un DAP determinado.

Análisis de casos

A continuación se presentan dos estudios de casos utilizados en Chile, para construir curvas de índice de sitio:

- Construcción de índices de sitio para pino insigne en Chile** (García, 1970). Este estudio se basó fundamentalmente en información de 1.299 parcelas temporales obtenidas en inventarios forestales efectuados entre la V y la X Región, en la década de los '60. Se utilizó la altura y la edad del rodal medida sobre los árboles dominantes. El área de estudio fue estratificada en diez zonas considerando para su clasificación mapas climáticos, grandes grupos de suelo e información preexistente de índices de sitio (Figura 1). En cada zona se ajustó un conjunto de ecuaciones altura vs edad las cuales fueron comparadas mediante el índice de Furnival y se seleccionó como modelo general el propuesto por Schumacher (García, 1970) Los coeficientes de este modelo fueron probados estadísticamente y se establecieron dos grupos o familias de curvas, generándose a partir de ellas curvas armónicas (Figura 2). Para la construcción de los índices de sitio se eligió la edad clave de 20 años.

Figura 1

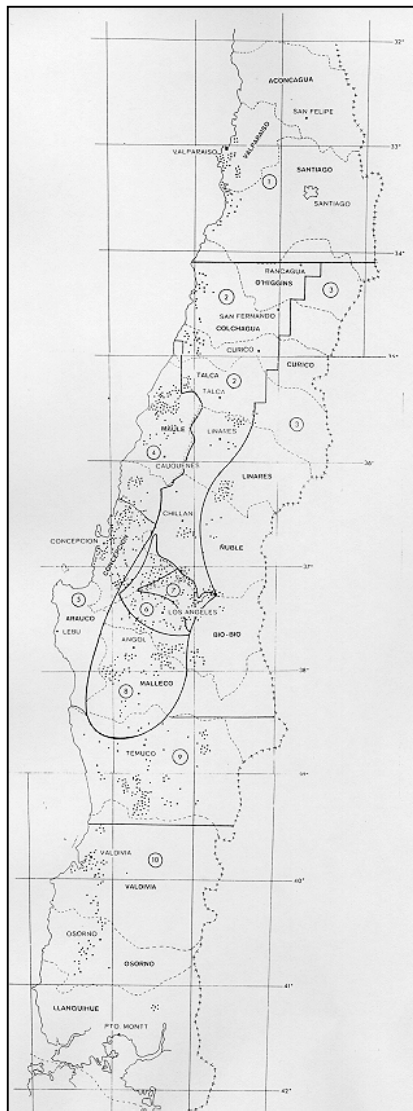
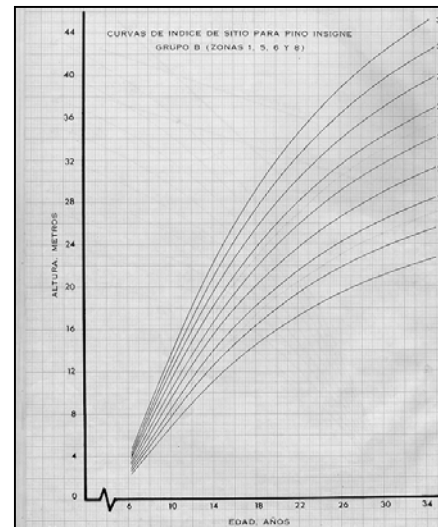
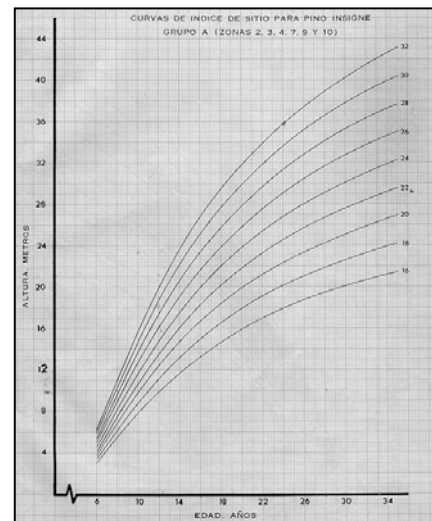


Figura 2



- Construcción de índices de sitio para Canelo en la Décima Región (Corvalán et al. 1987).** El estudio se basó en información de 139 parcelas temporales de 100 m² c/u agrupadas en 61 conglomerados de puntos distribuidos sistemáticamente en dos zonas (Continental e Insular) de la Décima Región (Figura 3) sobre unas 400.000 ha, medidas en 1986. La muestra dasométrica se materializó en renovales donde predominara la especie Canelo (*Drimys winteri* Forst.) con descriptores ambientales equivalentes a las descritas en los puntos de selección. La población se dividió de acuerdo a series de suelo, resultando un total de 10 estratos. En cada parcela se obtuvo una muestra dendrométrica. Se utilizó la altura y edad media de los 500 árb/ha de mayor DAP para realizar un análisis de tallo y reconstruir las series cronológicas de desarrollo en altura total suponiendo dominancia estable en el tiempo de esos árboles en el rodal. Éstos fueron volteados y trozados con criterio de minimizar la diferencia de edades entre rodelas sucesivas (Corvalán et al. 1987). Cada serie cronológica fue ajustada a un modelo exponencial modificado que resultó de la selección de cinco modelos. Los criterios de agrupación de parcelas resultó de comparar estadísticamente el parámetro de forma del modelo entre parcelas. Los niveles de agrupación fueron jerarquizados de menor a mayor tamaño en la población: parcelas, conglomerados, estratos y zonas de manera que en cada comparación se fueron agregando grupos homogéneos resultando finalmente 6 grupos. Cada grupo generó una familia de curvas armónicas a partir de la curva guía (Figura 4). Para la construcción de los índices de sitio se eligió la edad clave de 35 años.

Figura 3

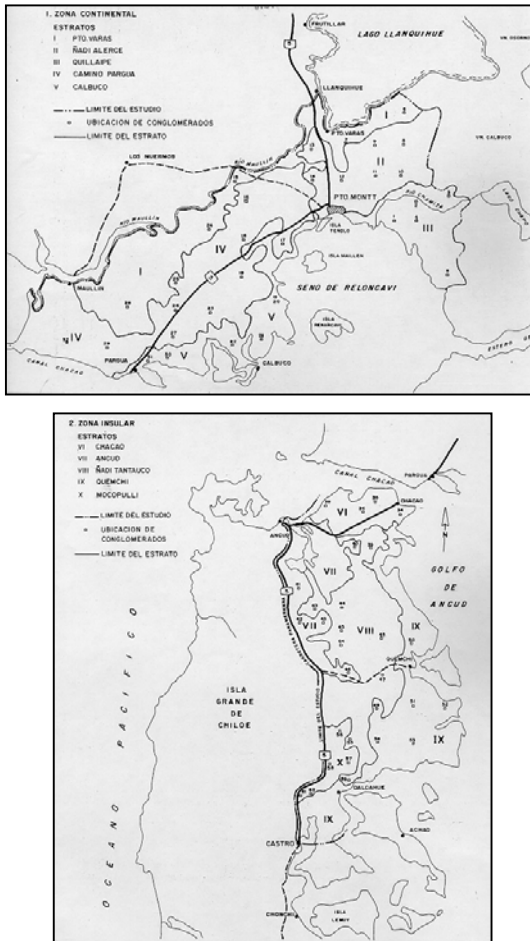
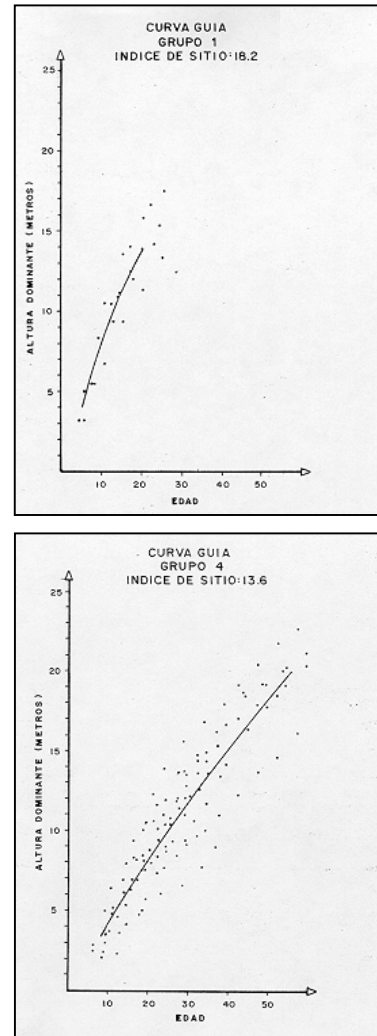


Figura 4



Referencias Bibliográficas

- Corvalán, V., Araya, L., Calquín, R., Loewe, V. y Niebuhr, S. El Canelo: Una alternativa de desarrollo forestal para la X Región. Volumen IV. RESULTADOS. Universidad de Chile. Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales. Ministerio de Agricultura. FIA. 1987
- Corvalán, P, Gouet R. y Reyes, C. 1998.- Modelo geoestadístico para estimaciones espaciales y su aplicación al manejo sustentable de plantaciones de pino insigne actas primer congreso latinoamericano IUFRO. El Manejo Sustentable de los Recursos Forestales, Desafíos del Siglo XXI. Valdivia, Chile.
- García, O. 1970.- Indices de sitio para pino insigne en Chile. Instituto Forestal. Serie de Investigación Publicación N° 2, Santiago. Chile.
- Husch, B., Miller, C. and Beers, T. 1993. Forest Mensuration. Krieger Publishing Company, Third Edition Malabar, Florida.
- Jongman, R.H, Ter Braak, C.J. y Van Tongeren, O.F. 1995. Data Analysis in Community and Landscape Ecology. Cambridge University Press.
- Lavery P, 1986. Plantation Forestry with *Pinus radiata* Review Papers. Paper N° 12. School of Forestry. University of Canterbury. Christchurch, New Zealand
- Lewis, N.B. and Ferguson, I.S. 1993. Management of Radiata Pine. Inkata Press. Melbourne, Sydney. Australia
- Nilsson, N. 1990. The Forests. National Atlas of Sweeden. © SNA. Italy
- Pannatier, Y. 1996. Variowin, Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer. 91 pp.
- Samper, J y Carrera, J. 1990. Geoestadística, Aplicaciones a la Hidrología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona. 484 pp.