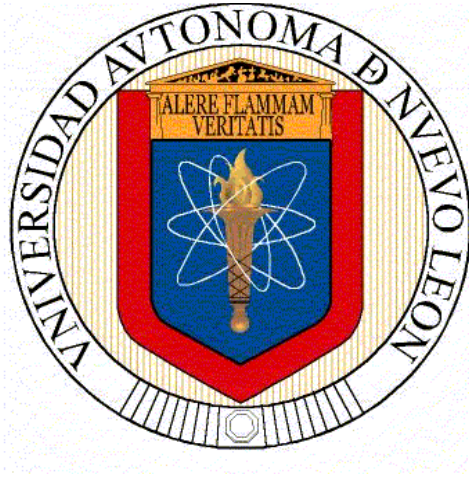


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**TESIS**

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DE *Pinus Teocote* Schldl.  
& Cham. EN SIERRA DE ÁLVAREZ, SAN LUIS POTOSÍ.**

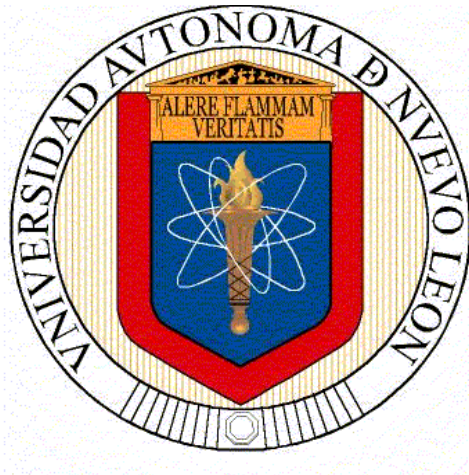
**POR**

**MARCO ANTONIO DÁVILA LARA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**NOVIEMBRE, 2015**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**TESIS**

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DE *Pinus Teocote* Schldl.  
& Cham. EN SIERRA DE ÁLVAREZ, SAN LUIS POTOSÍ.**

**POR  
ING. MARCO ANTONIO DÁVILA LARA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAestrÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO.

NOVIEMBRE, 2015

UNIVERSIDA AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DE *Pinus Teocote* Schldl.  
& Cham. EN SIERRA DE ÁLVAREZ, SAN LUIS POTOSÍ.

TESIS DE MAESTRÍA

Para obtener el grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

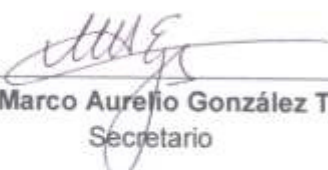
Por:

Ing. Marco Antonio Dávila Lara

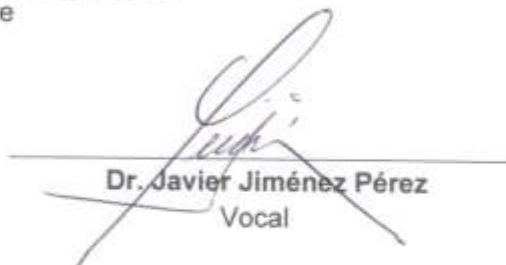
COMITÉ DE TESIS



Dr. Óscar Alberto Aguirre Calderón.  
Presidente



Dr. Marco Aurelio González Tagle.  
Secretario

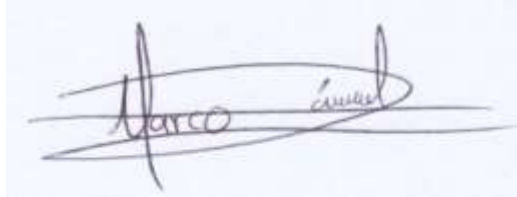


Dr. Javier Jiménez Pérez  
Vocal



Dr. Jorge Alberto Flores Cano.  
Asesor externo

Declaro que la presente investigación es original y se desarrolló para obtener el título de Maestría en Ciencias Forestales. Donde se utilizó información de otros autores, se otorga los créditos correspondientes.

A handwritten signature in black ink on a light blue background. The signature is stylized and appears to read "Marco Antonio Dávila Lara".

---

**Ing. Marco Antonio Dávila Lara**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico para la realización y culminación de mis estudios de posgrado.

Agradezco al Dr. Óscar Alberto Aguirre Calderón, por su apoyo, su comprensión, su generosidad, su amabilidad, su motivación y los conocimientos transmitidos hacía mi persona para fomentar mi formación científica.

Agradezco al Dr. Marco Aurelio González Tagle por sus consejos, sus pertinentes revisiones, sus acertados comentarios y su agradable compañía en el proceso de la investigación ya que sin estas no habría sido posible la elaboración de este escrito.

Agradezco al Dr. Javier Jiménez Pérez por sus conocimientos transmitidos, su guía, por facilitar el uso del equipo y del laboratorio para el análisis de muestras y sus consejos para la elaboración de este trabajo de investigación, también por sus atenciones brindadas durante el tiempo de este.

Agradezco al Dr. Jorge Alberto Flores Cano por el apoyo y las facilidades dadas para la recolección de datos en campo, por el impulso en este camino, por los consejos dados, por las palabras de aliento y por siempre estar atento a la evolución de este trabajo y claro por su amistad.

Al Dr. Fortunato Garza Ocañas por el apoyo brindado en todo momento y las palabras de aliento para no decaer en los momentos más críticos de esta investigación y por el impulso para salir adelante.

A mí ahora esposa Aracely por aguantarme, preocuparse y siempre tener esa palabra de aliento que necesitaba para seguir adelante.

A mi familia por aguantarme y darme siempre el apoyo de eso que siempre hemos sido una familia y la mejor.

A mí casi hermano Julio "Maya" por el apoyo en la toma de datos, en las salidas de campo y en las buenas aventuras vividas en esta etapa.

Agradezco a la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, por haberme abierto sus puertas para el desarrollo y culminación de mis estudios de posgrado.

## DEDICATORIAS

Para mi mamá Irma Lara Rodríguez, el motor primario que ha impulsado todo lo que hago y todo lo que soy, por siempre apoyarme y siempre tener las palabras exactas de aliento.

Para mi abuelita “Cuca” (†) que desde donde quiera que este, me ha sabido guiar por el buen camino para ser la mejor versión de mí.

Para mis hermanos Yazmin, Juan Carlos y José Eduardo, los cuales siempre están al pendiente de lo que hago para apoyarme en lo que pueden y en lo que no también.

A mis ahora cuñadas, Agnese y Fanny, por interesarse en lo que implica mi carrera y mi línea de investigación y siempre apoyarme.

Para mis sobrinos Wuera, Monin, Joel e Iñaki, que siempre me regalan una sonrisa o un comentario gracioso para poder lidiar con las cosas buenas y malas de los momentos de soledad gracias chiquillos.

Para mi nueva familia, a Don Hugo, Doña Lupita, a Hugo y a mi tía Ana, puesto que siempre han estado apoyándome a donde quiere que vaya, con sus consejos, sus palabras y por la confianza puesta en mí para salir adelante.

Para Silvia, Miguel, Paty y Alejandro que siempre están al pendiente de todo lo que hago y de donde ando gracias por las atenciones siempre brindadas.

Para mi esposa Aracely por estar siempre conmigo, por no abandonarme en ningún momento, por siempre asegurarme que todo estará bien, por siempre tener la razón, por ser mi amiga y mi compañera de vida y por siempre preocuparse por mí y por mi trabajo y claro por acompañarme en las aventuras que este trabajo de investigación implico.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT .....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. HIPÓTESIS .....	3
3. OBJETIVOS .....	3
4. ANTECEDENTES.....	4
4.1 Situación forestal en México.....	4
4.2 Situación forestal de San Luis Potosí.....	6
4.3 Bosque de Coníferas.....	7
4.4 Distribución del género <i>Pinus</i> en México.....	8
4.4.1 Distribución de <i>Pinus teocote</i> en México.....	9
4.4.2 Distribución del género <i>Pinus</i> en San Luis Potosí.....	10
4.4.3 Descripción de la especie <i>Pinus teocote</i> .....	10
4.5. Modelos de índice de sitio y calidad de estación.....	11
5. Definición y conceptos.....	16
5.1. Calidad de sitio.....	16
5.2. Productividad.....	16
5.3. Índice de sitio.....	17
5.4. Ecuaciones de índice de sitio.....	17
5.5. Crecimiento.....	18
5.5.1. Crecimiento en altura.....	18
5.5.2 Crecimiento en diámetro.....	19
5.6. Modelos matemáticos.....	19
5.6.1. Importancia de los modelos.....	20
5.7. Métodos para estimar el índice de sitio.....	21
5.7.1. Método de la curva guía.....	21
5.7.2. Método de la diferencia algebraica.....	21
5.7.3. Método de la predicción de parámetros.....	22

5.8. Método del índice de sitio.....	22
5.9. Curvas de índice de sitio .....	23
5.10. Curvas anamórficas.....	23
5.11. Validación de modelos.....	24
5.12. Incremento Corriente Anual (ICA).....	25
5.13. Incremento Medio Anual (IMA). .....	25
6. Materiales y Métodos.....	26
6.1. Área de estudio .....	26
6.2. Selección y medición de árboles muestras .....	27
6.3. Toma de virutas troncales .....	28
6.4. Medición de la edad de los árboles.....	29
6.5. Modelos de altura dominante-edad.....	30
6.6 Elaboración de las tablas de producción para los diferentes índices .....	33
6.7. Obtención del ICA, IMA y sus puntos máximos .....	33
6.8. Comparación con otros estudios .....	34
7. Resultados y discusión .....	35
7.1. Evaluación de modelos.....	35
7.2. Análisis de residuales .....	36
7.3. Curvas de índice de sitio .....	37
7.4. Tablas de producción .....	38
7.5. Obtención del IMA, ICA y sus valores máximos.....	40
7.6 Discusión.....	42
8. Conclusiones .....	47
9. REFERENCIAS. ....	48
10. ANEXO.....	53



## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Tabla 1.</b> Estadística descriptiva de árboles seleccionados para el estudio (n=250).....	277
<b>Tabla 2.</b> Parámetros estimados y medidas de bondad de ajuste del modelo de Schumacher. ....	35
<b>Tabla 3.</b> Coeficientes de regresión para cada variable .....	38
<b>Tabla 4.</b> Tabla de producción en pie para <i>Pinus teocote</i> Schltdl. & Cham., índice de sitio 19. ....	388
<b>Tabla 5.</b> Tabla de producción en pie para <i>Pinus teocote</i> Schltdl. & Cham., índice de sitio 15. ....	39
<b>Tabla 6.</b> Tabla de producción en pie para <i>Pinus teocote</i> Schltdl. & Cham., índice de sitio 11. ....	399

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Cobertura de áreas forestales en México, 2002. ....	5
<b>Figura 2.</b> Distribución de <i>Pinus teocote</i> en México (colaboración de Farjon, Pérez de la Rosa y Styles 1997). ....	9
<b>Figura 3.</b> Ubicación de la UMA “San Rafael” y del paraje “La Alameda”, Rioverde, San Luis Potosí. ....	266
<b>Figura 4.</b> Procedimiento de extracción de viruta. ....	28
<b>Figura 5.</b> Secuencia en la que se asignan los años a los anillos de crecimiento en las virutas. ....	29
<b>Figura 6.</b> Relación altura dominante – edad para los árboles muestras (n=250). ....	31
<b>Figura 7.</b> Curva guía obtenida del modelo Schumacher. ....	355
<b>Figura 8.</b> Pruebas de normalidad para la distribución de residuales del modelo de Schumacher. ....	376
<b>Figura 9.</b> Sistema de curvas de índice de sitio desarrolladas para bosques naturales de <i>Pinus teocote</i> . ....	377
<b>Figura 10.</b> Incremento medio anual e Incremento corriente anual para <i>Pinus teocote</i> para bosques naturales al sureste del estado de San Luis Potosí. ....	41
<b>Figura 11.</b> Incremento corriente anual para <i>Pinus teocote</i> para los índices de sitio 19, 15 y 11 en un bosques naturales al sureste del estado de San Luis Potosí. ....	411
<b>Figura 12.</b> Incremento medio anual para <i>Pinus teocote</i> para los índices de sitio 19, 15 y 11 en un bosques naturales al sureste del estado de San Luis Potosí. ....	422
<b>Figura 13.</b> Comparación gráfica del sistema de curvas anamórficas: a) Bosques naturales del oriente de Hidalgo y b) Bosques naturales al sureste de San Luis Potosí. ....	433
<b>Figura 14.</b> Comparación gráfica del sistema de curvas anamórficas: a) Bosques naturales del noreste de México usando el modelo Chapman-Richards y b) Bosques naturales al sureste de San Luis Potosí usando el modelo Schumacher. ....	444

## RESUMEN

Uno de los problemas más relevantes en el manejo de bosques naturales es la falta de ordenamiento de los rodales en función de su capacidad productiva. Para apoyar decisiones de manejo en bosques naturales de *Pinus teocote*, se estimaron curvas de índice de sitio de tipo anamórfico en el sureste de San Luis Potosí. La información requerida se obtuvo a través de un muestreo dirigido sobre 250 árboles dominantes para la reconstrucción de los patrones de desarrollo de la relación altura dominante-edad para árboles individuales. Para cada individuo se midieron las variables, altura total y diámetro altura de pecho (DAP). Para el conteo y la obtención de la edad a la altura del DAP se utilizó el método del fechamiento cruzado. Para la construcción de curvas de índice de sitio de tipo anamórficas, se consideraron modelos de dos y tres parámetros. Los modelos evaluados de dos parámetros fueron Schumacher y Weber, y los modelos de tres parámetros fueron Weibull II y Chapman-Richards. Con base en medidas de bondad de ajuste, el modelo de Schumacher fue el que presentó mejores indicadores con un  $R^2_{\text{ajustado}}$  de 0.66 y el CME con un valor de 5.12. Después de obtener el índice de sitio, se utilizó la fórmula con la que se obtuvo cada uno para calcular los valores de la tabla de productividad y los valores de los Incremento Corriente Anual (ICA), Incremento Medio Anual (IMA) y la edad a la que se alcanzan los puntos máximos para cada índice de sitio, las tablas arrojan valores para diámetros cuadráticos de 20 cm de 400 árboles  $\text{ha}^{-1}$  y el volumen máximo fue de  $450.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , los valores para el ICA fueron de 0.71, 0.56 y  $0.41 \text{ m año}^{-1}$  a la edad de 11 años y de IMA de 0.48, 0.38 y  $0.28 \text{ m año}^{-1}$  a los 22 años, para los índices de sitio 19, 15 y 11 sucesivamente. Las curvas de índice de sitio y las tablas de producción fueron comparadas gráficamente con el modelo desarrollado recientemente para la misma especie por Aguirre (2013) y Hernández *et al.* (2014).

## ABSTRACT

One of the most important in the natural forest management problems is the lack of planning of stands according to its productive capacity. To support management decisions in natural forests of *Pinus teocote* index curves anamorphic site in southeastern San Luis Potosi type were estimated. The required information was obtained through a purposive sampling of 250 dominant trees for the reconstruction of the development patterns of the dominant age-height ratio for individual trees. For each individual variables, total height and diameter breast height (DBH) were measured. For counting and obtaining the age at the height of DAP cross dating method it was used. To build site index curves anamorphic type models two and three parameters were considered. The models were evaluated on two parameters Schumacher and Weber, and three-parameter models were Weibull and Chapman-Richards II. Based on measures of goodness of fit Schumacher model was the best indicators presented with  $R^2$  ajustado 0.66 and the CME with a value of 5.12. After obtaining the site index, the formula with which were obtained for each table values productivity and values Annual Current (ICA) Increase, Annual Increment (MAI) and age was used which peaks are reached for each site index, shed tables squared values for 20 cm diameter 400 trees  $ha^{-1}$  and the maximum volume was  $450.3 m^3 ha^{-1}$  for the ICA values were 0.71, 0.56 and 0.41  $m year^{-1}$  at the age of 11 years and IMA 0.48, 0.38 and 0.28  $m year^{-1}$  at 22 years for site index 19, 15 and 11 on. The site index curves and tables of production were compared graphically with the recently developed model for the same species by Aguirre (2013) and Hernandez et al., (2014).

# 1. INTRODUCCIÓN.

La superficie territorial de México es de 196.4 millones de hectáreas, de estas una gran parte tiene potencial forestal. De acuerdo con el FRA 2005 de la FAO, México se ubica en el lugar 12 en cuanto a superficie forestal mundial. En el más reciente estudio sobre vegetación se estima que el país cuenta con 33.5 millones de hectáreas de bosques (FAO, 2005).

México posee una amplia diversidad de recursos forestales con un variado potencial productivo debido a diversos factores de tipo orográfico, climático, edáfico y fisiológico en que cada especie se desarrolla. Estos factores son los que definen la calidad de estación forestal, así, diferentes calidades de estación dan lugar a bosques con múltiples dinámicas (Gadow, 2007).

Los bosques de coníferas, que son frecuentes en las zonas de clima templado y frío del hemisferio boreal, también caracterizan muchos sectores del territorio de México, donde presentan amplia diversidad florística y ecológica. Se les encuentra prácticamente desde el nivel del mar hasta el límite de la vegetación arbórea (3100 msnm); prosperan en regiones de clima semiárido, semihumedo y húmedo y varios existen solo en condiciones edáficas especiales (Rzedowski, 2006).

En San Luis Potosí existen pocos pinares del lado de la Sierra Madre Oriental, pues solamente de los alrededores de Xilitla se citan escasas extensiones de bosques de *Pinus greggii*, frecuentemente con encinos y a veces con *P. teocote*. Más al poniente, sobre todo entre Rioverde y San Luis Potosí, se presentan algunas sierras relativamente elevadas (1500 a 2500 m) de naturaleza ígnea, donde existen superficies un poco más extensas, Cubiertas por masas de *P. teocote* y *P. arizonica* siendo las dominantes (Rzedowski, 1966). Aunque también se encuentran distribuidas otra especies como *P. devoniana*, *P. pseudostrobus* y *P. cembroides* (García y Aguirre, 2011).

El estado de San Luis Potosí, para el año 2004 contaba con una superficie forestal de 4´702,497 ha, de las cuales 454,852 ha pertenecen a bosques. Las

existencias maderables en bosques son de 24'701,734 m<sup>3</sup> rollo, el volumen autorizado para el estado fue de 332,272 m<sup>3</sup> (para bosques y selvas), y la producción forestal maderable de las especies de pino fue de 1760 m<sup>3</sup> rollo (PEFE-SLP, 2008).

La necesidad de calcular de la forma más precisa posible la capacidad productiva de los bosques prevalece desde que los aprovechamientos forestales empezaron a ser actividades productivas rentables en varios aspectos. Por lo tanto es indispensable conocer la productividad actual de éstas áreas e instrumentar nuevas alternativas de manejo para llegar a determinar el potencial de suelos forestales (Arteaga, 1985 citado por López, 2010).

El término calidad de sitio se utiliza para denotar la productividad relativa de un sitio para una especie forestal, lo cual permite realizar clasificaciones de la calidad del terreno según su potencial de producción (Clutter *et al.* 1983); La calidad de sitio es una herramienta básica que permite tomar en cuenta la capacidad productiva del bosque (Benavides, 1993).

El sitio se refiere al espacio físico en donde crece o puede crecer un rodal; y los factores climáticos, edáficos y bióticos asociados a esa área que determinan su capacidad productiva en términos de producción de madera (Clutter *et al.*, 1983).

El uso de la altura dominante, como indicador de la calidad de sitio ha demostrado ser el más adecuado para el manejo de plantaciones. Por otro lado, el desarrollo de la altura dominante no es afectado mayormente por la densidad o los tratamientos silvícolas aplicados (Álvarez *et al.*, 2004).

Una clasificación de las áreas forestales a través de índices de productividad se considera como fundamental para orientar los aprovechamientos forestales hacia un manejo sustentable (Hernández *et al.*, 2014). La asignación y planificación de esquemas de manejo silvícola estarán determinadas por la calidad del sitio. El estado de San Luis Potosí cuenta con una superficie importante de bosques naturales de *P. teocote*. Sin embargo, no se han realizado estudios que permitan estimar la capacidad productiva de los sitios.

## **2. HIPÓTESIS**

La productividad de *Pinus teocote* se puede estimar mediante el índice de sitio, así como de mediciones dasométricas adicionales.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 General.**

Estimar la productividad para *Pinus teocote* Schld. & Cham., mediante la relación edad y altura dominante, para su aprovechamiento.

### **3.2 Particulares.**

1. Modelar el crecimiento de *Pinus teocote* mediante modelos de 2 y 3 parámetros.
2. Construir un sistema de curvas anamórficas de índice de sitio.
3. Estimar el potencial productivo para *Pinus teocote* en San Luis Potosí para cada índice de sitio.

## 4. ANTECEDENTES.

### 4.1 Situación forestal en México.

Las coordenadas que enmarcan al territorio mexicano son: 14° 32´ y 32° 43´ N, limita al sur con la frontera de Guatemala y Belice y al norte con Estados Unidos de América; 86° 42´ y 118° 27´ W, limitando al este con el Golfo de México y al oeste con el Océano Pacífico. Su extensión territorial es de 1´964,375 km<sup>2</sup> de los cuales 1´959,248 km<sup>2</sup> son superficie continental y 5,127 km<sup>2</sup> corresponden a superficie insular, por lo que se ubica en el decimocuarto lugar entre los países con más territorio (INEGI, 2007a).

La situación geográfica de México, su variedad de climas, topografía e historia geológica han producido una de las riquezas biológicas más impresionantes del mundo. Se calcula que alrededor del 10% de la diversidad global de especies se concentra en el territorio mexicano, lo que lo convierte junto con Australia, Brasil, China, Colombia, Congo, Ecuador, E.U.A., Filipinas, India, Indonesia, Malasia, Madagascar, Perú, Papua-Nueva Guinea, Sudafrica y Venezuela, en uno de los llamados países “megadiversos” (Benitez y Bellot, 2003; SEMARNAT, 2005).

En cuanto al número de especies, México ocupa el primer lugar en riqueza de reptiles, segundo en mamíferos y cuarto en anfibios y plantas. El número total de especies descritas en el país se acerca a 65 mil, la fauna la integran más de 8 mil y la flora cuenta con poco más de 23 mil especies, con un nivel de endemismo superior del 40%. Destacan las familias de las cactáceas y las orquídeas, así como el género *Pinus* (SEMARNAT, 2006b).

Según el Inventario Forestal Periódico de 1994, México cuenta con 141.7 millones de hectáreas de superficie forestal, correspondiendo 30.4 millones a bosques, 26.4 millones a selvas, 58.4 a vegetación de zonas áridas, 4.1 millones a vegetación hidrófila y halófila y 22.2 millones a áreas perturbadas. Los estados con mayor superficie forestal son: Chihuahua (17.5 millones de ha), Sonora (14.5

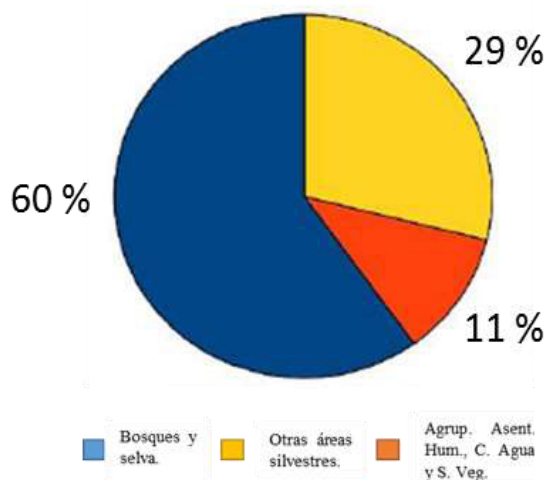


millones de ha), Coahuila (13.4 millones de ha), Durango (9.1 millones de ha) y Oaxaca (7 millones de ha) (SARH, 1994b).

En el año 2000 se estimó que las existencias nacionales eran de 2,803 millones de m<sup>3</sup> (SEMARNAT, 2000). Si asumimos que el stock toma 50 años promedio para formarse, podemos estimar que el crecimiento natural de los bosques de México es de 56 millones de m<sup>3</sup> anuales.

De acuerdo con el estudio FRA 2005 de la FAO, México se ubica en el lugar número 12 en cuanto a superficie forestal mundial. En el más reciente estudio sobre vegetación se estima que el país cuenta con 33.5 millones de hectáreas de bosque, 32.11 millones de hectáreas de selva, 58.08 millones de hectáreas de zonas áridas y semiáridas, 12 millones de pastizales (INEGI, 2005.)

Solo el 29% del territorio nacional puede considerarse no forestal, pues son cuerpos de agua, áreas pecuarias, agrícolas y urbanas (Figura 1). Las áreas forestales, es decir, aquellas que están cubiertas por bosques, selvas, matorrales xerófilos, pastizales, vegetación hidrófila áreas con otro tipo de vegetación y áreas sin vegetación aparente, comprenden más de dos tercios del territorio terrestre del país. El 60% de las áreas terrestres de México, están cubiertas por bosques y selvas y el 11% por otras áreas silvestres (INEGI, 2002).



**Figura 1.** Cobertura de áreas forestales en México, 2002.

A escala nacional, el principal grupo taxonómico de especies forestales maderables que es aprovechado son las coníferas. Para el 2004 se tuvo una productividad de 5,3 millones de m<sup>3</sup> rollo, seguidos de los encinos con 623 mil m<sup>3</sup> rollo (PEFE-SLP, 2008).

#### **4.2 Situación forestal de San Luis Potosí.**

El estado de San Luis Potosí presenta una riqueza biológica y cultural muy amplia; no obstante, no ha escapado a los procesos de degradación de los recursos naturales.

La extensión territorial del Estado representa el 3.12% de la superficie total nacional y dentro de su territorio se encuentran 13 tipos de vegetación, correspondientes a tres ecosistemas: zona árida, templado-fría y tropical (húmedo, subhúmedo y seco), siendo el resultado de la variación climática y fisiográfica presente. La vegetación de zona árida cubre el 60%, mientras que el bosque mesófilo y la selva alta, son los menos representados, con apenas el 3% (PEFE – SLP, 2008).

El estado de San Luis Potosí ocupa el noveno lugar nacional en biodiversidad, se han registrado alrededor de 2,500 especies de plantas vasculares, de las cuales 103 se encuentran en alguna categoría de riesgo, la mayor parte de estas especies pertenecen a la familia Cactaceae. En cuanto a fauna se han registrado 891 especies de vertebrados: 62 especies de peces, 41 de anfibios, 147 de reptiles, 487 de aves y 154 de mamíferos, encontrándose 218 en alguna categoría de riesgo, según las categorías de la NOM-159-SEMARNAT-2001 y de la IUCN-2007 (PEFE – SLP, 2008).

De acuerdo con el Inventario Nacional Forestal Periódico de 1994, el estado de San Luis Potosí se ubica en el lugar 14 en escala nacional en cuanto a superficie forestal, con 4.7 millones de hectáreas, y su producción maderable ocupó el lugar 18 a nivel nacional. Durante el periodo 2000 – 2004 el promedio de la producción forestal maderable fue de 10,410 m<sup>3</sup> rollo (PEFE – SLP, 2008).

El Estado ha sido dividido por el INEGI y el gobierno del estado en cuatro regiones: Huasteca, Media, Altiplano y Centro, y en diez microrregiones funcionales. Dentro de la zonificación se tiene que 3.7 millones de hectáreas, presentan condiciones apropiadas para ser zonas de producción y 962 mil hectáreas son terrenos con aptitud forestal dedicados a otros usos o en proceso de degradación. Otro tipo de zonificación son la cuatro Unidades de Manejo Forestal en el Estado, en donde las condiciones físicas, ambientales, sociales y económicas son similares para cada unidad (PEFE – SLP, 2008).

La deforestación y el nivel de alteración en las áreas forestales en la entidad es considerada como media. A nivel nacional, con respecto a la superficie perturbada, la entidad se coloca en el 21° lugar. Durante el periodo de 1993 a 2002, se perdieron de 35,268 a 164,587 ha de la superficie de vegetación natural, debido a que se dedicó a otros usos (PEFE – SLP, 2008).

La superficie ocupada por plantaciones forestales comerciales en el Estado correspondió a 13,437 ha durante el periodo de 1996-2007, utilizando especies de pino, cedro rojo, palma camedor, palo de rosa y caoba para la huasteca y lechuguilla en el altiplano.

#### **4.3 Bosque de Coníferas.**

En México las coníferas están presentes en diversos tipos de vegetación. De acuerdo con Rzedowski (1978) se encuentran en el bosque de pino, bosque de *Abies*, bosque de *Pseudotsuga* y *Picea*, bosque o matorral de *Juniperus* y bosque de *Cupressus* (= Callitropsis). Además, habitan en otros tipos de vegetación como el bosque mesófilo de montaña, bosque mixto (por ejemplo, bosque de pino-encino), matorral xerófilo y bosque de galería.

Según Flores *et al.* (1971), el conjunto de bosques de coníferas ocupa cerca de 15% del territorio del país y más de 9/10 de esta superficie corresponde a los *Pinus* o de *Pinus* y *Quercus*. Les siguen en importancia, en cuanto a la extensión,

los bosques de *Juniperus* y los de *Abies*, siendo lo restantes de distribución muy restringida y localizada (Rzedowski, 2006).

Gernandt y Pérez-de la Rosa (2009), mencionan que México es un centro secundario de diversificación del género *Pinus*, con 49 (40%) de las aproximadamente 120 especies en el mundo. La gran mayoría de los pinos mexicanos posee una distribución geográfica restringida al territorio de este país y a algunas áreas vecinas y casi todos constituyen elementos dominantes o codominantes en la vegetación actual.

#### **4.4 Distribución del género *Pinus* en México.**

Aunque la mayoría de las especies mexicanas de *Pinus* posee afinidad hacia los climas templados a fríos y semihúmedos y hacia los suelos ácidos, existen notables diferencias entre una especie y otra y algunas que no se ajustan a estas normas prosperan en lugares francamente calientes, en lugares húmedos, en los semiáridos, así como sobre suelos alcalinos (Rzedowski, 2006).

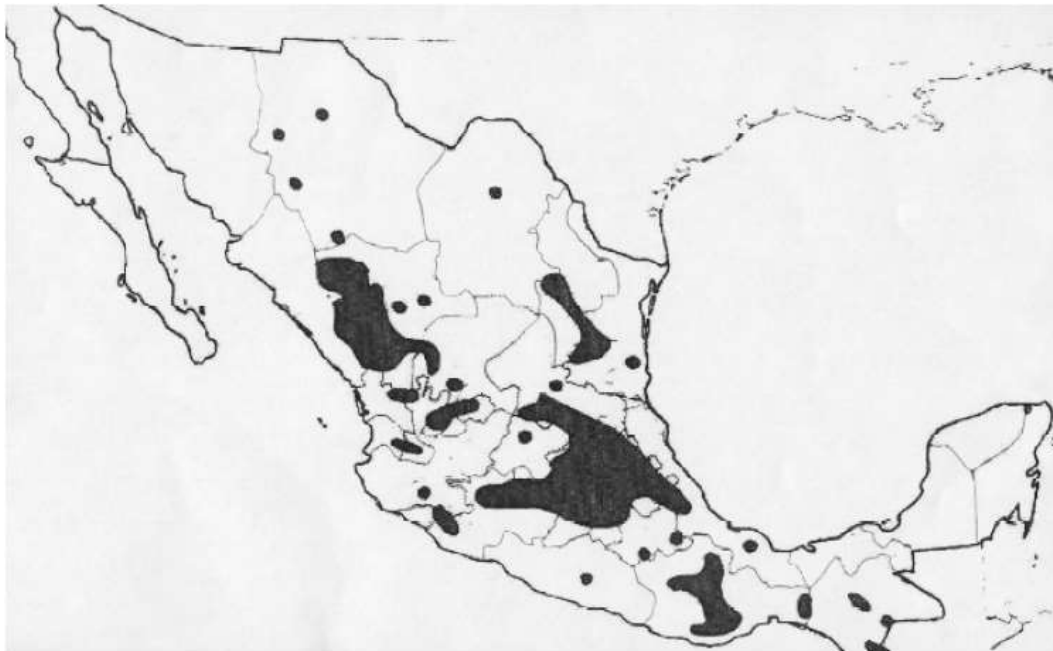
La distribución de las coníferas se ha documentado bien, tanto en monografías de géneros y catálogos (Liu, 1971; Farjon, 2010; Adams, 2011; Debreczy y Racz, 2011), como en floras y listados locales (Carvajal y McVaugh, 1992; Espinosa-Garduño, 2001; Garcia-Arévalo y Gonzales-Elizondo, 2003; Del Castillo *et al.*, 2004).

El noreste de México presenta la mayor riqueza de especies en el país. En Jalisco, la Sierra Madre occidental colinda con el Eje Volcánico Transversal, y coincidentemente resulta ser el estado más diverso, con 34 especies, seguido por otros estados en el occidente del país como los son Durango con 32 especies y Chihuahua con 29 especies. La Sierra Madre Oriental en el noreste de México contiene casi tantas especies como la Sierra Madre Occidental; los estados con mayor diversidad son Coahuila con 28 especies, Nuevo León con 24 e Hidalgo con 24. En el Sureste de México el estado más diverso es el de Oaxaca con 23 especies (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014).

#### 4.4.1 Distribución de *Pinus teocote* en México.

*Pinus teocote* es una de las especies ampliamente distribuidas en la República Mexicana, es más abundante en la parte central (Farjon y Styles, 1997). Su distribución abarca desde el sur de Chihuahua, en la Sierra Madre Occidental, hasta Chiapas. En la Sierra Madre Oriental abarca desde el sur de Coahuila, Nuevo León, Hidalgo, Estado de México y Puebla (Perry, 1991).

Los lugares en donde se ha reportado o colectado la especie ha sido en 24 estados de la república, entre los que se encuentran: Aguascalientes, Coahuila, Chiapas, Chihuahua, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Queretaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas (Caballero Deloya y Carrillo Sánchez, 1968; Eguiluz Piedra, 1978; Olvera Coronel, 1985; Farjon y Styles, 1997; Citado por Cruz-Juarez, 2004).



**Figura 2.** Distribución de *Pinus teocote* en México (colaboración de Farjon, Pérez de la Rosa y Styles, 1997).

#### **4.4.2 Distribución del género *Pinus* en San Luis Potosí.**

En San Luis Potosí (Rzedowski, 1966:184-186) existen pocos pinares del lado de la Sierra Madre Oriental, pues solamente de los alrededores de Xilitla se citan escasas extensiones de *P. greggii*, frecuentemente con encinos y a veces con *P. teocote*. Más al poniente, sobre todo en Rioverde y San Luis Potosí, se presentan algunas sierras relativamente elevadas (1500 – 2500 m) de naturaleza ígnea, donde existen superficies limitadas, aunque un poco más extensas, cubiertas por masas de *p. teocote* y *P. arizonica*, casi siempre con diversas especies de *Quercus* y a veces con *P. devoniana*.

Los pinares se localizan en la región sur este de la Sierra de Álvarez, esto es en las áreas con sustrato de origen ígneo; estos bosques suelen estar fisonómicamente dominados por alguna especie de pino y estar mezclados con encinos. Sin embargo, hacia la parte noreste de la Sierra de Álvarez, en el municipio de San Nicolás Tolentino existe un bosque perturbado de pino. A pesar de esta relación de los pinares y los encinares con uno u otro sustrato, ambos tipos de vegetación guardan semejanzas fisonómicas, ecológicas y florísticas (Rzedowski, 1961).

#### **4.4.3 Descripción de la especie *Pinus teocote*.**

*Pinus teocote* Schld. & Cham., su nombre común es ocote, es un árbol con una altura que va de 5 a 12 m, tronco recto, con hasta 30 cm de diámetro; copa redondeada, con ramillas ásperas, de color moreno rojizo (García y Aguirre, 2011).

Corteza en placas más o menos rectangulares, de color castaño rojizo a oscuro. Hojas aciculares agrupadas en dos o tres, raramente cuatro por fascículo, de 5 a 18 cm de longitud, gruesas rígidas y tiesas, verde brillante o ligeramente amarillentas, vaina persistente, de 10 a 15 mm de longitud, de color castaño obscuro (García y Aguirre, 2011).

Cono de forma ovoide-cónica, de 1.7 a 7 cm de longitud, de color castaño oscuro, casi simétrico o algo asimétrico, reflexos, dispuestos en pares, en grupos de 3 o solitarios, pedúnculo de 2 a 15 mm de longitud o subsésil (García y Aguirre, 2011).

Escamas de 1.5 a 2 cm de longitud, de 0.8 a 1 cm de ancho; apófisis aplanadas o ligeramente protuberantes; cúspide con espina corta caediza; umbo dorsal generalmente aplanado. Semilla de 2 a 6 mm de longitud, con ala de 4 a 17 mm de longitud de color oscuro Hábitat, en bosque de encino-pino, pino-encino y piñonar, sobre sustrato de origen ígneo (García y Aguirre, 2011).

#### **4.5. Modelos de índice de sitio y calidad de estación.**

Orantes (1980) determinó la calidad de estación, para conocer el comportamiento de *Pinus hartwegii* relacionándolo con características edáficas de la localidad y correlacionando las variables dasométricas entre sí observándose que se encuentran íntimamente ligadas. La técnica de muestreo se enfocó, a masas puras y coetáneas de *P. hartwegii* cubriéndose diversas edades del turno. Los sitios utilizados fueron de forma circular, de 0.10 ha. Para la toma de datos de suelo y el levantamiento de los perfiles, se procedió a la apertura del perfil en el centro de cada uno de los 50 sitios. Se concentró toda la información, tanto de árboles como los análisis de la muestra de suelo y se procedió a la codificación y perforación de tarjetas de cómputo. Se realizaron análisis de correlación entre características dasométricas y edáficas, además se ajustaron, curvas de regresión para la relación edad-altura dominante y análisis de varianza para cada caso. Se determinaron cuatro calidades de estación a la edad base de 50 años, encontrándose que las características dasométricas y edáficas que más se correlacionan fueron el incremento medio con el horizonte A.

Aguilar *et al.* (1991) ajustaron un modelo para predecir el índice de sitio, de *Pinus pseudostrobus*, *P. blanco*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla* y *P. michoacan*, así como sus patrones del crecimiento y la división dasocrática del bosque en la comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. La base de datos se obtuvo de

información del inventario forestal utilizando la relación edad-altura dominante. El sistema de muestreo utilizado fue el sistemático-estratificado. El análisis de regresión lineal simple se realizó con el paquete SAS, realizando el ajuste con la fórmula española para obtener los parámetros del modelo. Se observó que las curvas de crecimiento obtenidas tienen un mejor funcionamiento entre los 40 y 60 años y que el crecimiento es sobrestimado y subestimado en edades menores o mayores respectivamente. Los índices de sitio obtenidos permiten calificar bien los rodales cuando estos no son jóvenes ni maduros.

Quiñones (1995) realizó un estudio para la predicción de la calidad de sitio. Utilizó la base de datos del sitio permanente de Experimentación Forestal "Cielito Azul" en San Miguel de Cruces, Municipio de San Dimas Durango. Los modelos seleccionados para generar las curvas de crecimiento en altura, fueron Schumacher, Chapman-Richards y Weibull modificado, en sus versiones anamórficas. Estos fueron ajustados mediante el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS mediante el método DUD. Se concluyó que el modelo de Schumacher es el que mejor se adecuó para la construcción de curvas anamórficas en *Pinus cooperi* en el SPEF "Cielito Azul" ya que presentó una mejor tendencia a la distribución de los datos y tiene una asíntota después de los 70 años.

Monroy (1996) determinó el índice de sitio para *Pinus patula* en la región de Huayacocotla, Veracruz. Evaluó la calidad de sitio en las zonas de distribución natural de las especies. Se trabajó con un total de 72 árboles muestra para los análisis troncales. Para analizar el crecimiento en altura se contaron los anillos de crecimiento en una rodaja cortada a 0.30 m de altura del fuste a la cual se le suman dos años que es el tiempo estimado para que el árbol haya alcanzado la altura de 0.30 m. y así obtener la edad total del árbol. Los datos de edad-altura dominante se adaptaron al modelo de Schumacher, para la derivación de una familia de curvas anamórficas de índice de sitio a una edad base de 40 años, utilizando una linealización a través de logaritmos naturales. Se concluye que el modelo no lineal empleado, representa en forma satisfactoria un ajuste adecuado



al patrón de crecimiento con un valor de  $R^2 = 0.76$  y que las familias de curvas anamórficas generadas para *P. patula*, representan los índices de sitio calculados, que fueron 18, 22, 26, 30, 34 y 38 m., a la edad base de 40 años.

Pérez (1997) evaluó la calidad de sitio para *Pinus durangensis* y *P. teocote* en el Ejido la Cañita, Municipio de San Dimas Dgo. para integrar la base de datos se realizó un muestro sistemático, las variables con las que se trabajó fueron edad y altura de árboles dominantes. Los modelos matemáticos seleccionados para la construcción de las curvas de índice de sitio fueron Schumacher, Chapman-Richards y Weibull modificado, en su versión anamórfica. Todos fueron ajustados mediante el procedimiento no lineal (NLIN) del paquete de análisis estadísticos (SAS) mediante el método DUD. Se observó que el modelo que mejor se ajustó a la base de datos fue el de Schumacher con una Pseudo  $R^2$  del 96% estimando la altura en función de la edad con un error de 4%, siguiendo el modelo Weibull y el de Chadman-Richards con una  $R^2$  del 95% y un error del 5%.

Alemán (2001) evaluó la calidad de sitio para *Pinus cooperi* blanco, *P. durangensis* Martínez, *P. leiophylla* y *P. teocote* en el predio particular Sierra del Nayar, Municipio de Durango. Analizó tres modelos matemáticos para ajustar curvas de crecimiento en altura, los cuales fueron Schumacher, Chapman-Richard y acumulativo de Weber. Los criterios para definir el modelo que mejor se ajustó fueron: suma de cuadrados del error, cuadrado medio del error, Pseudo  $R^2$  y una prueba de F. El modelo de Schumacher logró el mejor ajuste a las observaciones dadas que obtuvo los valores más bajos en las primeras tres y el valor más alto en la prueba de F (50% más que Chapman-Richards y 20% más que el acumulativo de Weibull), en las cuatro, especies consideradas. Se aplicó una prueba de homogeneidad y se concluyó que es posible utilizar un solo modelo cuando las combinaciones sean *p. durangensis* y *P. cooperi* y otro para *P. durangensis* y *P. leiophylla*; por su parte, *P. teocote* requiere de su respectivo modelo.

Bravo y Montero (2001) realizaron un estudio para predecir el índice de sitio para *Pinus sylvestris* bajo diferentes prácticas silvícolas. Se trabajó con datos obtenidos de un inventario realizado a 75 parcelas del bosque Nacional de España. En estas parcelas 46 árboles dominantes fueron derribados y 104 árboles fueron taladrados en el tocón (30 cm) y a la altura del pecho (1.30 m). En cada parcela se realizó una prueba de los primeros 10 cm. Del suelo y se tomó una muestra del corte dimensional. Se observó que la calidad de sitio del rodal estudiado era comparado con otras curvas de índice de sitio para *P. sylvestris* alrededor del mundo y que el principio edáfico presentado es útil para estimar las clases de índice de sitio del rodal expuesto en el corte dimensional y en rodales jóvenes de *P. sylvestris* en lo alto del Norte de España. Se concluyó que las curvas de índice de sitio son apropiadas para permitir una buena estimación del índice de sitio y que el rodal no sea altamente degradado.

Hernández y Gándara (2009) realizaron un estudio utilizando diferentes modelos para la estimación del índice de sitio para *Pinus durangensis* Martínez en San Dimas, Durango. El objetivo del estudio fue ajustar un grupo de modelos para predecir el índice de sitio de *P. durangensis* con datos derivados de una remediación de sitios permanentes establecidos en un bosque natural en el ejido Vencedores en San Dimas, Durango. Se probaron 13 modelos matemáticos ajustados con el procedimiento de mínimos cuadrados, de los cuales 10 son lineales y tres no lineales; los lineales fueron: logarítmicos, cuadráticos y un modelo combinado, en tanto los no lineales se trabajó con las función Chapman-Richards, Schumacher y Weibull. Se seleccionaron los mejores modelos de acuerdo al grado de ajuste o Pseudo R<sup>2</sup>, la prueba de "F", el cuadrado medio del error (CME), la prueba de hipótesis de los estimadores y el signo del parámetro. Se encontró que el modelo que mejor estima el índice de sitio fue el modelo logarítmico 6 ( $\ln[E/H] = \beta_0 + \beta_1[1/E]$ ), pues dio los valores más altos: R<sup>2</sup> de los residuales fue de 0.74; el de CME fue de 0.01608 y un valor en la prueba de "F" de 221.304.

Aguirre (2013) modeló el crecimiento de *Pinus teocote* para el noreste de México. Al modelar el crecimiento forestal facilita la estimación de la productividad de estos ecosistemas y el aprovechamiento de *P. teocote* en función de la calidad de sitio y el tratamiento silvícola. Elaboró Curvas de índice de sitio y tablas de producción para rodales densos de *P. teocote* en el noreste de México. Los datos procedentes de la medición de 280 árboles dominantes y del inventario de 66 sitios temporales de muestreo. Se construyó un diagrama de cinco curvas de índice de sitio con el método de la curva guía, aplicado a la función de Richards, con una edad de 50 años. La metodología empleada para la construcción de las tablas es la de Magin modificada con base en intervalos de altura. Las relaciones entre los parámetros más importantes de los rodales se determinaron mediante ecuaciones de regresión. Los resultados indican que el método es adecuado para generar de forma sencilla herramienta simple para la gestión de esos rodales. El incremento medio anual de la especie varía entre 2.1 y 9.5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

Hernández *et al.* (2014) evaluó el índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* en el oriente del estado de Hidalgo. La estimación de la productividad de los sitios forestales es indispensable para el manejo sostenible de los bosques y el índice de sitio constituye la metodología más utilizada en el mundo para este fin. Sin embargo, uno de los problemas más graves en el manejo forestal es la falta de ordenamiento de los rodales en función a su productividad, lo que propicia sobreexplotación de los recursos en algunos casos y la subexplotación en otros. El objetivo de este estudio fue estimar el índice de sitio y comparar la factibilidad de emplear las curvas anamórficas y polimórficas para bosques naturales de *P. teocote* en la región oriente del estado de Hidalgo. Se manejaron 345 pares de valores edad-altura de árboles dominantes y codominantes evaluados en rodales puros de este taxón; se ajustó el modelo de crecimiento de Schumacher que de acuerdo al bajo valor del Cuadrado Medio del Error, el alto valor de Pseudo R<sup>2</sup> ajustada y la correcta distribución de residuales mostró un ajuste adecuado a los datos, para determinar la curva guía y la construcción de las familias de curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio. Se establecieron calidades de

estación de I, II, III, IV y V, en los valores 27, 23, 19, 15 y 11 m, respectivamente, a una edad base de 50 años.

## **5. Definición y conceptos.**

### **5.1. Calidad de sitio.**

El término calidad de sitio, se refiere al potencial productivo de los diferentes sitios forestales, este potencial es expresado en producción de madera para una especie en particular o para un tipo forestal, en un tiempo dado (Clutter, 1983). Por lo tanto la calidad de sitio, está condicionada por la suma de los factores que determinan la productividad del bosque, como son los climáticos, topográficos y edáficos, definiendo la productividad como la cantidad de materia orgánica seca formada en una superficie, en un periodo de tiempo determinado. En las especies forestales maderables la productividad se expresa como la cantidad de madera en  $m^3/ha/año$ , formada en un bosque (Daniel *et al.*, citado por Hernández, 2009).

### **5.2. Productividad**

La producción de un sitio forestal es la estimación cuantitativa del potencial del sitio para producir biomasa forestal e incluye dos conceptos, el potencial de la estación del sitio y la parte de este potencial que puede ser transformada por un rodal determinado. La productividad se define para especies forestales maderables, como la cantidad de madera en  $m^3/ha/año$ , formada en un bosque (Daniel *et al.* 1982 citado por Pérez, 1997).

Para una correcta planificación del manejo forestal es necesario contar con herramientas precisas de predicción. Los modelos dendrométricos relacionados con la productividad son eficaces para definir el potencial de un sitio, analizar el funcionamiento de los ecosistemas forestales (McDill & Amateis, 1992) y para planificar el manejo forestal (Gregoire, 1993). El potencial de producción de un rodal puede definirse a través de la calidad de sitio el cual depende de la

combinación de factores físicos y biológicos de una localización geográfica particular (Skovsgaard & Vanclay, 2008).

Una forma indirecta de medir la calidad de sitio es a través del desarrollo de ecuaciones de índice de sitio (IS) (Monserud, 1984), definido como la altura promedio de los árboles dominantes de un rodal no disturbado, coetáneo y adecuadamente denso a una edad base o de referencia (Thrower, 1989). Dicho índice se basa en dos supuestos: (i) que el crecimiento en altura depende en gran medida de la calidad de sitio, y que es independiente de la densidad; y (ii) que el crecimiento en altura es asintótico a lo largo del tiempo, alcanzando un máximo que es definido por la calidad de sitio (Sturtevant & Seagle, 2004).

### **5.3. Índice de sitio.**

El índice de sitio (IS) se define como la altura que alcanzan los árboles dominantes o codominantes a una edad predeterminada, edad base o de referencia, bajo las condiciones que presenta el sitio (Haggiund, 1981; Daniel *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983; Pritchett, 1986; citado por Hernández, 2009). El índice de sitio de acuerdo con Pritchett (1986); es la unidad de medición por la cual se determina la productividad relativa de las áreas forestales.

### **5.4. Ecuaciones de índice de sitio.**

Las ecuaciones de índice de sitio utilizan datos de altura y edad para predecir los valores de índice de sitio. Estos datos pueden ser obtenidos de tres formas: mediante mediciones de la edad y la altura de un rodal en parcelas temporales, mediante mediciones de altura y edad sobre un periodo de tiempo de árboles muestra en parcelas temporales y mediante la reconstrucción de los parámetros de la altura-edad, para árboles individuales, usando técnicas de análisis troncales.

## **5.5. Crecimiento.**

El crecimiento de los árboles puede ser medido a través de la modificación, a un mayor valor, de la magnitud de cualquier característica mensurable, como el diámetro, el área basimétrica, la altura, el volumen, la biomasa, etc. El crecimiento de los árboles individuales se refleja en el aumento de los tejidos (floema, xilema, tallo, parénquima) a través del tiempo, en el cual se producen la suma de la división celular, elongamiento del meristemo primario y engrosamiento de las células del meristemo secundario. En consecuencia se puede definir el crecimiento de los árboles como el resultado de la modificación conjugada de diversas variables dendrométricas como el diámetro, altura, área basimétrica, forma del trono y volumen (Monárrez y Ramírez, 2003).

### **5.5.1. Crecimiento en altura.**

El crecimiento en altura se produce por la actividad de la yema apical o terminal, a través de la división celular. Este crecimiento es también llamado de crecimiento primario. Esta variable, altura del árbol, produce modificación más notoria del crecimiento, especialmente en la edad juvenil en que es fácil observar la rapidez de la modificación de la altura en periodos cortos del tiempo (Monárrez y Ramírez, 2003).

El crecimiento en altura es evaluado midiendo las alturas al inicio y al final de un intervalo de tiempo definido. En algunos árboles, donde es posible realizar el análisis del tronco, se pueden determinar los correspondientes valores e índices de crecimiento en altura. Para algunos árboles tropicales existen registros bibliográficos que señalan que el crecimiento en altura para varias especies se produce con un incremento hasta de 1 metro para cada centímetro de DAP, correspondiente a la edad juvenil del árbol. Cuando los árboles adquieren más de 40 a 50 cm de DAP, el incremento en altura disminuye aproximadamente a 0.5 m por cada centímetro de DAP, evidenciando que el árbol se encuentra probablemente en la fase madura de crecimiento. En árboles adultos el

crecimiento en altura tiende a estabilizarse hasta llegar a ser nulo, mientras el DAP continua creciendo (Monárrez y Ramírez, 2003).

### **5.5.2 Crecimiento en diámetro.**

El crecimiento en diámetro se refiere al aumento del diámetro de un árbol en un determinado periodo de tiempo. Este crecimiento es también denominado de crecimiento secundario. Generalmente primero el árbol crece en altura y después en diámetro. Este crecimiento es influenciado principalmente por su distribución espacial, por factores ambientales y factores edáficos (Monárrez y Ramírez, 2003).

El crecimiento en diámetro está influenciado directamente por la actividad del cambium. Por esta razón es posible registrar el crecimiento correspondiente de un día o por intervalos de tiempo más prolongados, como semanas, meses y años. El crecimiento en diámetro no es igual a lo largo del árbol. Para evaluarlo se emplean generalmente la variable DAP al inicio y al final del periodo requerido (Monárrez y Ramírez, 2003).

### **5.6. Modelos matemáticos.**

Los modelos matemáticos son procedimientos simbólicos que describen a través de ecuaciones matemáticas, el funcionamiento de un sistema. Por ejemplo curvas de producción, crecimiento de masas forestales y curvas de oferta y demanda en el mercado de productos forestales, generalmente el administrador forestal utiliza uno o dos tipos diferentes de modelos.

Los modelos como abstracciones representativas de un sistema pueden adoptar diferentes formas: iconos, gráficos o pictóricos, reproducciones a escala y matemáticas. Estas últimas son generalmente, las que motivan el interés y tienen utilidad en la similitud del crecimiento (Ramírez, 1994).

Los modelos matemáticos por su naturaleza tienen supuestas aproximaciones en su construcción y por lo tanto tienen rangos de validez restringidos. Estos rangos

pueden ser amplios si los modelos son cuidadosa y razonablemente construidos (Dym e Ivey, 1980) y no deben aplicarse fuera de estos rangos (Edwards y Hamson, 1992).

La función matemática es un conjunto de expresiones algebraicas que forman un valor específico ya sea de forma lineal o no lineal y que están definidas como valores continuos o como valores discretos. Si se supone que un modelo matemático y los valores representan cierta variación aleatoria, entonces el modelo se define como probabilístico.

Un modelo de predicción y crecimiento es un sistema diseñado para proporcionar descripciones cuantitativas del desarrollo del rodal en un cierto rango o periodo de tiempo determinado y bajo algunas condiciones y tratamientos silvícolas específicos (García, 1997).

#### **5.6.1. Importancia de los modelos.**

En la silvicultura así como en la biología, sociología y economía, se han hecho un gran número de intentos de intentos para expresar el crecimiento como una fórmula matemática. Una razón que motiva lo anterior es la adecuada planeación a largo plazo; en el caso de la silvicultura se requiere de información confiable acerca del crecimiento (Prodan, 1968).

Sin embargo, se recurre al método científico y al uso de los modelos a fin de reducir la posibilidad de error como el rechazar un postulado cierto o aceptar un postulado falso (Mendoza, 1983).

Los modelos matemáticos son una de las herramientas analíticas más utilizadas en la actualidad para la generación de conocimientos en el área del crecimiento y producción de masa forestales; ya que, de esta forma a través de fórmulas matemáticas se representan los procesos biológicos que ocurren a nivel de árbol individual o del rodal completo (Mendoza, 1993; citado por Hernández, 2003).



## **5.7. Métodos para estimar el índice de sitio.**

Según Clutter *et al.* (1983), las técnicas para ajustar las curvas de índice de sitio. Están comprendidas dentro de tres metodologías generales de desarrollo de ecuaciones.

### **5.7.1. Método de la curva guía.**

Este método se ha utilizado para generar curvas de índice de sitio de tipo anamórficas o polimórficas (Gracia *et al.* 1998). Con esta técnica se ajusta la tendencia promedio de las alturas dominantes en todo el intervalo de edad para obtener una curva denominada “Curva guía”, a partir de la cual se construye una familia de curvas por arriba y por debajo de ellos, proporcionales entre sí. Así, cada curva representará un índice de sitio diferente (Rivero y Zepeda, 1990; García *et al.*, 1998). Para su construcción se requieren datos de parcelas temporales de muestreo.

### **5.7.2. Método de la diferencia algebraica**

Para la aplicación del método de la diferencia algebraica, se requieren datos procedentes de árboles de parcelas permanentes, o datos de análisis troncales, los cuales pueden ser utilizados con cualquier ecuación altura-edad para generar familias de curvas anamórficas o polimórficas. El paso inicial en la aplicación de este método consiste en desarrollar, en una forma de diferencia, la ecuación que va a ser ajustada. Esta forma de diferencia expresa la altura remeida (H2) como una función de la edad de remediación (E2), de la edad inicial (E1) y de la altura inicial (H1) (Clutter *et al.*, 1983). Una ecuación de diferencia algebraica tiene la forma:

$$Y_2 = F(Y_1 E_2 E_1 \beta)$$

Donde  $Y_2$  es el valor de una variable continua definida sobre un árbol o un rodal en el periodo 2 de la medición,  $Y_1$  es la misma variable medida en el periodo 1;

$E_2$  y  $E_1$  son las edades de los árboles o rodales en los periodos 2 y 1 respectivamente y  $\beta$  es el vector de parámetros.

### **5.7.3. Método de la predicción de parámetros.**

El método de predicción de parámetros se desarrolló para reflejar las tasas variantes de crecimiento en altura para diferentes sitios, donde la altura está en función de la edad del rodal o índice de sitio. Este método presenta algunos problemas ya que las curvas resultantes no siempre pasan por el punto donde la altura iguala al índice de sitio, por eso es necesario un ajuste para asegurar que la predicción en altura a la edad base sea igual al índice de sitio predicho (Borders *et al.* 1984).

Para este método también se requieren datos provenientes de remediciones de árboles en parcelas permanentes, o de análisis troncales. El procedimiento implica los siguientes pasos (Clutter *et al.*, 1983):

- 1) Ajustar una función de altura dominante-edad (lineal o no lineal) a los datos de árboles o sitios.
- 2) Utilizar cada curva ajustada para asignar el valor de índice de sitio que le corresponde a cada árbol o sitio.
- 3) Relacionar los parámetros de las curvas ajustadas con los índices de sitio, a través de procedimientos de regresión.

### **5.8. Método del índice de sitio.**

El esquema central de este método está basado en la utilización de datos obtenidos de árboles dominantes y en algunas ocasiones codominantes. Según Clutter *et al.* (1983), la altura dominante es considerada como la variable dasométrica que mayormente se relaciona con la capacidad productiva de un sitio, además de ser la menos afectada por la densidad.

Rodríguez y Flores (1989); citado por Espejel (2004), mencionan que desde el punto de vista biológico, el uso de la altura de los árboles dominantes para la

estimación de la capacidad productiva de terrenos forestales, permite determinar la eficiencia en el espacio de crecimiento de una especie.

Dicho crecimiento es el resultado de la combinación de las características intrínsecas de la especie, los factores del medio y las interrelaciones con los demás árboles del rodal; en este sentido, cuando el efecto de todos los factores establecidos anteriormente se consideran constantes exceptuando las características del suelo, un árbol que presenta las dimensiones en altura, indudablemente está reflejando su eficiencia en el uso del espacio de crecimiento, por lo cual, la altura dominante es un indicador de la productividad de los suelos.

Así, el método del índice de sitio implica el desarrollo de un conjunto de curvas que presentan diversos patrones de crecimiento en altura durante toda la vida del rodal. Cada una con un valor numérico otorgado a la altura alcanzada, a una edad de referencia denominada edad base (Stage, 1963; citado por Espejel, 2004).

### **5.9. Curvas de índice de sitio**

Una familia de curvas de índice de sitio es simplemente un grupo de patrones de desarrollo en altura con un símbolo cualitativo o número asociado, para propósitos de referenciar calidades de sitio diferentes Clutter *et al.* (1983).

### **5.10. Curvas anamórficas**

Las curvas anamórficas de índice de sitio, son aquellas donde la altura de ellas a cualquier edad es proporción constante de la altura a esa misma edad; es decir, las curvas de índice de sitio son anamórficas si hay una tasa relativa de crecimiento constante para todos los índices de sitio a una edad específica (Quiñones, 1995).

### **5.11. Validación de modelos.**

La validación es literalmente, el proceso de determinar si un modelo verdaderamente representan de un modo u otro la realidad. En el proceso de validación de modelos deben tomarse siempre en cuenta los siguientes puntos:

- Los modelos de predicción se aproximan más a la realidad a medida que se incluyen más variables.
- Se incrementa la exactitud del modelo a medida que la recolección de datos es mejor en cantidad y calidad.

Por lo tanto un modelo estadísticamente muy sólido es muy costoso.

Los modelos forestales no tienen un grado uniforme de error sobre el intervalo completo del comportamiento. El proceso de validación puede ser más costoso y consumir más tiempo, que la construcción misma del modelo. Un modelo que no se valida es una especulación y trabajo perdido. La validación puede mostrar debilidades en el comportamiento del modelo, lo cual conducirá a mejorar su estructura, su precisión a la necesidad de recolectar datos de campo (Dimas, 1996).

Para validar un modelo su comportamiento debe compararse con observaciones de situaciones reales cuya historia y comportamiento sean perfectamente conocidos. Estos datos pueden ser obtenidos de una muestra independiente de parcelas permanentes, temporales o experimentales y son llamados datos de validación.

La validación de los modelos usualmente se basa en un análisis de los residuales, los cuales se definen como el valor predicho menos el valor observado. Esta diferencia, es el residual utilizado y que va a proporcionar una indicación verdadera del funcionamiento de un modelo, debe asumir que las variables independientes que entre en la construcción del modelo serán las mismas que se utilizarán en la validación.

Un modelo de producción y crecimiento, generalmente hará predicciones de diferentes parámetros, por ejemplo, diámetro promedio, altura dominante, volumen total y volumen comercial, los errores residuales normalmente se incrementan en relación a los parámetros mencionados anteriormente de altura a diámetro a volumen total ó volumen comercial (Venegas, 1995).

Un enfoque alternativo para la validación de modelos es graficar los parámetros de interés contra alguna variable predictoría. Sin embargo, no puede usarse con efectividad para definir el comportamiento de un modelo con muchas variables que predican, ni tampoco para representar resultados de grandes cantidades de datos de validación (DIMAS, 1996).

#### **5.12. Incremento Corriente Anual (ICA).**

Expresa el crecimiento ocurrido entre el inicio y el final de la estación de crecimiento, en un periodo de 12 meses, o entre dos años consecutivos. Este crecimiento también es conocido como crecimiento acumulado, incremento corriente anual (ICA) o simplemente como incremento anual (IA) correspondiendo a lo que el árbol creció en el periodo de un año. “Es la diferencia entre las medidas tomadas al fin y al principio de un año en especial”.

#### **5.13. Incremento Medio Anual (IMA).**

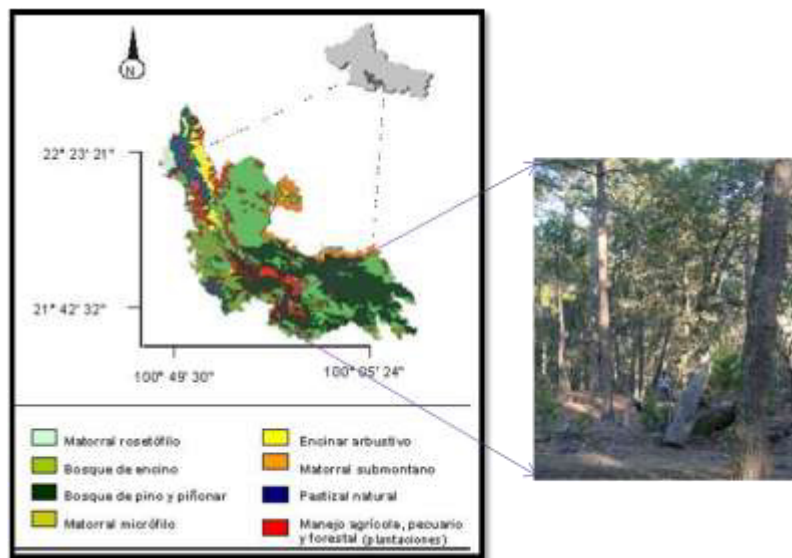
El valor del incremento medio anual (IMA) expresa la medida del crecimiento total a cierta edad del árbol. Expresa por tanto la media anual del crecimiento para cualquier edad.

Es el promedio anual para una edad determinada. Se encuentra dividiendo el tamaño total acumulado por la edad.

## 6. Materiales y Métodos

### 6.1. Área de estudio

El área de estudio comprende cerca de 943.11 ha y se ubica en la Unidad de Manejo Ambiental para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) “San Rafael” y el paraje “La Alameda”, en el municipio de Rioverde, San Luis Potosí; ubicado dentro de las coordenadas 21°41′58.47” y 21°39′5.25” latitud Norte 100°5′32.37” y 100°3′46.17” longitud Oeste perteneciente a la Sierra de Álvarez.



**Figura 3.** Ubicación de la UMA “San Rafael” y del paraje “La Alameda”, Rioverde, San Luis Potosí.

La región se caracteriza por estar delimitada por un macizo montañoso con rocas sedimentarias, con una elevación de 1500 a 1900 m, y presenta un clima templado subhúmedo C(w2)x' (Koppen, 1948). La temperatura media anual oscila entre 12 y 18°C y la precipitación media anual es de 1200 a 1800 mm. El suelo es del tipo Leptosol lítico (LPq) 100%, suelo somero, limitado en profundidad por una roca dura continua o por una capa continua cementada dentro de una profundidad de 10 cm a partir de la superficie. En la parte alta del sitio se encuentra vegetación de ecosistema templado, principalmente de pino-encino, con algunas áreas de pastoreo y cultivos. *P. teocote* se presenta asociado

con diversas especies de *Quercus* (*Q. resinosa*, *Q. affinis*, *Q. viminea*, *Q. castanea*) y esporádicamente *P. devoniana*.

## 6.2. Selección y medición de árboles muestras

Dentro del área de estudio se seleccionaron y midieron 250 árboles pertenecientes al estrato dominante de la población, siendo elegidos por tener un fuste recto, copa amplia, sin ramas en la parte baja, sin daños por plagas, enfermedades o perturbaciones naturales (incendios, rayos, etc.). Para cada uno de los árboles se registró su localización geográfica con GPS y se midieron en pie las siguientes variables de estado: diámetro a la altura de pecho (DAP) medido con cinta diamétrica una altura de 1.30 m sobre suelo, diámetro de base (DB) medido con cinta diamétrica a 30 cm del suelo, altura total (Ho) medido con un clinómetro electrónico, altura comercial (Hg) definida como la parte del fuste que puede utilizarse o aprovecharse, está limitada por las ramas iniciales de la copa o por los defectos del fuste. La Tabla 1 presenta estadística descriptiva de los árboles seleccionados.

**Tabla 1.** Estadística descriptiva de árboles seleccionados para el estudio (n=250).

Variable	Estadísticos			
	Mínimo	Máximo	Media	SD
DAP (cm)	9.4	60.6	35.6	11.0
DB (cm)	10.3	63.3	40	12.2
Ho (m)	4.6	22.3	15.2	3.9
Hg (m)	3.6	21.3	14.2	3.9
Edad (años)	12	90	55	18

Dónde: DAP= Diámetro Altura de Pecho, DB= Diámetro de Base, Ho= Altura total, Hg= Altura comercial.

Los árboles seleccionados representan un rango de edad entre 12 y 90 años, con un valor promedio de 55 años. Respecto a sus dimensiones presentan un DAP entre 9.4 a 60.6 cm y una altura total entre 4.6 y 22.3 m.

### 6.3. Toma de virutas troncales

Para cada uno de los árboles seleccionados se obtuvieron 2 virutas troncales utilizando el taladro de Pressler de 36 cm. Las muestras se obtuvieron a los 0.3 m y al 1.30 metros sobre el suelo de cada individuo. Las virutas se tomaron con una orientación norte ya que esta orientación tiene un mejor desarrollo en el crecimiento de los anillos por una mayor exposición a factores climáticos como luz y precipitaciones. Antes de utilizar el barreno se agregó aceite lubricante (aceite de canola y/o girasol) para permitir una entrada fácil en el árbol y facilitar la salida de la viruta. El procedimiento utilizado para la extracción de las virutas consideró con los siguientes pasos (Figura 4). Para introducir el taladro se presionó hasta que el filo de la punta se introdujo en el árbol. Posteriormente se realizaron movimientos circulares en dirección de las manecillas del reloj hasta llegar a la médula. Llegando a ese punto, se introdujo con precaución la bayoneta evitando que se doble. Finalmente, se dieron dos vueltas al taladro al contrario de las manecillas del reloj y se extrajo la bayoneta con la viruta. La viruta se colocó en un popote de plástico para que no se deformara ni sufriera daño al ser transportada al laboratorio.



**Figura 4.** Procedimiento de extracción de viruta.



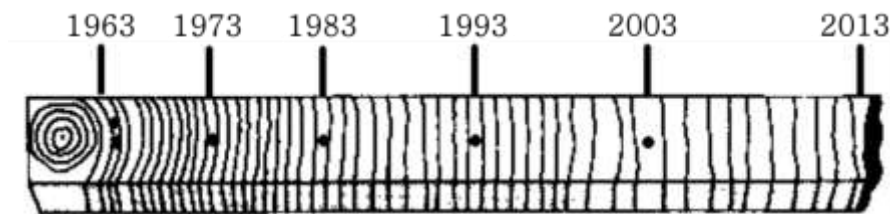
Las virutas se almacenaron en refrigeración a 10°C, para evitar su deformación y el ataque de microorganismos (hongos) durante una semana. Pasado ese tiempo se sacaron las virutas y se pegaron con resistol blanco al porta virutas, asegurándonos que se pudiera visualizar un corte radial, esto con el propósito de facilitar el conteo de los anillos. Para poder visualizar de manera más clara los anillos, se lijaron manualmente las virutas con lija de papel del grano mayor al menor (120, 150 y 500 granos).

#### 6.4. Medición de la edad de los árboles

El fechado cruzado (“cross-dating”) evita el riesgo de contar anillos dobles u omitir el conteo de anillos ausentes. Biondi (1999) recomienda utilizar este procedimiento ya que encontró que el 1.2% del número total de anillos medidos al muestrear 58 árboles de *Pinus ponderosa* resultaron faltantes. Para desarrollar el procedimiento de fechado-cruzado en las virutas o tarugos, se utilizaron los métodos descritos por Swetnam *et al.*, (1985) y Yamaguchi (1991).

Para realizar el fechado-cruzado se necesitan construir el “esqueleto” (“skeleton plot”), el cual es un medio de representación gráfica de las amplitudes de los anillos. El material necesario fue un lápiz y un papel milimétrico.

Primero se estableció el año de cada anillo, haciendo el conteo de la corteza a la médula. Se asignó el año 2013 al último anillo (año en que se tomó la viruta), y a los demás los años en orden descendente a partir de éste. Se marcó con un lápiz un punto cada diez años, con dos cada 50. Para identificar en el papel milimétrico los años, se marcó en la parte superior con número cada 10 años de la cronología (Figura 5).



**Figura 5.** Secuencia en la que se asignan los años a los anillos de crecimiento en las virutas.

Las virutas fueron medidas en el Laboratorio de Carbono de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL en la ciudad de Linares, Nuevo León. Se utilizó un micrómetro con platina deslizable, conectado a una computadora (Robinson *et al.*, 1980) en la cual se tiene instalado el TRIM (*Tree Ring Incremental Measuring System*). Las muestras fueron medidas una por una deslizando la platina y observando la muestra en un estereoscopio con ocular en cruz, se comenzó a medir del centro del árbol (médula) a la corteza, contando como un anillo la porción de madera temprana (clara) y tardía (oscura).

Cada vez que en alguna de las divisiones del ocular en cruz se llegaba al anillo (pasando la porción de madera oscura), se presiona el botón del micrómetro. Todas las medidas se almacenaron en el equipo de cómputo. Una vez terminada las mediciones se realizó el análisis estadístico del fechado-cruzado en el programa COFECHA.

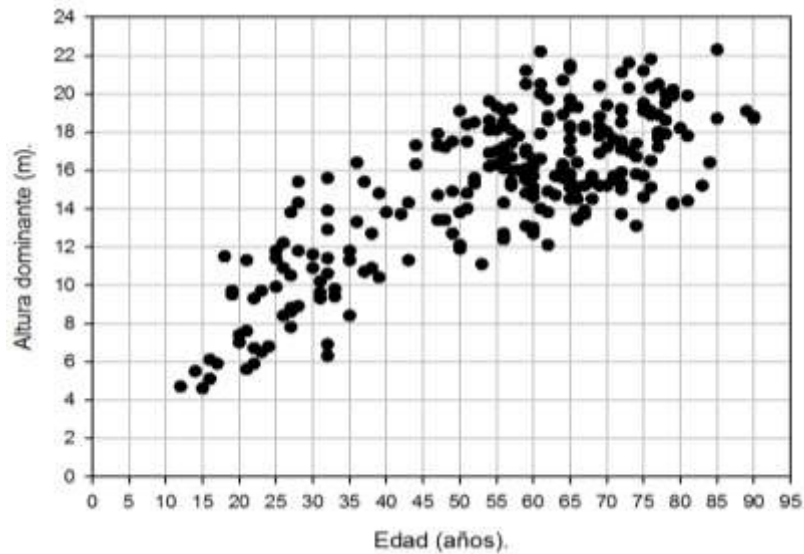
EL programa COFECHA desarrollado por Holmes (1983), sirve como herramienta para la identificación de porciones de series de anillos que puedan tener errores de fechado o errores importantes de medición. Para cada serie el programa determina cuál segmento se correlaciona de forma deficiente con el segmento correspondiente de la serie maestra fechada, o en qué otra posición correlacionan más algunos de los segmentos con algunos de los segmentos de la serie maestra fechada.

Al obtener los resultados en archivos de “block de notas” se corrió el programa COFECHA con el archivo que contiene todos los valores de incremento para cada anillo, esto se realizó para obtener la correlación entre las virutas. El análisis de los datos salientes del programa permitió tener la certeza de que cada año de los anillos fue asignado correctamente.

## **6.5. Modelos de altura dominante-edad**

Se utilizó el método de la curva guía para construir un diagrama de curvas de índice de sitio de tipo anamórficas a partir de los datos de altura dominante-edad

recolectados (Clutter *et al.*, 1983; Davis *et al.*, 2001; Van Laar y Akça, 2007). Este procedimiento requiere seleccionar una forma funcional que permita modelar la relación altura dominante – edad (Figura 6).



**Figura 6.** Relación altura dominante – edad para los árboles muestra (n=250).

Para este estudio se evaluaron modelos de tres parámetros correspondientes al modelo de Chapman-Richards (1959-1961).

$$H = \beta_0 \left[ 1 - e^{-\beta_1 E} \right]^{\beta_2} \quad [1]$$

y al modelo Weibull II (1951)

$$H = \beta_0 \left[ 1 - e^{-\beta_1 E^{\beta_2}} \right] \quad [2]$$

Se utilizaron estos modelos los cuales son muy flexibles y han sido ampliamente utilizados en la construcción de curvas de índice de sitio y que relacionan la altura dominante con la edad (como lo describen Sánchez y Castillo, 2001; Montero y Kannen, 2003; Rodríguez y Arteaga, 2005; Hernández, 2009; Barrero *et al.*, 2011; Aguirre, 2013). Los modelos tienen asíntota horizontal, sigue un patrón de crecimiento sigmoide y tiene un punto de inflexión (Vargas *et al.*, 2010).

Adicionalmente, se evaluaron modelos de dos parámetros propuestos por Schumacher (1939).

$$H = \beta_0 e^{\frac{\beta_1}{E}} \quad [3]$$

y el modelo propuesto por Weber (1891)

$$H = \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 E}] \quad [4]$$

Se utilizaron estos modelos por considerar que los mismos combinan una correcta representación biológica por medio de pocos parámetros (Carmean, 1972; Alder, 1980; Burkhart & Grefoire, 1994; Andenmatten y Letourneau, 2000; Otárola *et al.*, 2001; Torres-Rojo, 2001; Hernández *et al.*, 2014; Hernández *et al.*, 2014b).

En una primera etapa se estimaron los coeficientes de los modelos utilizando el método de minimización del error de Gauss-Newton implementado en el paquete estadístico SAS 9.4<sup>®</sup> (Statistical Analysis System). Posteriormente, se realizó una comparación de la bondad de ajuste considerando como estadísticos indicadores el coeficiente de determinación y el cuadrado medio del error (CME) (Hernández 2003; Aguirre, 2013; Hernández *et al.*, 2014).

Después se verificó el cumplimiento de los supuestos de regresión, y de la normalidad de los errores, esto mediante pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y se verificó gráficamente que los residuales se comportaran en línea recta y los porcentajes se asemejen a una campana de Gauss (Velazco *et al.*, 2006).

Una vez seleccionado el modelo base se derivó la función de índice de sitio utilizando el procedimiento descrito por Mares *et al.*, 2004; Barreto *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2014; para obtener curvas anamórficas, de la ecuación original se despejó el parámetro asintótico y su resultado (expresión), se sustituyó en la ecuación original, con lo que el valor asintótico se considera implícito y los parámetros de forma son comunes para todos los sitios. Se varió la edad y el

índice de sitio deseado y se mantuvo constante la edad base, con la cual se generó el sistema de curvas anamórficas.

### 6.6 Elaboración de las tablas de producción para los diferentes índices

Para la elaboración de las tablas de productividad de cada sitio, se utilizó el modelo Schumacher para obtener la correlación de las variables en función de la altura de la cual se obtuvieron los parámetros estimados.

$$H = \beta_0 e^{\frac{\beta_1}{E}} \quad [3]$$

Una vez obtenidos éstos, se sustituyeron en el modelo y como variable independiente se utilizó el valor de los índices de sitio para cada categoría de edad, las cual tienen un rango de edad 5 años.

### 6.7. Obtención del ICA, IMA y sus puntos máximos

Adicionalmente se obtuvieron las curvas de crecimiento y sus respectivas curvas de Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) y sus valores máximos mediante la derivación de la ecuación para obtener el índice de sitio.

$$H = IS \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) \quad [1]$$

Para calcular los valores de Incremento Corriente Anual (ICA) se obtuvo de la primera derivada de la función de índice de sitio, con respecto a la edad.

$$ICA = \frac{IS \cdot \beta_1 \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_1} - \frac{\beta_1}{E}\right)}{E^2} \quad [2]$$

Para generar la curva del Incremento Medio Anual (IMA), se dividió la ecuación integral entre la edad

$$IMA = \frac{H}{E} \quad [3]$$

El  $ICA_{max}$ , se obtuvo tomando la segunda derivada de la función original con respecto de la edad, igualando a 0 y después sustituyendo el resultado, en la ecuación para obtener el ICA.

$$ICA = \frac{4 \cdot IS \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E} - 2\right)}{\beta_1} \quad [4]$$

El  $IMA_{max}$ , se obtuvo tomando la primera derivada de la función del IMA con respecto de la edad, igualando a cero y despejando la edad.

$$E = \beta_1 \quad [5]$$

Al obtener los valores, se generaron curvas de ICA e IMA para cada índice de sitio, de igual manera se calculó el valor del  $ICA_{max}$  y el  $IMA_{max}$  para cada uno de ellos.

El desarrollo de la derivación de cada ecuación se muestra detallado en el Anexo 1.

### 6.8. Comparación con otros estudios

Se realizó una comparación con estudios de Aguirre (2013) y Hernández *et al.* (2014) que tienen también como objeto de estudio a *P. teocote* pero en diferentes ubicaciones de distribución (Noreste de México y oriente del estado de Hidalgo). La comparación fue de tipo gráfica y estadística; en la comparación grafica consideró los diferentes curvas que se forman con los valores de las curvas de índice de sitio a cada 5 años de edad, para los valores dados a la edad base ( $E_0=50$ ) éstos se toman como los índices de sitio y la comparación estadística se compararon los valores obtenidos de los parámetros dados y medidas de bondad de ajuste del modelo de Schumacher siendo el modelo de mejor ajuste.

## 7. Resultados y discusión

### 7.1. Evaluación de modelos

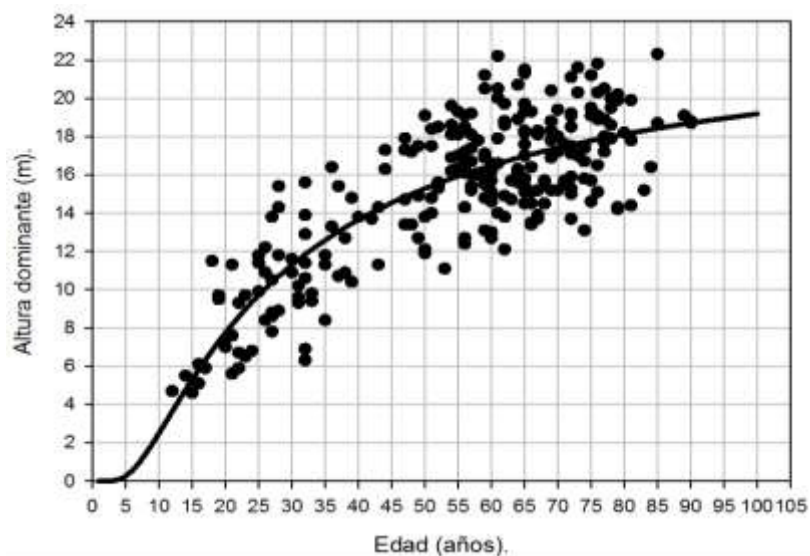
Se evaluaron los modelos de tres parámetros y dos parámetros para generar curvas de índice de sitio de tipo anamórficas.

Al procesar los pares de datos de altura dominante-edad con los modelos de Chapman-Richards, Weibull, Weber y Schumacher en el software SAS 9.4® (Statistical Analysis System), el modelo de Schumacher fue el que obtuvo el mejor ajuste.

Por lo tanto, el modelo seleccionado para la construcción de curvas de índice de sitio fue el modelo de Schumacher. Los parámetros estimados y medidas de bondad de ajuste se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros estimados y medidas de bondad de ajuste del modelo de Schumacher.

Parámetros Estimados				Bondad de Ajuste		
$\beta_0$	Error Std. Aprox.	$\beta_1$	Error Std. Aprox.	$R^2$	$R^2_{ajustada}$	CME (m)
24.0675	0.6056	-22.6947	1.3155	0.6637	0.6624	5.126



**Figura 7.** Curva guía obtenida del modelo Schumacher.

En la Figura 7 se observa gráficamente que el modelo Schumacher tuvo el ajuste de regresión a los pares de datos, de este se obtuvieron las ecuaciones para obtener la función de índice de sitio

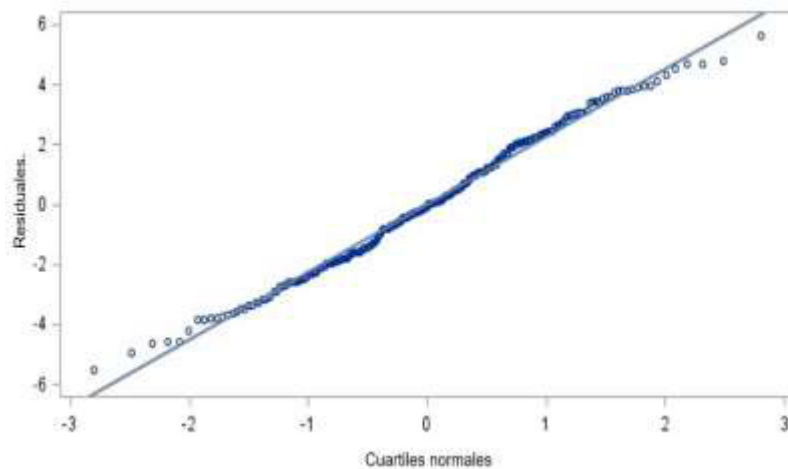
$$IS = H \cdot \exp^{-22.6947 \left( \frac{\beta_1 - \beta_1}{E_0 E} \right)} \quad [5]$$

y la familia de curvas de índice de sitio.

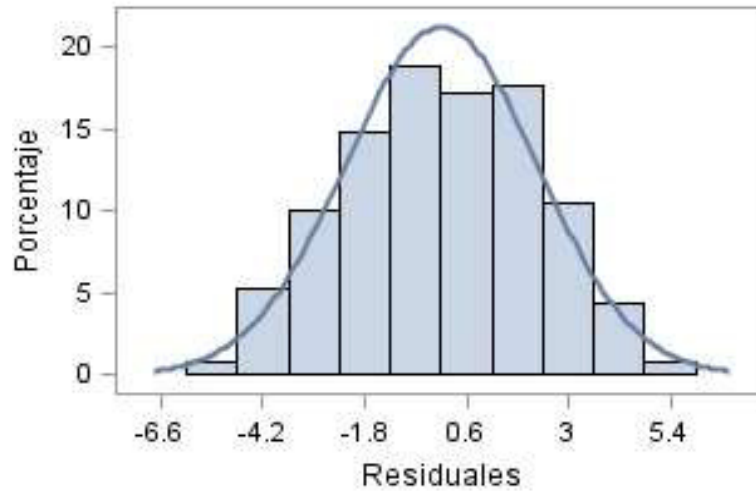
$$H = IS \cdot \exp^{-22.6947 \left( \frac{\beta_1 - \beta_1}{E E_0} \right)} \quad [6]$$

## 7.2. Análisis de residuales

Al verificar el cumplimiento de los supuestos de regresión, resultó que hay normalidad de los errores en el modelo, ya que la prueba de Shapiro-Wilk ( $W$ : normal = 0.990967) fue cercano a 1 ( $Pr < W = 0.1254$ ). Los residuales se comportaron como una línea recta en relación con lo normal y los porcentajes se parecen a una campana de Gauss como lo mencionan Velazco *et al.*, (2006) y Hernández *et al.*, (2014) (Figura 8).





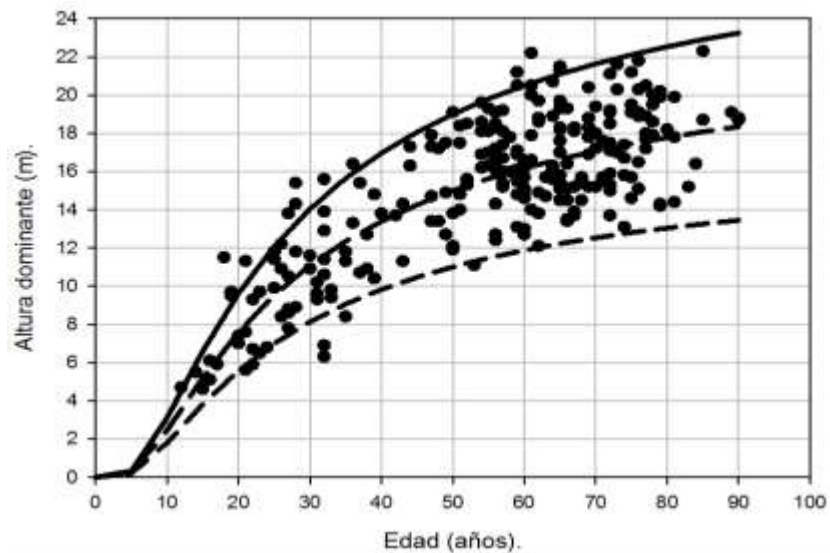


**Figura 8.** Pruebas de normalidad para la distribución de residuales del modelo de Schumacher.

### 7.3. Curvas de índice de sitio

La familia de curvas de desarrollo en altura dominante se construyó aplicando la función [6] para las índices de sitio 11, 15 y 19 m.

La Figura 9 muestra la familia de curvas de índice de sitio anamórficas para la especie *P. teocote* considerando una edad base  $E_0=50$  años. Estas permiten clasificar los bosques naturales de acuerdo a su potencial productivo.



**Figura 9.** Sistema de curvas de índice de sitio desarrolladas para bosques naturales de *Pinus teocote*.

## 7.4. Tablas de producción

Utilizando el modelo de Schumacher se elaboraron las tablas de producción para cada uno de los tres índices de sitio definidos anteriormente. Para la elaboración de dichas tablas fueron utilizados los siguientes coeficientes de regresión resultantes de la aplicación del modelo para cada una de las seis variables (Tabla 3).

**Tabla 3.** Coeficientes de regresión para cada variable

	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>HO</b>	24.06751	-22.69475
<b>HG</b>	38.302	-14.64
<b>DG</b>	87.1027	-13.152
<b>G</b>	98.7168	-19.091
<b>N</b>	199.032	-6.70118
<b>V</b>	1989.56	-34.539

Al obtener los parámetros estimados ( $\beta_1$  y  $\beta_2$ ) de cada variable y usando como variable dependiente el valor de obtenido de cada índice de sitio para cada intervalo de edad el cual fue a cada 5 años, se determinaron los valores de las tablas para cada variable, obteniendo de esta manera una tabla de producción para cada uno de los tres índices de sitio (Tablas 4, 5 y 6).

**Tabla 4.** Tabla de producción en pie para *Pinus teocote* Schltdl. & Cham., índice de sitio 19.

EDAD	HO	HG	DAP	G	N	V
<b>10</b>	3.09212687	0.33651818	1.23825712	0.20560214	1738.26123	0.02803469
<b>15</b>	6.58866503	4.15164314	11.8334749	5.44502895	550.343521	10.5221645
<b>20</b>	9.61761726	8.35863857	22.1890163	13.5617327	399.505108	54.8414696
<b>25</b>	12.0678395	11.3857248	29.290085	20.2931185	346.803401	113.704038
<b>30</b>	14.0390445	13.5000867	34.1332503	25.3405218	320.791097	169.942242
<b>35</b>	15.6412643	15.0220091	37.5711001	29.1280503	305.48332	218.649794
<b>40</b>	16.9618252	16.1575503	40.1129662	32.0317528	295.461885	259.664466
<b>45</b>	18.0655391	17.0324344	42.0589399	34.3118842	288.415685	294.063784
<b>50</b>	19	17.7249951	43.5921617	36.1423631	283.201682	323.056323

55	19.8004003	18.2857693	44.829163	37.6405799	279.192695	347.689597
60	20.4930978	18.748528	45.8470486	38.887513	276.017023	368.80648
65	21.0981207	19.1365754	46.6986298	39.9403791	273.440863	387.069222
70	21.6309087	19.4664569	47.4211838	40.8405511	271.310012	402.995697
75	22.1035294	19.7502165	48.0417193	41.6185893	269.518764	416.992259
80	22.5255357	19.9968161	48.5802561	42.2975063	267.992289	429.380008
85	22.9045802	20.2130543	49.0519326	42.8949341	266.676162	440.414848
90	23.24686	20.4041772	49.4683987	43.4245937	265.529871	450.302575

**Tabla 5.** Tabla de producción en pie para *Pinus teocote* Schltdl. & Cham., índice de sitio 15.

EDAD	HO	HG	DAP	G	N	V
10	2.44115279	0.09521055	0.39830763	0.03962756	3098.12983	0.00142587
15	5.20157765	2.29554758	6.94918396	2.51437062	721.810915	2.60014699
20	7.59285573	5.56988171	15.4087153	7.98782011	481.078023	21.0476184
25	9.52724174	8.23880983	21.9030386	13.3087577	402.154375	53.0046836
30	11.0834562	10.2227385	26.587852	17.6331032	364.33605	88.1819757
35	12.3483666	11.7038776	30.0243206	21.0356939	342.455958	121.342689
40	13.3909146	12.8356126	32.6201249	23.7263686	328.288558	150.86459
45	14.2622677	13.7222333	34.6374127	25.8856357	318.403475	176.613573
50	15	14.4327815	36.2445086	27.6471269	311.130037	198.953034
55	15.631895	15.013584	37.5521696	29.1067491	305.561774	218.360596
60	16.1787614	15.4964673	38.6354511	30.3334585	301.166035	235.293327
65	16.6564111	15.9038508	39.5466904	31.3774621	297.610022	250.148018
70	17.0770332	16.2519085	40.3233493	32.275903	294.675434	263.25622
75	17.4501548	16.552565	40.9928759	33.0567154	292.213291	274.890826
80	17.7833177	16.8147866	41.5758033	33.7412434	290.11853	285.275468
85	18.0825634	17.0454343	42.0877773	34.3460386	288.314979	294.593569
90	18.3527842	17.249842	42.5409171	34.8841128	286.746094	302.99612

**Tabla 6.** Tabla de producción en pie para *Pinus teocote* Schltdl. & Cham., índice de sitio 11.

EDAD	HO	HG	DAP	G	N	V
10	1.79017872	0.01075427	0.05615359	0.00230646	8406.56189	8.311E-06
15	3.81449028	0.82489902	2.77092974	0.66192202	1153.12977	0.23246534
20	5.5680942	2.76277678	8.20758625	3.20148076	663.123851	4.02549842
25	6.98664395	4.71182569	13.2585021	6.42216829	519.365095	14.1837019
30	8.12786789	6.3236194	17.2696624	9.42553669	453.926467	28.3950511

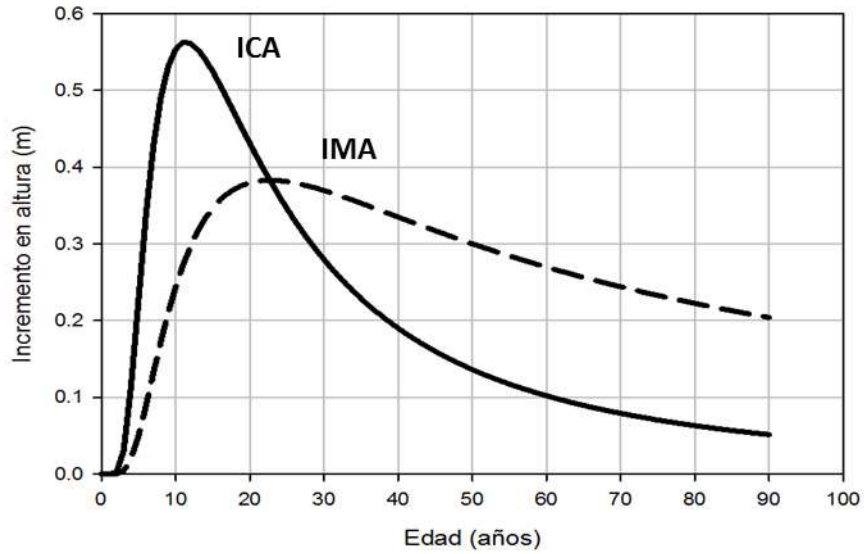
<b>35</b>	9.05546881	7.60495122	20.3830948	11.9894412	417.164368	43.8822343
<b>40</b>	9.82000404	8.62502359	22.8232761	14.1280511	393.809211	59.0544831
<b>45</b>	10.4589963	9.44750052	24.7693214	15.9098211	377.728347	73.2108965
<b>50</b>	11	10.1208031	26.3495585	17.4041675	366.01115	86.1215523
<b>55</b>	11.4633897	10.6802148	27.654356	18.6690377	357.107876	97.7766339
<b>60</b>	11.8644251	11.1513566	28.7478757	19.7501098	350.120888	108.259269
<b>65</b>	12.2147014	11.5530147	29.6764143	20.6828012	344.495684	117.684892
<b>70</b>	12.5231577	11.8991609	30.4739898	21.4945491	339.871864	126.173547
<b>75</b>	12.7967802	12.2003463	31.1660497	22.2067322	336.005332	133.838048
<b>80</b>	13.0410996	12.4646594	31.7719546	22.836151	332.725044	140.779637
<b>85</b>	13.2605465	12.69839	32.3066649	23.3961361	329.907666	147.08711
<b>90</b>	13.4587084	12.9064937	32.7819064	23.8973689	327.462071	152.837458

### **7.5. Obtención del IMA, ICA y sus valores máximos.**

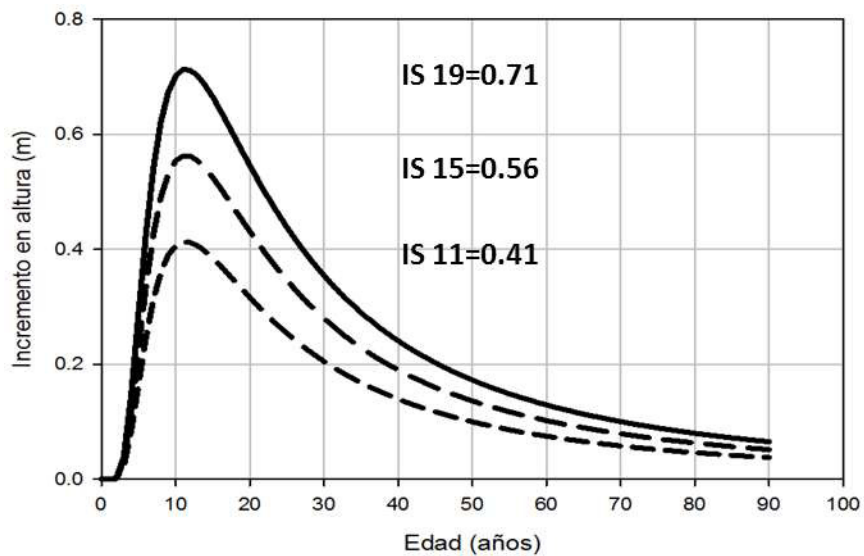
Siendo el modelo de Schumacher el único que pudo ajustarse a la relación altura dominante-edad, este fue el que se usó para calcular el incremento en altura.

El crecimiento en altura es lento en los primeros 5 años, después es más rápido hasta los 50 años alcanzando una altura de 15.28 m, luego se presenta un punto de inflexión de los 50 a los 75 a una altura de 16.5 m, a partir de los 75 años se estabiliza hasta los 100 años (figura 8).

Utilizando la altura dominante y la edad se determinaron el Incremento Corriente Anual (ICA) y el Incremento Medio Anual (IMA) para cada uno de los índices de sitio que son 19, 15 y 11 como se muestra a continuación (Figura 10).

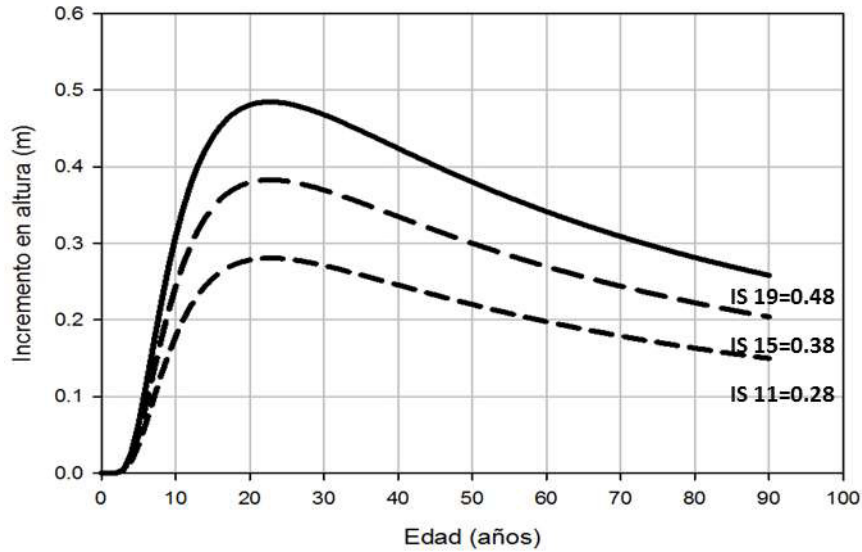


**Figura 10.** Incremento medio anual e Incremento corriente anual para *Pinus teocote* para bosques naturales al sureste del estado de San Luis Potosí.



**Figura 11.** Incremento corriente anual para *Pinus teocote* para los índices de sitio 19, 15 y 11 en un bosques naturales al sureste del estado de San Luis Potosí.

El ICA en la altura para los índices de sitio 19, 15 y 11, es rápido desde los primeros cinco años, alcanzando su máximo valor de 0.71, 0.56 y 0.41 m año<sup>-1</sup> a la edad de 11 años sucesivamente, a partir de esta edad, decrece, rápidamente y se estabiliza indistintamente a partir de los 80 años para los tres índices de sitio (Figura 11).



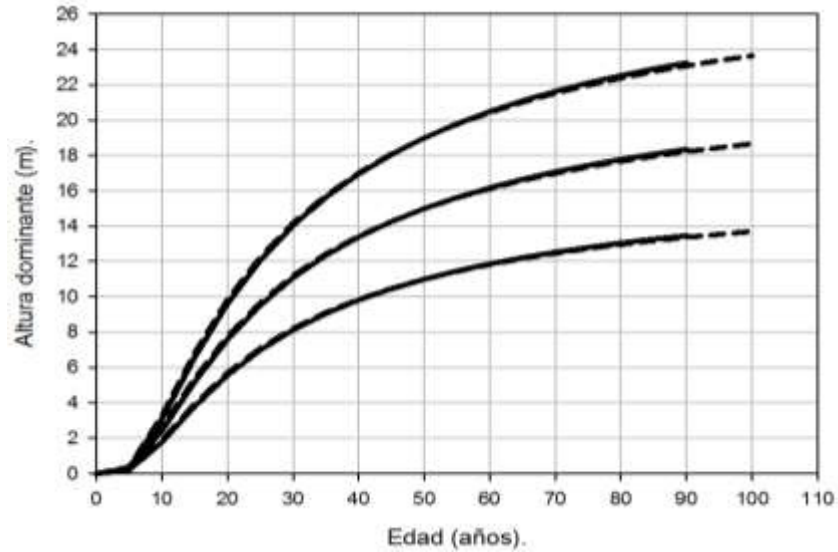
**Figura 12.** Incremento medio anual para *Pinus teocote*, para los índices de sitio 19, 15 y 11 en bosques naturales al sureste del estado de San Luis Potosí.

El IMA para la altura de los índices de sitio 19, 15 y 11 tiene un incremento rápido desde los primeros cinco años hasta los 22 años en donde alcanza el máximo valor de 0.48, 0.38 y 0.28 m año<sup>-1</sup>, desde esta edad va disminuyendo en menor proporción para cada uno de los índices de sitio hasta los 90 años (Figura 12).

### 7.6 Discusión.

Al obtener el sistema de curvas y los valores de los índices de sitio, estos se pueden comparar con otros estudios sobre la misma especie en diferentes áreas de distribución, como también se puede comparar con otros estudios utilizando diferentes especies del género *Pinus* o usando diferentes modelos de crecimiento para la misma especie.

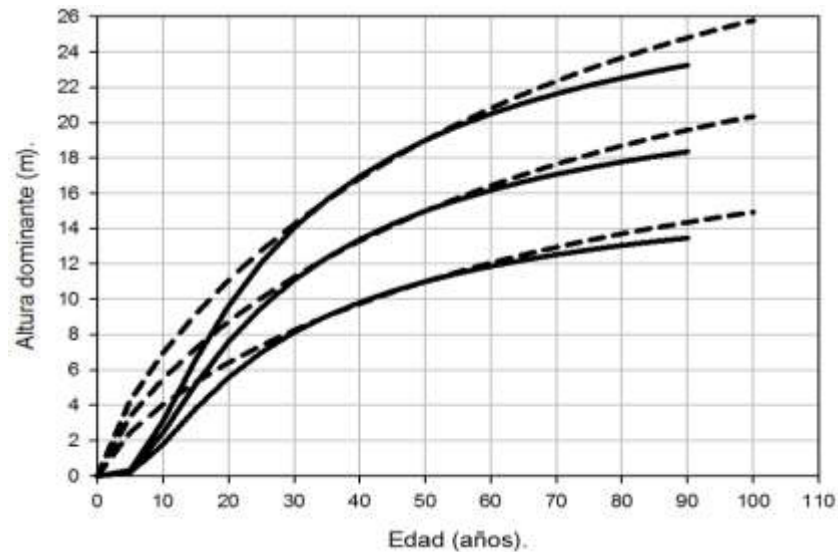
Al comparar el sistema de curvas de índice de sitio anamórficas podemos observar que los valores que las curvas tienen un comportamiento similar puesto que tienen el mismo índice de sitio, y son generadas con el mismo modelo (Figura 13).



**Figura 13.** Comparación gráfica del sistema de curvas anamórficas: línea discontinua representa bosques naturales del oriente de Hidalgo y la línea continua representa bosques naturales al sureste de San Luis Potosí.

Observando los valores obtenidos para la creación de las curvas, Hernández *et al.*, 2014 obtiene valores altos en las primeras edades y mientras se acerca a la edad base ( $E_0=50$  años), van disminuyendo estos valores por eso es que se observa que las curvas pasan por debajo de las generadas en la presente investigación.

Al comparar las curvas creadas por la investigación de Aguirre (2013), tenemos el siguiente gráfico comparativo (Figura 14).



**Figura 14.** Comparación gráfica del sistema de curvas anamórficas: la línea discontinua representa bosques naturales del noreste de México usando el modelo Chapman-Richards y la línea continua representa bosques naturales al sureste de San Luis Potosí usando el modelo Schumacher.

Podemos observar la diferencia en la forma de las curvas debido a los diferentes modelos usados, en el caso de la investigación de Aguirre (2013), se ajustó el modelo de Chapman-Richards, el cual arroja curvas que muestran un mayor crecimiento desde edades iniciales, el cual continúa, hasta obtener una asíntota. El modelo de Schumacher tiene un crecimiento menor en edades iniciales, pero a partir de edades avanzadas comienza a tener un crecimiento significativo, aunque menor a lo comparado con el modelo de Chapman-Richards; y termina por llegar a una asíntota.

El sistema de curvas anamórficas representa los diferentes crecimientos de altura dominante en la región para *P. teocote*. El variado crecimiento de los árboles se atribuye a los diferentes tipos de suelo en que se desarrolla la especie, los factores ambientales (luz, precipitación, etc), en algunos casos la densidad del rodal y si tiene o no un manejo forestal (si tiene también depende del tipo de manejo).

Los resultados obtenidos se comparan con el estudio realizado por Aguirre (2013) y Hernández *et al.* (2014) para la misma especie, Hernández *et al.* (2014) a su



vez también utilizó el modelo de crecimiento Schumacher, mientras que Aguirre (2013) el modelo de crecimiento de Chapman-Richards.

Los resultado comparados con Hernández *et al.* (2014), muestran un comportamiento similar del sistema de curvas de índice de sitio, sin embargo en los estadísticos hay diferencias tanto en el CME es de 11.226, como en  $R^2_{ajustada}$  0.97 (mayor al obtenido en el presente estudio), esto se puede explicar por la comparación de los datos con que se trabajó, ya que el intervalo de la altura dominante y edad es mucho más amplio para Hernández *et al.* (Para la altura dominante aproximadamente va de 4 a 30 metros y la edad va de los 5 a 110 años), esto también nos indica que los índices de sitio son mejores para la zona de distribución en el estado de Hidalgo.

Mientras que al compararlos con Aguirre (2013), el CME es de 16.31 (mayor al obtenido que fue de 5.12) y el  $R^2_{ajustada}$  fue de 0.68 (cercano al obtenido que fue del 0.66), esto nos indica cierta similitud, ya que el parámetro asintótico ( $\beta_0$ ) para los trabajos tiene un valor similar (Aguirre, 2013, de 24.6038 y el obtenido de 24.0675), esto puede explicarse por el parecido ecológico y ambiental de la distribución de la especie en las áreas muestreadas en los trabajos.

En las tablas de producción elaboradas se reconoce claramente que a una edad dada, los índices de sitio muestran los más altos valores para el número de árboles, puesto que conforme van creciendo este número de individuos por hectárea van disminuyendo, sobre todo en el índice de sitio medio y alto.

*Pinus teocote* para la región sureste del estado de San Luis Potosí, muestra que para un diámetro cuadrático de 20 cm, la especie tiene valores de densidad máximo de 400 árboles  $ha^{-1}$ , en tanto que para la misma especie, pero situada al noreste del país, los valores máximos de densidad para el mismo diámetro cuadrático es de 658 árboles  $ha^{-1}$  (Aguirre, 2013).

El patrón de desarrollo del volumen de la masa en pie para diferentes índices de sitio, en función de la edad, muestra un aumento notable con la edad. Para una

misma edad del rodal, la diferencia en volumen entre las tablas es más grande cuanto mayor es el índice de sitio. Lo anterior se debe a que no solamente las alturas, sino también las áreas basales aumentan con el índice de sitio.

El volumen máximo de fue de  $450.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Este valor fue menor al citado por Aguirre (2013) para la misma especie que fue de  $459.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

## 8. Conclusiones

Del modelo Schumacher se obtuvieron las ecuaciones para obtener el índice de sitio y para elaborar el sistema de curvas de índice de sitio para el Sureste de San Luis Potosí.

El sistema de curvas de índice de sitio anamórficas es adecuado para calificar el índice de sitio para bosques naturales de *P. teocote* al sureste del estado de San Luis Potosí, por la confianza que da al intervalo de dispersión de los datos.

Las tablas de producción obtenidas en este trabajo constituyen una contribución para el manejo adecuado de los recursos forestales del Sureste de San Luis Potosí, ya que proporcionan información sobre el patrón de desarrollo promedio de *Pinus teocote* bajo diferentes condiciones de productividad en condiciones de densidad máxima.

Las tablas permiten calificar la condición de los rodales del área respecto a su productividad, existencias y densidad, así como derivar niveles de cosecha sustentable.

Al realizar la comparación con otros estudios, se observó que a pesar de que tienen en común la misma especie (*P. teocote*) y en algunos casos el mismo modelo de crecimiento, se observa un desarrollo parecido y en otros casos, un mejor desarrollo de la especie en los sitios comparados, esto se relaciona con la diferencia en los factores ambientales de cada sitio.

Con los productos obtenidos de esta investigación, se podrá comenzar a evaluar de una mejor manera los programas de manejo y aprovechamiento para las zonas de distribución natural de *Pinus teocote* en San Luis Potosí. Estas herramientas también se podrán utilizar para la evaluación de otras especies del género *Pinus*, distribuidas en el estado de San Luis Potosí y así colaborar a tener un manejo sustentable de la extracción de recursos maderables del estado.

## 9. REFERENCIAS.

- **Aguirre-Calderón, 2013.** Modelización del crecimiento de *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. en el noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 17 (4): 28-41.
- **Alder, D.1980.** Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Con referencia especial a los trópicos. Vol 2. Predicción del rendimiento. Roma. Estudio FAO: Montes 22/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 80 pp
- **Álvarez G., J. G., M. Barrio A., U. Diéguez A. y A. Rojo A. 2004.** Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Actas de la Reunión de Modelación Forestal. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 18:303-309.
- **Andenmatten, E. y F. Letourneau. 2000.** Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para *Pinus oregon* (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Bariloche, Río Negro, Argentina. Comunicación Técnica Núm. 9. 10 p. Barrero *et al.*, 2011;
- **Ayerde L., D. 1996.** Análisis de curvas de crecimiento de árboles y masas forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales, Chapingo México. 255 p.
- **Barreto-Medel, H., M. Frederic, G. Nepveu y D. Álvarez-Lazo C. 2011.** Curvas anamórficas de índice de sitio para Plantaciones de *Pinus caribea* Morelet var. *caribea* Barret y Golfari de la empresa forestal integral MACURIJE (IFI) en la provincia de Pinar del Río, Cuba. Revista Chapingo: Serie de Ciencias Forestales 17(2): 245-252.
- **Burkhardt, H. & T. Gregoire.** 1994. Forest Biometrics. Handbook of Statistics, Vol. 12, Fourth Edition MacGraw Hill.

- **Carmean, W. 1972.** Site Index Curves for Upland Oaks in the Central States. *Forest Science* 18 (2): 109-120.
- **Castillo L., A., B. Vargas-Larreta, J. J. Corral R., J. A. Nájera L., F. Cruz C. y F. J. Hernández. 2013.** Modelo compatible altura - Índice de sitio para cuatro especies de pino en Santiago Papasquiario, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 4 (18): 86-103.
- **Clutter, J. L., J. C. Forston, I. V. Pienaar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983.** *Timber management: a quantitative approach*. Wiley & Sons. New York, NY, USA. 333 p.
- **Cornejo O., E. H., J. A. Pereyra G., O. Mares A., S. Valencia M. y C. Flores L. 2005.** Índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28 (3): 213-219.
- **Davis, L. S., K. N. Johnson, P. S. Bettinger and T. E. Howard 2001.** *Forest management. To sustain ecological, economic, and social values*. Fourth Ed. McGraw-Hill. Boston MA USA. 804 p.
- **Delgado-Caballero, C. E., A. Gómez-Guerrero, J. A. García-Salazar, J. R. Valdez-Lazalde, H. M. De los Santos P., A. M. Fierros-González y W. R. Horwath. 2009.** Índice de sitio y propiedades del suelo en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus urophylla* en el sureste de México. *Agrociencia* 43 (1): 61-72.
- **Gadow, K. V., S. Sánchez O y J. G. Álvarez G. 2007.** Estructura y crecimiento de bosque. University of Santiago de Compostela. [http://www.usc.es/uxfs/IMG/pdf/Estructura\\_y\\_crecimiento\\_del\\_bosque1-2.pdf](http://www.usc.es/uxfs/IMG/pdf/Estructura_y_crecimiento_del_bosque1-2.pdf)
- **Hernández L. J. A. y Valles G. A. G. 2009.** Modelos para la estimación del índice de sitio para *Pinus durangensis* Martínez en San Dimas, Durango. *Rev. Cien. For. Mex.* 2009, vol.34, n.105, pp. 185-196.
- **Hernández, R. J; García, M. J. J; García, C. X; Hernández, R. A; Muñoz, F. H. J y Samperio, J. M. 2014.** Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 6 (27): 24-36.

- **Holmes, R. L** 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin* 43: 69 – 78.
- **Imaña, E. J. y Encinas, B.O., 2008.** Epidometría forestal. Universidad de Brasilia, departamento de ingeniería forestal y facultad de ciencias forestales y ambientales. 1er edición. Mérida Venezuela. 72p.
- **Koppen, W. 1948.** Climatología. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 478 pp.
- **Mares, A. O., E. H; Cornejo O. S; Valencia M. y C. Flores L. 2004.** Índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en Cd. Hidalgo, Michoacán. Revista Fitotecnia Mexicana. 27 (1): 77-80.
- **McKenney, D. W., and J. H. Pedlar. 2003.** Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *Forest Ecology Management* 175:497-507.
- **Monárrez, G. J. C. y Ramírez, M. H., 2003.** Predicción del rendimiento en masas específicas de *Pinus durangensis* MTZ. En el estado de Durango. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Volumen IX, número 1: enero – junio 2003, p. 45 – 56.
- **Montero, M. y M. Kanninen. 2003.** Índice de sitio para *Terminalia amazónica* en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 23 (1): 29-35.
- **Robinson, W. J., Evans, R., 1980.** A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree ring bulletin.* 40: 59 – 64.
- **Rodríguez-Acosta, M. y B. Arteaga-Martínez. 2005.** Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. Revista Chapingo: Serie de Ciencias Forestales 11 (1): 39-44.
- **Rzedowski, J. 1966.** Vegetación del estado de San Luis Potosí. *Acta Cient. Potos.* 5:5-291.
- **Rzedowski, J., 2006.** Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

- **Sánchez V., N. M. y R. F. Castillo S. 2001.** Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en el Rincón, Oaxaca, México. *Foresta Veracruzana* 3 (2): 9-12.
- **Skovsgaard, J.P., J.K. Vanclay. 2008.** Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-age stands. *Forestry* 81(1): 13-31.
- **Swetnam, T. H., Thompson, M. A., Sutherland, E. K., 1985.** Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. *Agriculture Handbook* 639, US Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC, 39 pp.
- **Torres-Rojo, 2001 Torres, J. M. y O. S. Magaña T. 2001.** Evaluación de Plantaciones Forestales. Ed. Limusa. México, D.F., México. 472 p.
- **Van Laar A, A Akça 2007.** Forest Mensuration. Managing Forest Ecosystems, Volume 13. Springer. 383 p.
- **Vargas-Larreta, B., J. G. Álvarez-González, J. J. Corral-Rivas y O. Aguirre-Calderón. 2010.** Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33 (4): 343-351.
- **Velazco B., E., S. Madrigal H., I. Vázquez C., A. González H. y F. Moreno Sánchez. 2006.** Manual para la elaboración de tablas de volumen fustal en pinos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México D. F., México. Libro Técnico Núm. 1. 34 p.
- **Yamaguchi, D. K., 1991.** A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 414-416.
- **McDill, M., R. Amateis. 1992.** Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. *Forest Science* 38(2): 409-429.
- **Gregoire, T. 1993.** Estimation of forest growth from successive surveys. *Forest Ecology and Management* 56: 267-278.

- **Monserud, R.A. 1984.** Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Science* 30: 943-965.
- **Thrower, J.S. 1989.** Site quality evaluation using site index. *Silviculture Institute of British Columbia*. 11 p.
- **Sturtevant, B.R., S.W. Seagle. 2004.** Comparing estimates of forest site quality in old second-growth oak forests. *Forest Ecology and Management* 191: 311-328.



## 10. ANEXO.

Se presenta la derivación de fórmulas para obtener los valores de ICA e IMA a partir de la curvas de índice de sitio.

$$H = \frac{IS e^{\beta_1 \left( \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E} \right)}}{E^2} \quad [1.1]$$

Además se derivan fórmulas analíticas para calcular las edades donde ocurren el máximo ICA e IMA.

### Derivación de fórmulas para ICA

Para derivar la fórmula de ICA se debe obtener la primera derivada la fórmula (1.1)

$$H' = ICA = \frac{IS \cdot \beta_1 \cdot e^{\beta_1 \left( \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E} \right)}}{E^2}. \quad [1.2]$$

Para estimar la edad donde ocurre el máximo ICA se debe aplicar la primera derivada del ICA que sería equivalente a la segunda derivada de H

$$\begin{aligned} H'' = ICA' \\ = \frac{IS * \beta_1 * \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) * \beta_1 * E^{-2} * E^{-2} - 2 * E * IS * \beta_1 * \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right)}{E^4} \end{aligned}$$

Se debe igualar a cero para estimar el punto máximo de la curva que es equivalente al punto donde la pendiente es igual a cero

$$IS * \beta_1 * \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) * \beta_1 - 2 * E * IS * \beta_1 * \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) = 0$$

y despejar la edad que correspondería al punto de la curva donde ocurre el máximo ICA

$$E = \frac{\beta_1}{2} \quad [1.3]$$

Finalmente, para obtener una expresión que permita determinar el valor de ICA máximo para cualquier índice de sitio se debe reemplazar el valor de  $E$  obtenido en (1.3) en la expresión (1.2), obteniéndose el valor

$$ICA_{\max} = \frac{4 \cdot IS \cdot e^{\left(\frac{\beta_1}{E_0} - 2\right)}}{\beta_1} \quad [1.4]$$

### Derivación de fórmulas para IMA

Para obtener los valores de IMA se divide el valor de la ecuación de índice de sitio entre la edad.

$$IMA = \frac{IS \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right)}{E} \quad [1.5]$$

Para obtener el valor del  $IMA_{\max}$ , se obtuvo tomando la primera derivada de la función (1.5)

$$IMA_{\max} = H' = \frac{IS \cdot \beta_1 \cdot E^{-2} \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) \cdot E - 1 \cdot IS \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right)}{E^2}$$

Se debe igualar a cero para estimar el punto máximo de la curva que es equivalente al punto donde la pendiente es igual a cero

$$IS \cdot \beta_1 \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) \cdot E - IS \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) = 0$$

$$IS \cdot \beta_1 \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right) = IS \cdot \exp\left(\frac{\beta_1}{E_0} - \frac{\beta_1}{E}\right)$$

Se despejar la edad que correspondería al punto de la curva donde ocurre el máximo IMA

$$E = \beta_1$$

**[1.6]**