

Evaluación y manejo de fuentes semilleras de Teca (*Tectona grandis* Linn. f.) en la Estación Experimental Tropical Pichilingue, Ecuador

Álvaro Cañadas^{1*}, Diana Rade¹, Carlos Zambrano², Carlos Molina² y Luis Arce²

¹Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales

¹Av. 17 de Julio 5-21 y José Córdova, Ibarra, Ecuador

²Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP)

²Vía Quevedo-El Empalme Km 5,5, Ecuador

*Autor para correspondencia, correo electrónico: alvarogustavo.canadaslopez@alumni.uni-goettingen.de

Editado por/Edited by: Diego Cisneros H., Ph.D.

Recibido/Received: 11/02/2013. Aceptado/Accepted: 30/05/2013.

Publicado en línea/Published on Web: 28/06/2013. Impreso/Printed: 06/06/2013.

Abstract

There has not been performed any kind of evaluation of the plantations of Teak to this date at the Tropical Experimental Research Station Pichilingue of INIAP (EETP-INIAP) in order to determine the particular characteristics of these stands; as well as the objective of putting to use the production of seeds as aim to carry out article 9 of the Normative of Forest Seeds. This current study is focussed on collecting information that can be utilized to select a suitable and efficient action plan to implement in the usage as well as the administration of the plantations. The obtained data in this investigation demonstrate that the methodology proposed to evaluation of quality and assessment of forest plantations, and was applied on 2570 Teak trees, is of little suitable. This is due to the fact that 46 % of the variables are not relevant or useful to the characterisation of the phenotypes of the Teak trees and this has direct incidence to costs and effectiveness of the method. Currently the effect of the influence of location quality in relation to the specific phenotypically characteristics of Teak, is being studied where the new methodology is being proposed to facilitate the characterisation of the phenology of Teak. In this study the relative spacing index (NG) fluctuate between 1,32 and 1,48, which means that all of the forest stand would be lowly heavily thinned. With this treatment all of the forest stands of the EETP-INIAP would belong to the category of Source of Collected Seeds. The maximum heights obtained between 27,01; 26,52; 23,78; and 22,60 m, the age being 25 years and a growth between 6 and 9 m³ ha⁻¹ per year demonstrate that the EETP-INIAP is an excellent place for the growth of Teak trees.

Keywords. Multivariate Analysis, Water Balance, Phenotypical Characteristic, Thinning Intensity, Weibull Function

Resumen

La principal fuente semillera de teca (*Tectona grandis*) del Ecuador se encuentra en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del INIAP (EETP-INIAP). El presente estudio puede ser empleado para escoger apropiadamente un plan eficiente de acciones para plantaciones de teca, con el propósito de cumplir con el artículo 9 de la Normativa de Semillas Forestales del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). Los datos obtenidos demuestran que, aplicando la metodología propuesta por varios autores para medir la calidad de plantaciones en la evaluación de calidad y valoración de plantaciones forestales en el Ecuador y aplicada a 2570 árboles de teca de la EETP-INIAP es de baja adaptación, debido a que un 46 % de las variables no son relevantes y útiles para la caracterización fenotípica de las mismas, lo cual tiene directa incidencia en costos y eficacia del método. Actualmente se está estudiando los efectos de la influencia de las calidades de sitio sobre las características fenotípicas específicas de la teca y se presenta una nueva metodología para la caracterización fenológica de la teca. En este estudio, el índice de tipo de raleo (NG) fluctúa entre 1,32 y 1,48, de ahí que éstos serían ligeramente raleados. Con este tratamiento, todos los rodales de la EETP pertenecerían a la categoría de Fuente Semillera Seleccionada. Las alturas máximas obtenidas de 27,01; 26,52; 23,78 y 22,60 m, a la edad de 25 años y crecimientos entre 6 a 9 m³ ha⁻¹ año. Esto datos demuestran que, la EETP-INIAP es un excelente lugar para el crecimiento de la teca.

Palabras Clave. Análisis Multivariado, Balance Hídrico, Características Fenotípicas, Intensidad de Raleo, Función Weibull

Introducción

En el Ecuador de acuerdo a SENPLADES, el sector forestal y la reforestación son considerados como prioridad para el Estado. Así, el MAE, 2005 reporta que, las tierras con potencial para ser reforestadas alcanzan una extensión de más de 2 millones de hectáreas, concluyéndose la evidente potencialidad productiva forestal del Ecuador, en términos de ventajas comparativas, que no está siendo debidamente utilizada. Concomitantemente con esto, se están creando varios programas para promover plantaciones forestales productivas, establecer sistemas agro-silvopastoriles y plantaciones de protección, con la finalidad de recuperar áreas degradadas y al mismo tiempo generar fuentes de ingreso para los productores, a través de la producción forestal. Como ejemplos se pueden mencionar: 1) el Plan Nacional de Reforestación creado en el 2005 en el Perú que pretende establecer cerca de 900000 ha. de plantaciones comerciales y de protección ambiental; 2) el gobierno del Pará, Brasil a través del Programa “Un Billón de Árboles” procura incentivar a 120 mil productores familiares para que planten especies forestales. El Plan Forestal del MAGAP en el Ecuador incentiva a productores familiares para que establezcan 1'000000 ha., de plantaciones sociales y sistemas agroforestales en 20 años [1]. El criterio de selección de especies para la producción de madera ha sido mayormente dirigido hacia especies que asignan una mayor proporción de biomasa para suministro de madera y tener un fuerte control de crecimiento apical [2]. De ahí que, el 85 % de las plantaciones forestales en los trópicos han sido establecidas especialmente con únicamente tres géneros: *Pinus*, *Eucalyptus* y *Tectona* [3]. Para el año de 1999, existió una estimación de entre 8 a 11,1 millones de hectáreas reforestadas en Latino América, la mayoría de las plantaciones se ha realizado con especies con altos niveles de crecimiento, no nativas como las especies *Pinus* y *Eucalyptus* para la extracción de madera [4]. Para el 2004, Evans y Turnbull [2] resaltan que, las plantaciones forestales en América Latina se han concentrado en muy pocas especies exóticas, pero muy bien conocidas. Por ejemplo, *Tectonagrandis*, *Acacia sp.* y *Eucalyptussp* representaron más del 51 % del total de las reforestaciones realizadas en el Neotrópico [5]. De acuerdo a Pérez y Kanninen [6] en Costa Rica como en otros países, la mayoría de plantaciones de teca no han alcanzado las expectativas productivas. Entre las principales causas se puede mencionar a la inapropiada selección de sitio, utilización de un pobre material genético de plantación y una falta de un manejo silvicultural apropiado. No obstante, la teca (*Tectonagrandis* L.) ha sido una de las principales especies para aprovechar las oportunidades de inversión debido a su alta calidad de madera y excelente rendimiento en crecimiento [7]. CORMADERA/OIMT 2001 reporta que, la teca en el Ecuador fue introducida al país hace más de 50 años, siendo la provincia de Los Ríos uno de los nichos de adaptación y desarrollo de esta especie, por lo que se convirtió en la princi-

pal fuente de semillas para el establecimiento de plantaciones comerciales de esta madera exótica en el país. Aunque la actividad forestal se ha incrementado en los últimos años, no se ha dado énfasis a la calidad del material reproductivo que se está utilizando, especialmente para optimizar su potencial de producción. De acuerdo a CORMADERA/OIMT 2001, la principal fuente semillera de teca que se ha utilizado en el Ecuador se encuentra en la Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP) perteneciente al Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ubicada en el Cantón Quevedo, Provincia de Los Ríos. En relación a este tema, en febrero del 2004, el MAE expidió la normativa sobre semillas forestales, con la finalidad de: definir indicadores mínimos para la producción de semillas forestales; establecer mecanismos para la comercialización de semillas de calidad física y fisiológica razonablemente aceptables; establecer un registro de fuentes semilleras, productores, comerciantes e inspectores de semillas forestales; crear un banco de datos de semillas forestales, que permita identificar las mejores progenies según las especies; determinar un mecanismo de supervisión del manejo de semillas forestales; establecer condiciones de comercialización de semillas forestales acordes con la Política Forestal del Estado.

Hasta la presente fecha, en la EETP del INIAP no se ha realizado ninguna evaluación de las plantaciones de teca para determinar las características particulares de estos rodales con fines de darles un manejo para la producción de semillas, con el propósito de cumplir con el artículo 9 de la Normativa de Semillas Forestales. El presente estudio se enfoca en la calidad fenotípica de los árboles y tiene como objetivos específicos evaluar cualitativamente y establecer la forma de manejo de los rodales de teca, información que se usará para escoger apropiadamente un plan eficiente de acciones a llevar a cabo en las plantaciones del INIAP Pichilingue.

Métodos

Características del área de estudio

La Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP) del INIAP está ubicada en el km 5,5 de la vía Quevedo–El Empalme en la Provincia de Los Ríos (79°21' W, 1°06' S, altitud 120 m), presenta una temperatura promedio anual de 24°C, acogiendo a una heliofanía de 898,2 horas luz/año y recibe una precipitación media anual de 2000 mm/año y su distribución en el año se presenta en la Figura 1.

Pertenece a la formación ecológica de Bosque Húmedo Tropical [8]. Para determinar los valores del potencial de evapotranspiración se tomaron la serie de datos comprendidos entre el 2004 al 2008 del INAMHI sobre precipitación, presión de saturación de vapor de agua y humedad relativa. Con esta información, se desarrolló un modelo que permite predecir los valores de eva-

| Variables específicas | Características fenotípicas | Tipo de Variable |
|---|------------------------------------|-------------------------|
| Posición Sociológica | Dominante | 1 = Si, 0 = No |
| | Co dominante | 1 = Si, 0 = No |
| | Intermedio | 1 = Si, 0 = No |
| | Suprimido | 1 = Si, 0 = No |
| Bifurcación o reiteración (hc: altura comercial) | a 10 metros o mas | 1 = Si, 0 = No |
| | a 7,5 metros | 1 = Si, 0 = No |
| | a 5 metros | 1 = Si, 0 = No |
| | a 2,5 metros | 1 = Si, 0 = No |
| Inclinación | Recto: <30° | 1 = Si, 0 = No |
| | Inclinado: >30° | 1 = Si, 0 = No |
| Rectitud de fuste | Recto | 1 = Si, 0 = No |
| | Torcedura leve <0,05 m del eje | 1 = Si, 0 = No |
| | Torcedura aguda >0,05 m del eje | 1 = Si, 0 = No |
| | Torcido en dos planos o más | 1 = Si, 0 = No |
| Fito sanidad | Totalmente sano | 1 = Si, 0 = No |
| | Aceptablemente sano | 1 = Si, 0 = No |
| | Enfermo | 1 = Si, 0 = No |
| Grosor y ángulo de inserción de ramas | Finas entre 90° y 60° | 1 = Si, 0 = No |
| | Gruesas mayor a 60° | 1 = Si, 0 = No |
| Gambas o aletones | Ausencia | 1 = Si, 0 = No |
| | Presencia | 1 = Si, 0 = No |
| Grano en espiral | Ausencia | 1 = Si, 0 = No |
| | Presencia | 1 = Si, 0 = No |
| Auto poda (Ausencia de ramas o nudos) | Ausencia de ramas en las 4 trozas | 1 = Si, 0 = No |
| | En las 3 primeras | 1 = Si, 0 = No |
| | En las 2 primeras | 1 = Si, 0 = No |
| | En la primera | 1 = Si, 0 = No |
| Dasonométricas | Diámetro | Numérica |
| | Altura | Numérica |

Tabla 1: Evaluación de calidad y estimación del valor en pie de las plantaciones de teca de la EETP-INIAP, provincia de Los Ríos, Ecuador.

potranspiración para el año 2012, el cual se describe a continuación:

$$PET = 20,57 \times Es \times (1 - HR/100) \quad (1)$$

Donde:

PET = Evapotranspiración (mm/mes)

Es = Presión de saturación de vapor (m bar)

HR = Humedad relativa

Las bondades de ajuste de dicho modelo presentó un coeficiente de correlación de 0,84 ($p < 0,0001$) y las distribución de residuos entre los valores medidos y predichos por el modelo no presentan ninguna tendencia (Figura 1 abajo). El modelo sobre y subestima 15 mm por mes. Lo cual le confiere a este modelo gran confiabilidad para predecir los valores del potencial de evapotranspiración en la zona de influencia de la estación Pichilingue. De acuerdo al balance hídrico, los meses que presentan un déficit de hídrico son Junio, Julio, Agosto y Noviembre (Figura 1).

Ubicación de los rodales de Teca

La superficie total de los rodales de teca analizados en el presente estudio fue de 0,048 km², los cuales están divididos en cuatro rodales.

Variables evaluadas

Entre Enero y Junio del 2006, se realizó un censo total de la población de árboles de los 4 rodales, con un total de 2566 árboles. Las variables resumidas en la Tabla 1 fueron registradas de acuerdo a la metodología propuesta por Murillo y Badilla [9]. Para la medición de la altura comercial se utilizó una pistola A AGA escala 1:20.

Análisis de las características fenotípicas de los árboles

Para cada una de las 30 variables, se calcularon estadísticas descriptivas. Se realizaron comparaciones de medias entre las zonas mediante pruebas de t para variables cuantitativas y análisis de contingencia para las cualitativas.

Análisis de componentes principales

Para reducir el número de variables y encontrar aquellas de mayor peso, se hizo un análisis de componentes principales, realizando una rotación de ejes tipo varimax e identificando correlaciones entre las variables de los componentes y luego seleccionando los que tenían valor propio mayor a uno [10].

Análisis de conglomerados y canónico discriminante

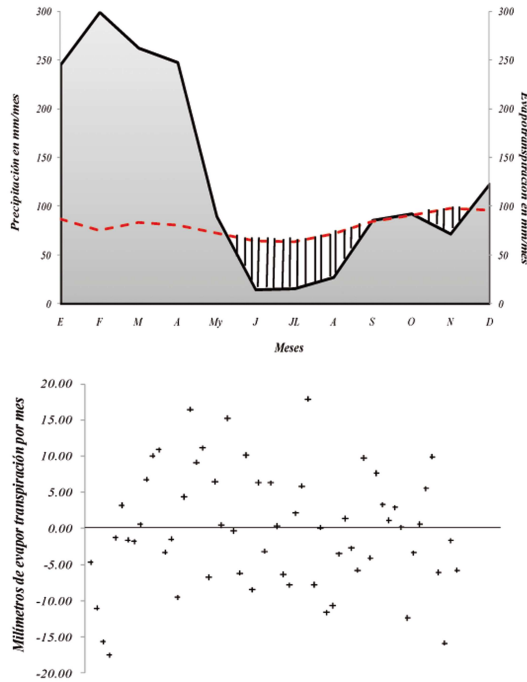


Figura 1: Distribución pluviométrica y evapotranspiración (línea roja) de la estación climatológica Pichilingue (Arriba: zona achurada representa los meses de déficit hídrico) y bondades de ajuste del modelo de predicción del Potencial de Evapotranspiración (Abajo: Distribución de residuos entre valores observados y predichos por el modelo)

Para agrupar los árboles con características similares se hizo un análisis de conglomerados con las variables involucradas. Se midieron las distancias entre cada par de observaciones con el método de Gower, que permite trabajar con diferentes tipos de variables y las estandariza según su rango [10, 11]. Con la matriz de distancias generada, se hizo el análisis de conglomerados usando el método de varianza mínima de Ward y la prueba de pseudo t^2 para elegir el número adecuado de estos. Se realizó un análisis canónico discriminante, para encontrar las variables causantes de la conformación de los grupos y se calculó la distancia entre las combinaciones de pares de estos para observar similitudes, usando la prueba de Wilk's Lambda para probar la hipótesis que eran diferentes. Estos análisis fueron aplicados con el programa SPSS versión 15 para Windows.

Descripción del tipo de Raleo

Con la finalidad de determinar la intensidad de los raleos a realizarse, el índice de espaciamiento relativo (RS) fue utilizado, el cual es calculado relacionando el número de árboles (N) y la altura dominante (H_o).

$$RS = \frac{\sqrt{\frac{1000}{N}}}{H_o} \quad (2)$$

El raleo puede ser descrito con la ayuda de la relación árboles-área basimétrica y es conocida como NG [12] y se expresa de la siguiente forma:

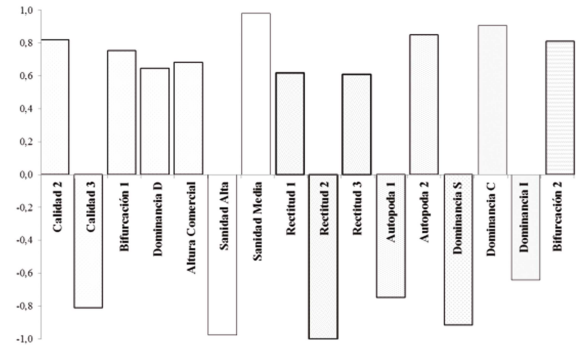


Figura 2: Representación gráfica de los resultados del análisis de componentes principales de 16 variables seleccionadas. EET-Pichilingue-INIAP, provincia de Los Ríos, Ecuador

$$NG = \frac{N_{out}/N_{total}}{G_{out}/G_{total}} = \frac{rN}{rG} \quad (3)$$

Donde:

N_{out} = Número de árboles excluidos del rodal

N_{total} = Número total de árboles del rodal

G_{out} = Área basimétrica extraída del rodal

G_{total} = Área basimétrica total del rodal

Un principio importante para la descripción de los cambios de ubicación y forma de las clases diamétricas consiste en modelar la distribución teórica de los parámetros antes y después del raleo [13]. La distribución Weibull se ha popularizado para modelar el crecimiento y rendimiento de las plantaciones, esto se debe a su sencillez y nivel de precisión [14]. La función tri-paramétrica es la siguiente:

$$f(x) = \frac{c}{b} \left[\frac{x-a}{b} \right]^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \quad (4)$$

Donde x representa a la variable aleatoria (diámetros de los árboles). Los parámetros de la distribución son los siguientes:

a = Parámetro de ubicación, el cual relaciona el rango de distribución

b = Parámetro de escala, el cual determina la densidad del rodal

c = Parámetro de forma, el cual establece la asimetría de la distribución

Resultados

Evaluación de calidad

Variables que presenten comunalidades mayores a 0,70 pueden ser vistas como aceptables para la interpretación del análisis de componentes principales [10]. De las 30 variables propuestas en la metodología, han sido eliminadas el 46%. En la Tabla 2, se presenta las variables seleccionadas por sus valores son mayores a 0,70. La intensidad básica de conducir un análisis de componentes

| VARIABLES | Valores de las Comunalidades |
|------------------|------------------------------|
| Calidad 2 | 0,71 |
| Calidad 3 | 0,73 |
| Autopoda 1 | 0,80 |
| Autopoda 2 | 0,75 |
| Sanidad Alta | 0,96 |
| Sanidad Media | 0,96 |
| Rectitud 1 | 0,76 |
| Rectitud 2 | 0,99 |
| Rectitud 3 | 0,77 |
| Bifurcación 1 | 0,83 |
| Bifurcación 2 | 0,71 |
| Dominancia C | 0,96 |
| Dominancia D | 0,72 |
| Dominancia I | 0,81 |
| Dominancia S | 0,89 |
| Altura Comercial | 0,79 |

Tabla 2: Valores de comunalidades de las variables seleccionadas

principales es de reducir y crear un nuevo set de variables no correlacionadas unas con otras y que explique la variación entre observaciones.

En la Figura 2, se resume la estructura de los 6 componentes principales extraídos, los cuales explican el 82,62 % del total de la varianza. Con las 16 variables seleccionadas, se generó la matriz de distancias para el análisis de conglomerados.

La prueba de pseudo t^2 sugirió conformar tres conglomerados (Tabla 3). El primero agrupó a 1995 árboles (77,63 %), el segundo a 317 árboles (12,33 %) y el tercero a 258 árboles (10,04 %).

La prueba multivariada de Wilk's Lambda, mostró diferencias altamente significativas entre los conglomerados ($P = 0,0001$). El análisis discriminante basado en la matriz de covarianza combinada de las 16 variables, reveló diferencias bien marcadas entre conglomerados (Tabla 4).

Del análisis discriminante se obtuvieron dos variables canónicas, la (1) tuvo peso fuerte de características que permiten identificar problemas claros de manejo de las plantaciones y de mala calidad de semilla utilizada, con una carga negativa para autopoda 1 y rectitud 3, indicando relaciones inversas con éstas. La (2) mostró mayor influencia de aspectos relacionados con la sanidad, calidad y rectitud 1, 2; variables que revelan relaciones inversas (Figura 3).

Conglomerado 1 está formado por un numeroso grupo de árboles de calidad buena y aceptable, mayor ramificación, alta presencia de grano y gambas, de sanidad alta, menor presencia de torceduras, cantidad de bifurca-

| Conglomerados | 1 | 2 | 3 |
|---------------|--------|-------|---|
| 1 | 0 | | |
| 2 | 225,34 | 0 | |
| 3 | 101,56 | 75,56 | 0 |

Tabla 3: Matriz de distancias generalizadas al cuadrado $D^2(i|j)$ entre pares de conglomerados

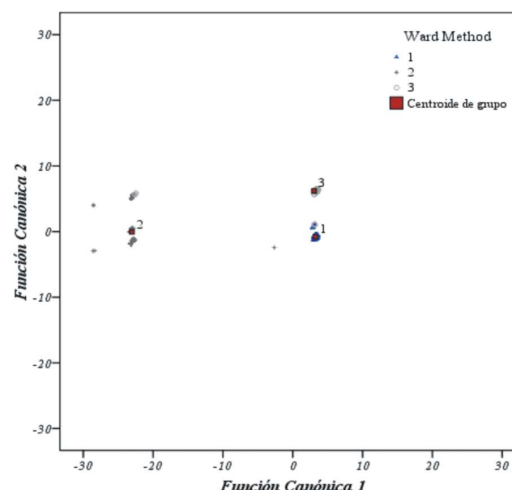


Figura 3: Relación entre los conglomerados o grupos de árboles con respecto a las variables canónicas 1 y 2, EET-Pichlingue-INIAP, provincia de Los Ríos, Ecuador

ciones altas, se encuentran en los 3 estratos del bosque (D, C, I), con diámetros promedio de 0,33m y altura comercial promedio de 8,89 m (Tabla 5). Conglomerado 2 se caracterizó por la presencia de árboles sin valor comercial maderable, sanidad baja, presencia de torceduras severas, fustes bifurcados a baja altura que son indeseables para la producción de madera, pertenece al estrato suprimido, diámetro promedio de 0,22 m y una altura comercial promedio 3,29 m. Conglomerado 3 agrupa a árboles que permiten aprovechar al menos el 50 % del fuste en producto de aserrío, sanidad media, con torceduras o alabeos leves, ausencia de ramas en las 3

| Variable canónica | CAN1 | CAN2 |
|------------------------------------|---------|---------|
| Correlación canónica | 0,99*** | 0,90*** |
| Valor propio | 74,78 | 4,33 |
| Explicación de la variabilidad (%) | 94,51 | 5,48 |

| Variables | | |
|--------------------|-------|-------|
| Altura Comercial S | 0,86 | |
| Autopoda 1 S | -0,70 | |
| Dominancia D S | 0,66 | |
| Dominancia C S | 0,57 | |
| Bifurcación 2 S | 0,54 | |
| Autopoda 2 M | 0,49 | |
| Dominancia I | 0,48 | |
| Bifurcación 1 S | 0,47 | |
| Rectitud 3 S | -0,40 | |
| Dominancia S | 0,20 | |
| Sanidad Media | | 0,96 |
| Sanidad Alta | | -0,87 |
| Calidad 3 | | 0,85 |
| Calidad 2 | | -0,50 |
| Rectitud 1 | | -0,45 |
| Rectitud 2 | | 0,40 |

Tabla 4: Variables de mayor peso en la estructura canónica total y su relación con la clasificación de árboles de teca en la EETP-INIAP, provincial de Quevedo, Ecuador.

*** estadísticamente diferentes de cero ($P < 0,001$) * ($P < 0,05$)

primeras trozas, con inclinación, este conglomerado de árboles se presenta en los tres estratos del bosque (D, C, I). El diámetro promedio es de 0,33m, y la altura comercial promedio es de 8,78 m.

Descripción del raleo

Estructura forestal de los rodales

Dos de las variables de dimensión más relevantes para la práctica forestal son el diámetro a la altura de pecho y la altura. La frecuencia relativa de una clase diamétrica se puede interpretar como la probabilidad de que un árbol de un rodal con una distribución diamétrica determinada pertenezca a dicha clase diamétrica. En la Figura 4 se muestra el histograma de frecuencias de la distribución de diámetros. Sobre la distribución de frecuencias empírica discreta se ha representado una curva continua tanto para los rodales antes (línea celeste) y después del raleo (línea roja) (Figura 4). El área bajo la curva entre dos valores de diámetro corresponde con la probabilidad de que un árbol cualquiera del rodal tenga un diámetro comprendido entre esos dos valores. A este tipo de funciones continuas se las denomina funciones de densidad. Así, en barras grises se muestra la estructura actual de los rodales (Figura, 4), mientras que la distribución diamétrica de los árboles remanentes (las barras color negro) se representa en la Figura 4.

A través de la línea continua se modela la distribución estimada y la zona achurada representa el área estimada de raleo. Por otro lado, el parámetro de ubicación a , simboliza al diámetro mínimo observado, este parámetro se incrementaría por acción de la eliminación de clases diamétricas pequeñas. El parámetro de escala b , se ampliaría como efecto de la disminución de la densidad de los rodales como consecuencia del raleo, mientras el parámetro de forma c , indica un claro desplazamiento hacia la derecha, como consecuencia de dejar en pie árboles de clases diamétricas grandes (Tabla 6).

Intensidad del raleo

La caracterización de la intensidad del raleo es resumida en la Tabla 7. Se resalta la alta densidad de los rodales, los cuales mediante el raleo se reducirían a un

promedio de 72 árboles por hectárea. Las alturas máximas fluctúan entre 27,51 y 22,60m, mientras que el área basimétrica promedio de 40,34 m² se reduciría a 7,25 m². El espaciamiento relativo promedio es de 19,21 %, el cual aumentaría a 47,80 %. El volumen inicial promedio es de 225,21 m³ha⁻¹ y serían extraídos un total de 171,26 m³ha⁻¹, quedando un volumen final de 53,95 m³ha⁻¹. Los valores de NG son mayores a uno (Tabla 7).

Discusión

Método de evaluación de plantaciones de Teca

Los datos obtenidos en la presente investigación, aplicando la metodología empleada para calidad de las plantaciones, propuesta por Rosas y Murillo [15] y posteriormente por Murillo y Badilla [9] para un total de 2570 árboles de teca, demuestran que el 46 % de las variables no son relevantes y útiles para la caracterización fenotípica de los mismos, lo cual tiene directa incidencia en costos y eficacia del método. De las 16 variables seleccionadas, la primera Función Canónica Discriminante que permite separar a los árboles de teca abarca a 10 variables, que explican el 94,51 % de la varianza. El 50 % de estas variables están relacionadas con la altura (manejo de la plantación). Kermodé [16] y Ryan [17] mantienen que, los árboles de teca presentan más aletones en bosque deciduos de poca humedad, los árboles de teca plantados en pendientes tienen principalmente los troncos cilíndricos, de igual manera árboles que han crecido sobre una topografía plana, poseen fustes que presentan aletones. De acuerdo a Aung [18], los aletones del fuste parecen ser causados por las raíces que crecen sobre suelos poco profundos que presentan una capa impermeable o agua freática muy alta. Esas raíces laterales llevan agua y minerales que fomentan un crecimiento mayor sobre todo el fuste y si son distribuidos desigualmente esto causará aletones. Justamente estos aspectos están siendo estudiados en la actualidad para determinar la influencia de las calidades de sitio sobre las características fenotípicas específicas de la teca [19, 20]. Estas dos investigaciones se basan en la metodología propuesta por Keiding et al., [21] y Kjaer et al., [22] para caracterizar fonológica de la teca mediante los siguientes parámetros: medición de altura total, comercial y diámetro a la altura del pecho. El radio de la corona es comúnmente medida como parámetro de competencia [23]. El radio corona/diámetro es un importante parámetro para deducir el límite de producción de área basal por sitio determinado de una especie. Alder y Synnott [24] describen la posición, clasificación de la corona (Tabla 8).

Espesor de la corteza: Es un parámetro que varía con las especies, edad, genotipo, grado de crecimiento y posición del árbol. Philip [25] encontró que, el espesor de la corteza depende de la naturaleza del cambium y el método de exfoliación. La exfoliación tiende a ser retardada, en árboles de lento crecimiento y las capas pueden ser acumuladas. En contraste, árboles de crecimiento rápido, lanzan la corteza más fácilmente y acumulan

| Rodal | Estado del Rodal | Parámetros de la Función Weibull | | |
|-------|-------------------|----------------------------------|-------|------|
| | | a | b | c |
| 1 | Antes del Raleo | 15 | 26,40 | 3,94 |
| | Después del Raleo | 20 | 26,70 | 6,00 |
| 2 | Antes del Raleo | 14 | 28,60 | 3,20 |
| | Después del Raleo | 22 | 31,30 | 6,20 |
| 3 | Antes del Raleo | 15 | 28,40 | 3,30 |
| | Después del Raleo | 29 | 33,10 | 7,40 |
| 4 | Antes del Raleo | 14 | 30,00 | 3,50 |
| | Después del Raleo | 25 | 25,20 | 5,50 |

Tabla 6: Cambios de los parámetros de la función Weibull, antes y después del raleo de teca, EET-Pichilingue-INIAP, provincia de Los Ríos, Ecuador

| | Conglomerado 1 | Conglomerado 2 | Conglomerado 3 | Sig | Chi cuadr/P |
|---------------|----------------|----------------|----------------|------|-------------|
| Número | 1991 | 317 | 258 | *** | 259,23 |
| Calidad 1 | 58 | 0 | 0 | *** | 17,13 |
| Calidad 2 | 559 | 0 | 11 | *** | 178,00 |
| Calidad 3 | 1359 | 189 | 245 | *** | 95,42 |
| Calidad 4 | 15 | 128 | 2 | *** | 818,40 |
| Autopoda 1 | 751 | 295 | 112 | *** | 338,64 |
| Autopoda 2 | 606 | 18 | 66 | *** | 85,51 |
| Autopoda 3 | 389 | 4 | 46 | *** | 64,51 |
| Autopoda 4 | 295 | 0 | 34 | *** | 44,30 |
| Gambas | 478 | 122 | 46 | *** | 38,64 |
| Grano | 1924 | 295 | 247 | ** | 9,43 |
| Sanidad alta | 1983 | 236 | 0 | *** | 19,82 |
| Sanidad Media | 0 | 65 | 255 | *** | 20,65 |
| Sanidad Baja | 8 | 16 | 3 | *** | 56,71 |
| Ramas | 188 | 2 | 32 | *** | 31,97 |
| Rectitud 1 | 350 | 41 | 37 | n.s. | 5,32 |
| Rectitud 2 | 1216 | 172 | 164 | ** | 6,46 |
| Rectitud 3 | 425 | 99 | 57 | *** | 15,30 |
| Rectitud 4 | 0 | 5 | 0 | *** | 35,54 |
| Inclinación | 1829 | 233 | 243 | *** | 166,25 |
| Bifurcación1 | 790 | 2 | 97 | *** | 185,25 |
| Bifurcación2 | 312 | 6 | 47 | *** | 46,29 |
| Bifurcación3 | 540 | 50 | 66 | *** | 18,51 |
| Bifurcación4 | 349 | 259 | 48 | *** | 599,13 |
| Dominancia C | 792 | 0 | 39 | *** | 192,59 |
| Dominancia D | 834 | 1 | 97 | *** | 204,54 |
| Dominancia I | 365 | 0 | 59 | *** | 75,56 |
| Dominancia S | 0 | 316 | 3 | *** | 25,29 |
| Diámetro | 33,73 | 32,64 | 32,92 | *** | 289,43 |
| Altura | 8,89 | 3,29 | 8,78 | *** | 390,97 |

Tabla 5: Diferencias fenotípicas de teca entre conglomerados en la EETP-INIAP, provincial de Los Ríos, Ecuador.

| Rodal | Estado del Rodal | Número de Árboles | Altura Promedio (m) | Altura Máxima (m) | Área Basimétrica (m ²) | Volumen Comercial (m ³) | NG |
|-------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------|
| 1 | Antes | 346 | 20,78 | 23,78 | 47,01 | 25,72 | 1,48 |
| | Después | 80 | 21,59 | | 22,68 | 6,02 | |
| 2 | Antes | 693 | 24,65 | 27,01 | 42,21 | 59,55 | 1,32 |
| | Después | 77 | 25,90 | | 13,80 | 7,65 | |
| 3 | Antes | 347 | 20,76 | 22,60 | 58,42 | 29,34 | 1,41 |
| | Después | 57 | 21,67 | | 23,75 | 6,31 | |
| 4 | Antes | 511 | 22,26 | 26,52 | 43,59 | 46,78 | 1,38 |
| | Después | 75 | 23,78 | | 16,68 | 9,02 | |

Tabla 7: Caracterización de los raleos de teca referido a la hectárea, EET-Pichilingue-INIAP, provincia de Los Ríos, Ecuador

menos. El espesor de corteza se puede medir a la Altura del Pecho de un árbol de teca.

Forma de fuste y persistencia del eje

Una curvatura es definida como la distancia entre dos arcos de un fuste (Figura 5, izquierda). Una curvatura es considerada seria, si parte del fuste se aleja de la línea recta (eje imaginario) longitudinal [21].

Persistencia

Es la altura en la cual un eje es interrumpido por la presencia de ramas y es una característica significativa en relación a la calidad del fuste. Según Kjaer et al.,

[22] una rama es considerada un tronco o eje, si este excediera a los otros por un cuarto en el espesor.

El punto de ramificación es ocasionalmente puesto en discusión, cuando una o dos ramas gruesas se han desarrollado en el fuste. Sin embargo, si una rama principal puede ser reconocida por su tamaño, esa rama va a ser clasificada como persistente.

Tamaño y manera de ramificación

La clasificación del tamaño de las ramas es una medida relativa del diámetro de las ramas en proporción con el diámetro del fuste al pie de la bifurcación y se divide en 5 clases.

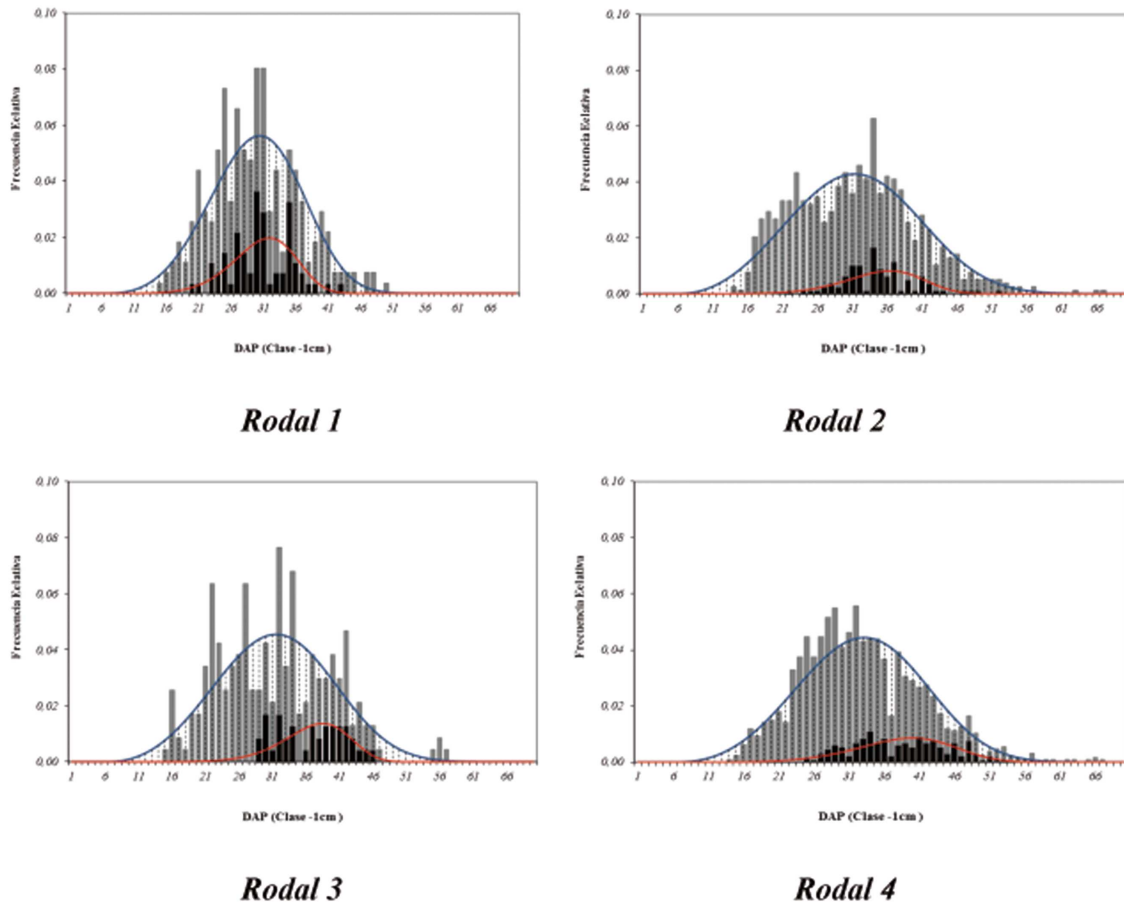


Figura 4: Distribución diamétrica antes y después del raleo de teca, EET-Pichilingue-INIAP, provincia de Los Ríos, Ecuador

| Clase | Posición | Forma |
|-------|------------------------------|---|
| 1 | Emergente | Perfecto |
| 2 | Luz completo sobre la corona | Bueno |
| 3 | Algo de luz sobre la corona | Tolerable, asimétrico o delgado |
| 4 | Algo de luz lateral | No satisfactorio, parte muerta y asimétrica |
| 5 | No recibe luz directa | Muy pobre, degeneración muerte |

Tabla 8: Clasificación de la posición de la corona para plantaciones de teca

La manera de ramificación es graficada en la Figura 6.

Protuberancias o brotes

Este fenómeno esta cerradamente relacionado con la calidad del fuste y la ramificación del mismo. Este es descrito como una cicatriz antes del natural corte de ramas o epicornics. Kjaer et al., [22] los clasifica en la Tabla 11.

Aletones

Define como, la figura no circular de un tronco, que típicamente desarrolla por el crecimiento del lado superior de las raíces, mientras mantiene el apoyo de los árboles.

| Clase | Posición | Forma |
|-------|--|---|
| 1 | Recto | Completa |
| 2 | Poco inclinado, con pocas ramas pequeñas | Eje ramificado en la mitad del 4to cuarto |
| 3 | Inclinado con muchas ramas pequeñas | Eje ramificado entre el 3er y 4to cuarto |
| 4 | Torcido con una o dos ramas gruesas | Eje ramificado en la mitad 3er cuarto |
| 5 | Torcido con tres o más ramas gruesas | Eje ramificado entre el 2do y 3ro cuarto |
| 6 | | Eje ramificado en la mitad del 2do cuarto |
| 7 | | Eje ramificado entre 1ro y 2do cuarto |
| 8 | | Eje ramificado en la mitad 1er cuarto |
| 9 | | Doble o múltiple tronco a nivel del suelo |

Tabla 9: Clasificación de la posición de ramas para plantaciones de teca.

Las subclases, número de protuberancias y la severidad de los aletones son propuestos por Kjaer et al., [22] y se muestra en la Figura 7.

Manejo de fuentes semilleras

Intensidad del raleo

En este estudio, el índice de tipo de raleo (NG) es relativamente uniforme y está distribuido en intervalos mayores a uno, entre 1,32 y 1,48. De acuerdo a Abetz [26] y Kramer [27], todos los rodales serían ligeramente raleados. Con esta intervención la EETP podría cumplir con las regulaciones de Ley, prevista en la Normativa de Semillas Forestales. De acuerdo a esta Normativa del MAE 2005, los rodales de la EETP pertenecerían al siguiente tipo de fuente semillera: “d. Fuente Semillera Seleccionada”. Son rodales que no cumplen con uno o varios de los requisitos establecidos para rodales semilleros, principalmente porque no presentan un aislamiento adecuado, menos de 75 árboles aceptables por hectárea o porque aún no han sido sometidos a clareos de depuración. Las fuentes semilleras seleccionadas serán establecidas a partir de rodales naturales y plantaciones de cualquier tipo; deberán tener las siguientes características:

1. El rodal deberá ser superior a otros dentro de una misma área ecológica o región de procedencia.
2. La base genética deberá ser amplia, con al menos 200 individuos por hectárea para plantaciones.
3. Deberán haber por lo menos 50 árboles por hectárea con las características fenotípicas deseables según la especie.

Por otro lado, Bermejo, et al., [28] valida sus tablas de producción para plantaciones de teca en Costa Rica, mediante los siguientes tratamientos silviculturales:

1. Densidad de Plantación: 1111 árboles/ha (3m x 3 m).
2. Primer Raleo Sistemáticos a los 3 años de edad (altura máxima 8 m). La densidad del rodal sería de 750 árboles/ha aproximadamente.
3. El primer raleo comercial a los 5–6 años de edad (altura promedio = 15 m)

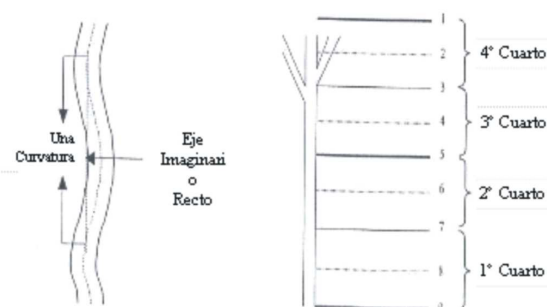


Figura 5: Ilustración de una curvatura (izquierda) y clases para determinar la persistencia del eje [21, 22]

| Clase | Tamaño de la rama | |
|-------|-------------------|--|
| 1 | Muy Liviano | Menos de 1/4 de diámetro del fuste |
| 2 | Liviano | Alrededor de 1/4 de diámetro del fuste |
| 3 | Mediano | Entre 1/2 y 1/4 de diámetro del fuste |
| 4 | Pesado | Alrededor de 1/2 de diámetro del fuste |
| 5 | Muy Pesado | De 1/2 a 3/4 de diámetro del fuste |

Tabla 10: Clasificación del tamaño y manera de ramificación de ramas en plantaciones de teca

4. Otros tres raleos con una rotación cada 5 años.
5. Aprovechamiento final a los 25 años de edad.

Altura máxima (H_o)

Las alturas máximas obtenidas en este estudio de 27,01; 26,52; 23,78 y 22,60 m, a la edad de 25 años, muestran que la EETP es un excelente lugar para el crecimiento de la teca. Estos resultados pueden ser comparados con los rendimientos observados en Costa Rica de 27,00; 24,30; y 21,70 m, a la edad de 25 años, con rodales bien manejados, bajo condiciones de temperatura media entre 26 y 29,8°C, precipitación media anual 1400 a 2450 mm, y a 300 metros sobre el nivel del mar [28–31]. Similares resultados fueron obtenidos en Costa Rica por Somarriba et al., [32] para la teca en plantaciones lineares en la Península de Nicoya. En el Ecuador, estos rendimientos pueden ser contrapuestos con las plantaciones realizadas con teca en las áreas de Bosque Seco Tropical y Bosque húmedo Pre-Montano del Bosque Protector Chongón-Colonche, donde en los mejores sitios pueden alcanzar 18 y 10 metros de altura en los peores sitios a la edad de 25 años [33].

Índice de espaciamento

El índice de espaciamento que hace relación a la altura máxima y el número de individuos de un rodal por hectárea fue determinado en este estudio. La filosofía es mantener constante la densidad y la distancia espacial relativa entre árboles. Esta distancia espacial es expresada en porcentaje de la altura máxima, cuando la

| Clase | Presencia de Protuberancias de Brotación |
|-------|---|
| 1 | Fuste libre de brotes protuberantes |
| 2 | Alrededor del 25 % del fuste con brotes protuberantes |
| 3 | Alrededor del 50 % del fuste con brotes protuberantes |
| 4 | Alrededor del 75 % del fuste con brotes protuberantes |

Tabla 11: Clasificación de la presencia de perturbaciones de brotación en plantación de teca

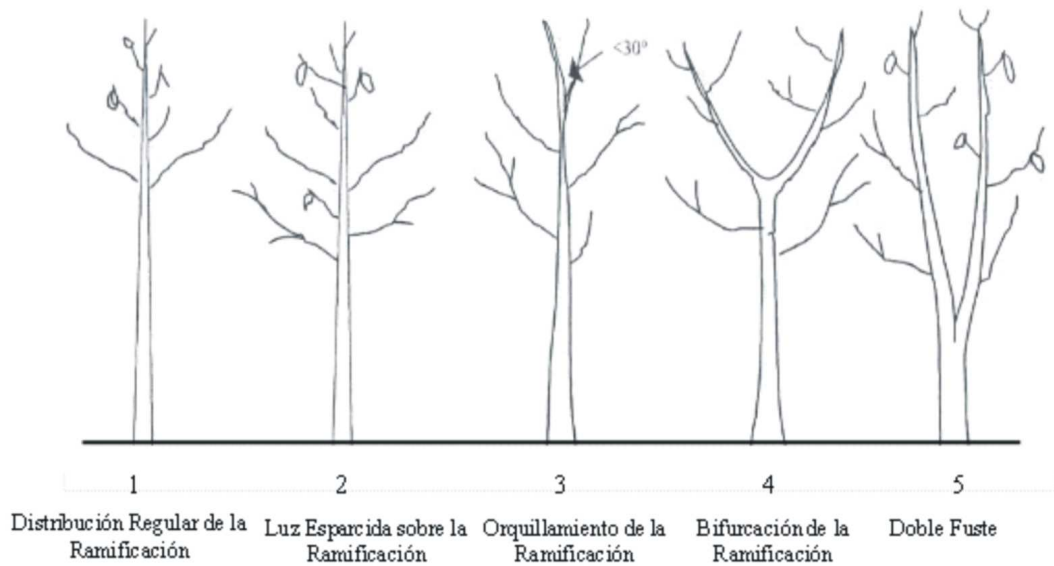


Figura 6: Determinando el tipo de ramificación (de acuerdo a [21])

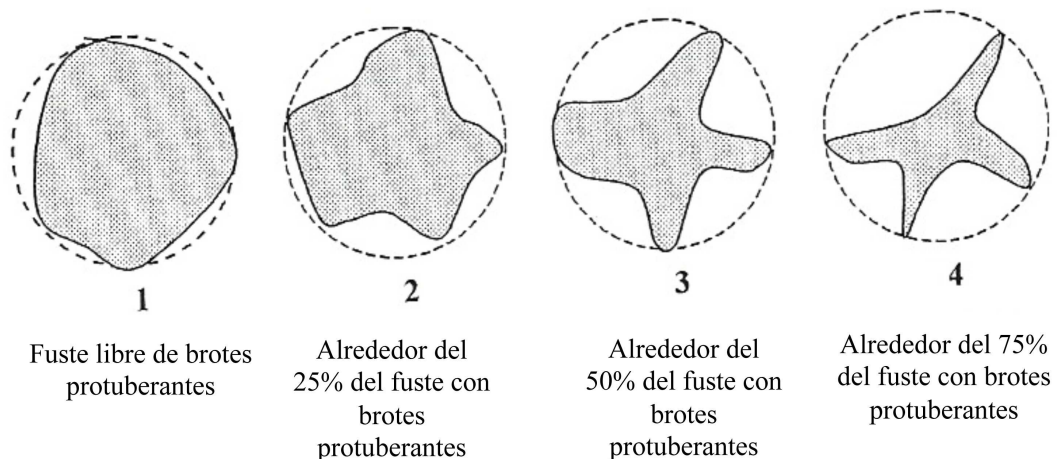


Figura 7: Clasificación para determinar el grado de aletones (de acuerdo a [22])

altura máxima se incrementa, la distancia espacial aumenta igualmente. En Costa Rica, de acuerdo a Bermejo, et al., [28], los índices de espaciamiento variaron entre 22 a 27 antes del raleo y de 27 a 34 después del raleo. Estos valores son apropiados para plantaciones con baja densidad. En los rodales no manejados de la EETP, estos valores se encuentran entre los 19,27 %, de ahí que poblaciones coetáneas desarrollan jerarquías de tamaños. Diferencias en el crecimiento de los árboles dan como resultado una estratificación del rodal forestal. Al contrario, contrastes en tamaño son usualmente intensificada a través de la estructura del rodal, la cual limita el acceso de los recursos a los individuos subordinados. La segregación en clases dominantes es importante para mantener el nivel de productividad del rodal. Desde el punto de vista forestal, esto significa que, siempre habrá unos pocos árboles (dominantes) que tienen la capacidad de extender sus coronas. Este proceso produce un rápido crecimiento en sitios de alta calidad. Igualmente una jerarquía de tamaño puede

desarrollar también la ausencia de competencia. Todos estos factores explican, porque los árboles se vuelven dominantes en un rodal coetáneo [34].

Volumen comercial

En este estudio se determinó el volumen comercial de los rodales de teca no manejados a la edad de 25 años. Ellos presentan una producción de entre 146 a 365 m³ ha⁻¹ con una densidad respectivamente de 347 árboles ha⁻¹ a 695 árboles ha⁻¹. Esto significa de entre 6,00 a 9,00 m³ ha⁻¹ por año. Estas cifras pueden ser comparadas con Bermejo, et al., [28] quien resalta que, se pueden obtener cosechas excelentes ingresos económicos de las plantaciones de la teca con tratamientos silviculturales convenientes basados en principios científicos y medio ambientalmente legítimos. Los resultados obtenidos en Guanacaste de 8,60 m³ha⁻¹ por año (volumen comercial) para rotaciones de 25 años, es bastante bueno y no necesitan ser manipulados para atraer inversión para los proyectos de reforestación en Costa Rica [28].

Función Weibull

Un manejo eficiente de plantaciones requiere más que simples estimaciones de volumen en pie o área basal. Frecuentemente es necesario conocer la distribución de tamaños de árboles que componen un determinado estrato de la plantación, ya sea para definir el tipo de tratamiento silvícola [35]. Esta investigación muestra que, la estimación de los cambios ocasionados por los raleos dentro de los rodales de teca es posible. El método aplicado modela la distribución del diámetro de árboles raleados y la posición restante del rodal remanente principalmente. La distribución inicial y final según el tipo de diámetro está debidamente modelada. De tal manera que, la distribución de la cantidad total árboles raleados también fue estimada [14, 36, 37]. La Estación Experimental Tropical Pichilingue es considerada como la fuente semillera de teca en el Ecuador. Lamentablemente, la categoría actual a la normativa propuesta por el MAE es de “d. Fuente Semillera Seleccionada”. Pero poco se hace para poder manejar material de alta calidad y que por falta de manejo, no cumple con las condiciones deseadas para la certificación de semilla. Adicionalmente, la falta de manejo de estos rodales, conduciría a problemas de endogamia que afecta caracteres cuantitativos, como tamaño, vigor, fertilidad y rendimiento de producción. En este estudio se determinó el volumen comercial de los rodales de teca no manejados a la edad de 25 años. Ellos presentan una producción de entre 146 a 365 m³ ha⁻¹ con una densidad respectivamente de 347 árboles ha⁻¹ a 695 árboles ha⁻¹. Esto significa de entre 6,00 a 9,00 m³ ha⁻¹ por año. Mostrando que, la EETP es un excelente lugar para el crecimiento de la teca. Lo cual, cumple con la normativa de que, el rodal deberá ser superior a otros dentro de una misma área ecológica o región de procedencia.

Referencias

- [1] Hoch, L.; Pokorný, B.; Medina, G. 2008. “Plantaciones forestales por productores familiares en la Amazonía”. *Proyecto For Live. EU/CIFOR*, : 6.
- [2] Evans, J.; Turnbull, J. 2004. “Plantation Forestry in the Tropics”. 3rd ed. Clarendon Press., : 403.
- [3] Evans, J. 1992. “Plantation forestry in the tropics”. second ed. Clarendon Press., : 200.
- [4] Keipi, K. 1999. “Introduction. Forest Resource Policy in Latin America”. In: Keipi, K. (Ed.), *Inter-American Development Bank. Johns Hopkins University Press, Washington, DC*, : 1–10.
- [5] FAO. 2000. “Global Forest Resources Assessment 2000: Main Report”. *Food and Agricultural Organization of the United Nations, National Forestry Action Plans and Forest Resources Assessment, FAO. Consultado 1-4-2013 en: www.fao.org/forestry/site/fra2000report/en*.
- [6] Pérez, D.; Kanninen, M. 2005. “Stand growth scenarios for *Tectonagrandis* plantations in Costa Rica”. *Forest Ecology and Management*, : 425–441.
- [7] Pérez, D. 2008. “Growth and volume equations developed from stem analysis for *Tectonagrandis* in Costa Rica”. *Journal of Tropical Forest Science*, 20(1):66–75.
- [8] Cañadas, L. 1983. “El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador”. *Editores Asociados. Quito, Ecuador*, : 210.
- [9] Murillo, O.; Badilla, Y. 2004. “Calidad y valoración de plantaciones forestales”. *Cartago, Instituto Tecnológico de Costa Rica*, : 51.
- [10] Bortz, J. 2005. “Statistik für Sozialwissenschaftler”. 6 Auflage. Springer-Verlag, : 900.
- [11] Anderberg, M. 1973. “Cluster analysis for applications. Probability and mathematical statistics”. *Academic Press*, : 359.
- [12] Kassier, H. 1993. “Dynamics of diameter und height distribution in commercial timber plantations”. *Ph D dissertation, Faculty of Forestry. University of Stellenbosch, South Africa*, : 190.
- [13] Staupendahl, K. 2000. “Bestandesbezogene Modellierung von Durchforstungen in Buchenreinbeständen auf der Basis des Stammzahl-Grundflächen-Verhältnisses”. In: G. Kenk., (Hrsg.) *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde Beiträge zur Jahrestagung in Volpreihausen, Sollin*, : 112–125.
- [14] Staupendahl, K.; Puumalainen, J. 1999. “Modellierung des Einflusses von Durchforstungen auf die Durchmesser-Verteilung von gleichaltrigen Fichtenreinbeständen”. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, : 249–262.
- [15] Rojas, O.; Murillo, O. 2000. “Calidad de las plantaciones de Teca en la Península de Nicoya”. *Costa Rica. Agronomía Costarricense*, 24(2):65–76.
- [16] Kermode, C. 1964. “Some aspects of silviculture in Burma”. *Central Press Rangoon*, : 168.
- [17] Ryan, P. 1982. “The management of Burmese teak forest”. *Commonwealth Forestry Review*, 61(2):115–120.
- [18] Aung, S. 1952. “Regeneration of Teak in Burma”. *The Burmese Forester, Forest Department, Myanmar*, 2:23–35.
- [19] Mollick, A.; Sajjaduzzaman, M.; Golan, P.; Rana, R.; Tarique, K. 2005. “Stand quality assessment of Teak (*Tectonagrandis* Linn. F)”. *International Journal of Agriculture and Biology*, 7(4):543–546.
- [20] Kyaw, N. 2003. “Site Influence on Growth and Phenotype of Teak (*Tectonagrandis* Linn. f.) in Natural Forests of Myanmar”. *Ed. Cuvillier. Göttingen, Germany*, : 163.
- [21] Keiding, H.; Kemp, R.; Lauridsen, E. 1986. “Evaluation of International Series of Teak Provenance Trials”. *Danida Forest Seed Center, Humlebaek, Denmark*, : 81.
- [22] Kjaer, E.; Lauridsen, E.; Welledorf, H. 1995. “Second Evaluation of an International Series of Teak Provenance Trials”. *Danida Forest Seed Center Humlebaek, Denmark*, : 81.

- [23] Gadow, K. 2004. "Forsteinrichtung. Steuerung und Analyse der Waldentwicklung. Beilage zur Vorlesung". *Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie. Universität Göttingen.*, : 246.
- [24] Alder, D.; Synnott, T. 1992. "Permanent Sample Plot Techniques for Mixed Tropical Forest". *Tropical Forestry Papers N.30. Oxford Forestry Institute, Department of Plant Science, University of Oxford, Nuffield Press*, : 231.
- [25] Philip, M. 1994. "Measuring trees and forest". *CAB International, Wallingford. Oxon (second edition)*, : 231.
- [26] Abetz, K. 1975. "Eine Entscheidungshilfe für die Durchforstung von Fichtenbeständen". *AFZ*, 30:666–667.
- [27] Kramer, H. 1988. "Waldwachstumlehre". *Hamburg und Berlin, Pery, Deutschland*.
- [28] Bermejo, I.; Cañelas, I.; San Miguel, A. 2004. "Growth and yield models for Teak plantations in Costa Rica". *Forest Ecology and Management.*, 172:213–225.
- [29] Akindele, S. 1991. "Development of a site index for teak". *J. Trop. For. Serv.*, 4(2):162–169.
- [30] Keogh, R. 1979. "Does teak have a future?". *Unasylva*, 31(126):13–19.
- [31] Miller, A. 1969. "Provisional Yield Tables for Teak in Trinidad". *Trinidad and Tobago, Government Printery, Port of Spain*.
- [32] Somarriba, E.; Beer, J.; Morataya, R.; Valvo, G. 1999. "Linderos de *Tectonagrandis* L.F. en el Trópico húmedo de Costa Rica y Panamá". *Rev. For. Centroam.*, 28:15–21.
- [33] Cañadas, A.; Roca, A. 2011. "Can the reforestation projects stop the extraction of wood from the Protected Forest Chongón-Colonche?". *Tropentag, Bonn University, Development on the Margin, Tropentag, Bonn University, Development on the Margin*.
- [34] Oliver, C.; Larson, B. 1996. "Forest Stand Dynamics". *John Wiley, New York.*, : 330.
- [35] Torres, J.; Magaña, O. 2001. "Evaluación de Plantaciones Forestales". *Ed. Limusa. México*.
- [36] Álvarez González, J.; Schröder, J.; Rodríguez Solleiro, R.; Ruíz González, A. 2002. "Modeling the effect of thinning on the diameter distribution of even aged Marina time pine stands". *Forest Ecology and Management*, 18:113–126.
- [37] Nagel, J.; Biging, S. 1995. "Schätzung der Parameter der Weibullfunktion zur Generierung von Durchmesserverteilungen". *AFJZ*, 166:185–189.