

DIAGRAMAS DE MANEJO DE DENSIDAD PARA PLANTACIONES DE TECA EN VENEZUELA

■ **Mauricio Jerez, Lawrence Vincent, Yajaira Moret***

Resumen

Cuando planificamos el establecimiento y manejo de una plantación forestal, nos planteamos la interrogante de cuál debería ser el espaciamiento inicial óptimo y cuál el régimen de aclareos a prescribir según los objetivos de producción y características de crecimiento de la especie a plantar. Asimismo, nos interesaría estimar cuánto se va a producir (rendimiento) y para cuándo (turno). En Venezuela, para el caso particular de la teca (*Tectona grandis* L.), se han realizado numerosos estudios con el propósito de responder a estas preguntas. En este trabajo se utiliza el enfoque del "Diagrama de Manejo de Densidad (DMD)" a fin de integrar información sobre crecimiento y rendimiento de la teca en respuesta a diferentes condiciones de manejo y proveer de un marco para la prescripción de regímenes de espesura (espaciamiento inicial + régimen de aclareos). Los DMDs representan gráficamente las relaciones temporales entre la densidad del rodal y las dimensiones de los árboles, la altura mayor y el volumen medio del rodal. Con ellos es posible planificar regímenes de espesura a lo largo del turno, determinar la factibilidad operacional y edad óptima para realizar los aclareos, y contrastar los posibles efectos de diferentes regímenes. El presente DMD se desarrolló a partir de una red de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento monitoreada por más de 25 años, así como parcelas temporales provenientes de inventarios rutinarios en los Llanos Occidentales. La comparación del presente diagrama, con otros existentes para la India y Costa Rica parece indicar que las relaciones básicas tamaño-densidad en la teca no varían apreciablemente para diferentes regiones del mundo. Se proponen algunos escenarios para el manejo de plantaciones de teca. Desde el punto de vista de la maximización del rendimiento volumétrico, regímenes con espaciamientos relativamente estrechos y aclareos frecuentes parecen ser los más promisorios para el manejo de plantaciones de teca. Sin embargo, espaciamientos más amplios son atractivos si se desea madera de mayores dimensiones en turnos más cortos. Los DMDs tienen una base ecológica robusta, a la vez que permiten la incorporación de elementos financieros, tales como tasas de interés, costos de oportunidad, establecimiento y aprovechamiento, por lo que sus principios deberían ser tomados en cuenta para desarrollar modelos de simulación que permitan la prescripción de regímenes de espesura óptimos desde los puntos de vista biológico y financiero.

Palabras clave: Diagramas de manejo de densidad, Teca, *Tectona grandis*, aclareos, régimen de espesura

Introducción

En Venezuela, así como en países centroamericanos y del Caribe se están estableciendo plantaciones de teca bajo régimen de incentivos fiscales y otras modalidades de inversión. La teca (*Tectona grandis* Linn.) es una de las principales especies empleadas en plantaciones en el geotrópico, existiendo

* Grupo Genética y Silvicultura. Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales.

considerables superficies en países como Panamá, Trinidad y Tobago, Costa Rica, Nicaragua y Venezuela.

Venezuela cuenta con aproximadamente 6000-10000 ha de plantaciones de teca en los Llanos Occidentales. Estas plantaciones fueron establecidas en los años 70 y 80 por entes públicos y concesionarias privadas que operaban en las reservas forestales. En los años 90 esta especie fue incorporada al mercado mediante el aprovechamiento de productos de pequeñas dimensiones provenientes de aclareos. Actualmente, las nuevas plantaciones están siendo realizadas por pequeños propietarios, cuya actividad primaria es la agrícola o pecuaria, y que ven en esta especie un complemento a sus ingresos, así como por algunas empresas privadas con fines de producción de madera fina para el mercado nacional e internacional.

En la búsqueda de metodologías para el manejo óptimo de plantaciones de teca, en Venezuela se han realizado diversas investigaciones en relación con su crecimiento y rendimiento bajo diferentes regímenes de espesura (espaciamiento inicial + régimen de aclareos) tomando como base los resultados de ensayos y parcelas permanentes de aclareo y rendimiento monitoreados por más de 30 años. Los resultados de estas investigaciones pueden integrarse y aplicarse al manejo de plantaciones a través de los llamados "diagramas de manejo de densidad" (DMD) (Drew y Flewelling 1977; Long 1985, Kumar et al., 1995).

El DMD's es uno de los métodos más efectivos para planificar el manejo de la espesura en plantaciones (Drew y Flewelling 1977; Long 1985). Estos diagramas representan gráficamente las relaciones temporales entre la densidad, el diámetro medio (dq) la altura mayor, y el volumen medio del rodal. Con ellos es posible desarrollar y proyectar regímenes de aclareo a lo largo del turno, determinar la factibilidad operacional y edad óptima para realizar los aclareos y contrastar los posibles efectos de un número de regímenes de espesura (Farnden 1996, Kumar et al, 1995).

Los diagramas de manejo de densidad (DMDs) fueron propuestos por Drew y Flewelling en 1979 basándose en teorías desarrolladas por investigadores japoneses (Ando 1962, Tadaki 1963). Estas teorías se basan a su vez en el "principio del autoaclareo aclareo natural" (*self-thinning principle*) propuesto por Yoda et al. (1963). De acuerdo a este principio, existe una relación entre el tamaño máximo y la densidad máxima que pueden ocurrir dentro de un rodal relativamente homogéneo de plantas, y que es determinada por la mortalidad ocurrida debido al efecto de la competencia (mortalidad denso-dependiente). Si se construye un gráfico representando el logaritmo de los valores de biomasa, volumen, o diámetro promedio de un rodal en función de los correspondientes valores del logaritmo de la densidad (Figura 1) provenientes de mediciones cierto número de rodales, se puede observar que existe un límite superior para las posibles combinaciones de tamaño y densidad y que puede representarse por una línea con pendiente aproximada de -1.5 (pero véanse críticas a este límite -Weller, 1985, Sackville et al., 1995-).

Para cualquier densidad, existe un tamaño máximo promedio (en volumen o diámetro a la altura de pecho) que el rodal puede alcanzar. En los inicios del desarrollo del rodal, el tamaño del árbol medio del rodal se incrementa sin que ocurra mortalidad denso-dependiente. En esta zona (Z-1), el sitio es sub-utilizado, la densidad del rodal es baja y los árboles crecen de manera aislada (Arias, 2003). El crecimiento por árbol es máximo mientras que el crecimiento por hectárea se incrementa conforme se aumenta el número de árboles por hectárea. El límite superior de esta zona debería coincidir con el momento del

cierre de copas (Línea D). En la zona de transición (Z-2) el crecimiento del árbol empieza a disminuir a medida que se incrementa la densidad. El crecimiento por hectárea sigue aumentando al incrementar la densidad. El límite superior de esta zona viene dado por la línea C.

El manejo de rodales dentro de esta zona permite concentrar en los fustes la producción de madera. Luego viene una zona de máximo crecimiento por hectárea (Z-3), en la cual el crecimiento por árbol continúa disminuyendo conforme aumenta la densidad, mientras que el crecimiento por hectárea alcanza su máximo. El manejo de rodales dentro de esta zona permite maximizar la producción de madera para pulpa y biomasa. El límite superior de esta zona viene dado por la línea B. En la zona de autoaclareo (Z-4) El crecimiento por árbol y por hectárea disminuye a medida que se incrementa la competencia. Rodales dentro de esta zona están sometidos a una competencia intensa y a medida que la trayectoria del rodal se aproxima a la línea límite de tamaño-densidad (t-d), cualquier incremento adicional en el tamaño del árbol medio del rodal irá acompañado por reducciones en densidad. Al continuar el crecimiento en tamaño, la mortalidad se acelerará y la trayectoria del rodal se desplazará paralelamente a la línea t-d (Saunders y Puettmann 2000).

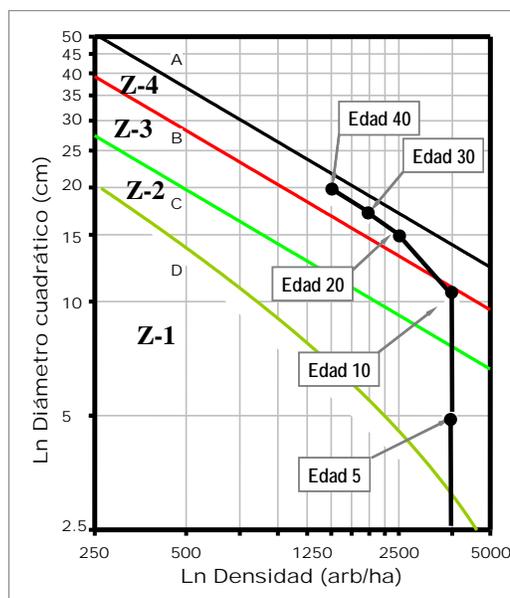


Figura 1: Diagrama de densidad. Líneas que definen el grado de ocupación de un rodal. Línea de máxima densidad o de autoaclareo (A); Línea de inicio de la mortalidad denso-dependiente (B); Línea de inicio de la ocupación completa del rodal (C) y Línea de cierre del dosel (D)

Las líneas A-D pueden representarse en términos de densidad relativa utilizando como base algún índice de densidad. La densidad relativa es la razón entre la densidad actual y la densidad máxima (definida por la línea A) para un tamaño medio del árbol.

Para maximizar la producción, el silvicultor debería mantener el rodal entre las líneas de máxima producción (C) y de inicio de la mortalidad (B) durante la mayor parte del turno. Generalmente la línea de densidad máxima del diagrama para una determinada especie es hallada a partir de parcelas de inventario o

parcelas permanentes de aclareo y rendimiento establecidas en plantaciones dentro del área o región de interés que no hayan sido aclareadas. Las líneas restantes generalmente se consideran como un porcentaje de la densidad máxima y usualmente los valores son asumidos, aunque valores más precisos pueden ser hallados si suficientes datos están disponibles.

Materiales y métodos

Área de Estudio

Los Llanos Occidentales de Venezuela abarcan una superficie de aproximadamente 150,000 km². El clima se caracteriza por una marcada estación seca (Diciembre a Marzo) con una temperatura media de 25 a 27 °C y precipitación media anual entre 1,600 y 1,800 mm características de la zona de vida Bosque Seco Tropical. Los suelos son en su mayor parte planicies aluviales inundables con diferenciaciones fisiográficas de dique, napa y cubeta (Franco, 1982). El desarrollo de la vegetación varía desde el estero herbáceo, sabana, hasta bosque estacional siempre verde (Zambrano et al, 1995).

Datos

Los datos abarcan información proveniente de investigaciones realizadas en parcelas permanentes de aclareo y rendimiento (PPAR) y parcelas temporales y permanentes de inventario establecidas en los Llanos Occidentales de Venezuela, principalmente en las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo. En Caparo, se establecieron alrededor de 50 ha de plantaciones entre los años 1971 y 1973 bajo espacimientos iniciales 2 x 2 m, 2.5 x 2.5, 3 x 3 y 4 x 4 m, en terrenos previamente deforestados o en rastrojos. Las plantaciones objeto de estudio en la R. F. Ticoporo fueron establecidas entre 1970 y 1981 en una superficie de aproximadamente 1,000 ha con espacimientos desde 2 x 2 hasta 3.5 x 3.5 m. Tanto en Caparo como en Ticoporo se utilizaron plantones tipo stump corto. La procedencia de la semilla parece ser Trinidad. En Caparo, se estableció una red de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento a fin de investigar la influencia de los espacimientos y aclareos en el rendimiento de la teca. Dichas parcelas son rectangulares y tienen superficies que varían entre los 800 y 1,600 m². La mayoría de las parcelas se establecieron entre los 2 y 10 años de edad. Se ha venido realizando el seguimiento de las mismas de manera anual o bianual hasta hoy día (31 y 33 años de edad). Las parcelas en Ticoporo provienen principalmente de inventarios temporales realizados en aproximadamente 30 rodales con edades entre 15 y 26 años. Las parcelas utilizadas fueron circulares de 250 a 500 m². El Cuadro 1 muestra el rango de algunas características de la masa forestal a intervalos de cinco años.

Cuadro 1 Valores mínimos y máximos de densidad, diámetro cuadrático, altura promedio y volumen con corteza para las parcelas permanentes y temporales establecidas en rodales de teca de los Llanos Occidentales de Venezuela.

| edad (años) | # de parcelas | densidad (arb/ha) | dq (cm) | alturas (m) | Volumen (m ³ /ha) |
|-------------|---------------|-------------------|-----------|-------------|------------------------------|
| 0.0-5.0 | 28 | 500-2125 | 5.8-15.0 | 7.0-14.4 | 18.6-158.3 |
| 5.0-10.0 | 110 | 483-2125 | 11.0-24.0 | 11.0-20.0 | 52.0-302.0 |
| 10.0-15.0 | 175 | 236-1758 | 14.0-28.0 | 14.0-24.0 | 47.0-417.0 |
| 15.0-20.0 | 328 | 120.0-1608.0 | 11.0-42.0 | 5.0-28.0 | 50.0-547.0 |
| 20.0-25.0 | 422 | 120.0-1842.0 | 13.0-52.0 | 5.0-29.0 | 50.0-571.0 |
| 25.0-30.0 | 148 | 120.0-1483.0 | 17.0-37.0 | 6.0-29.0 | 47.0-501.0 |

Los datos provenientes de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento están almacenados en un sistema de información para plantaciones -SINFOPLAN

(Zerpa et al 1997)-. Dicho sistema procesa los datos de las parcelas permanentes y calcula las estadísticas descriptivas de las mismas tales como densidad, diámetro promedio, altura promedio, altura mayor, área basal, diámetro cuadrático, y volumen con y sin corteza por categorías diamétricas de 1 cm de amplitud. Las parcelas de Inventario fueron procesadas mediante un sistema de información para inventarios de parcelas temporales -SINFOPLAN (Zerpa et al. 1997)-. Este sistema, además de las estadísticas descriptivas, provee estimaciones estadísticamente confiables sobre los parámetros del rodal (media, desviación estándar e intervalos de confianza)

Construcción del diagrama de densidad

El diagrama se caracteriza por representar las relaciones entre el diámetro cuadrático (d_q , cm) y la densidad (árbo/ha) del rodal en escala doble logarítmica (Figura 1). El grado relativo de ocupación se representa en dicho diagrama, mediante el trazado de una línea de máxima densidad, la cual tiene una pendiente de -1.605 e intercepta el punto de índice de densidad máximo hallado para la especie ó población objeto de estudio. El índice de densidad del rodal (IDR) de Reineke (1933), expresa el número de árboles por hectárea con un diámetro de 25 cm que pueden ocupar un sitio dado y viene dado por

$$IDR = D \times (d_q / 25)^{1.605} \quad (1)$$

donde, D = densidad (arb/ha) y d_q = diámetro cuadrático (cm)

El máximo IDR (IDR_{max}) obtenido para las plantaciones de teca estudiadas fue de 1,100 árboles por hectárea, en tanto que el valor reportado para plantaciones en Kerala, India (Kumar et al, 1995) fue de 1,200 arb/ha y 1150 arb/ha para las plantaciones de Costa Rica (Arias y Camacho 2003). En el presente trabajo asumiremos el valor de 1,100 como apropiado para las plantaciones de los Llanos Occidentales de Venezuela.

Las líneas de inicio de la mortalidad denso-dependiente fue asumida provisionalmente como 55 % del máximo IDR (605 arb/ha) en función del comportamiento observado en las parcelas permanentes de Caparo. Se asumió un 35 % del IDR_{max} (385 arb/ha) como límite inferior a partir del cual se considera que el rodal está en máxima producción (Kumar et al. 1995) y 25% del IDR_{max} (275 arb/ha) para el límite superior de la zona de transición donde el crecimiento del árbol individual se asume como máximo (Long, 1985, Kumar et al, 1995). Estas líneas se trazan con la misma pendiente asumida para la línea de máxima densidad. Finalmente se trazó la línea de cierre del dosel (Jerez et al. 1999) que proviene de una muestra de árboles de teca que crecieron libres de competencia y viene dada por

$$R_c = 0.47473997 \times d^{0.84930571}, R^2 = 0.82 \quad (2)$$

donde R_c = radio de copa (m), d = diámetro a la altura de pecho (cm).

En el diagrama también se superponen isolíneas de volumen. Dichas isolíneas fueron derivadas relacionando el volumen con corteza estimado por hectárea para plantaciones de teca en Caparo con los respectivos valores de densidad y diámetro cuadrático. La ecuación es

$$V = 0.000025 \times D^{1.179473} \times d_q^{2.738205}, R^2 = 0.96, ee = 8.2 \text{ m}^3/\text{ha}$$

(3)

donde: V = volumen con corteza (m^3/ha), D = densidad (arb/ha), d_q = diámetro cuadrático (cm) y ee es el error estándar. El volumen por hectárea usado en la ecuación anterior fue calculado a partir de los volúmenes de los árboles individuales de la parcela, utilizando una ecuación de volumen desarrollada por Moret et al. (1998) y proviene de una muestra de 175 árboles estratificada por categorías diamétricas. La ecuación viene dada por

$$\ln V_{cc} = -1.0689230 + 0.963638 \ln(d^2 h), R^2 = 0.98, ee = 0.01 \text{ m}^3$$

(4)

donde: V_{cc} = volumen con corteza (m^3) excluyendo el tocón, d = diámetro a la altura de pecho (cm), h = altura total y \ln es el logaritmo natural. Los sistemas de información SINFOPLAN y SAMAN generaron los volúmenes por hectárea estimados a partir de las parcelas utilizando dicha ecuación.

Los diagramas de densidad no representan explícitamente como varía la relación tamaño-densidad en función de la edad. Sin embargo, si se asume que la altura mayor es una función de la edad y que es aproximadamente igual para rodales de edades similares creciendo en lugares con aproximadamente la misma calidad de estación, entonces es posible representar el componente temporal en dichos diagramas. La siguiente ecuación provisional representa las isolíneas de altura mayor:

$$H_m = 7.791931 + 0.666463 \times D^{-0.20556} \times d_q^{1.524162}, R^2 = 0.85, ee = 1.3 \text{ m}$$

(5)

donde H_m = altura mayor (m) y los demás símbolos como antes. La relación altura mayor-edad viene dada por la siguiente ecuación

$$H_m = \exp\left(3.428326 - \frac{4.05452}{Edad}\right), R^2 = 0.92, ee = 1.9 \text{ m}$$

(6)

Todas las ecuaciones fueron derivadas de información de las PPAR de Caparo para un rango de edades entre 1.8 y 30 años. Los modelos no lineales fueron ajustados mediante el procedimiento MODEL de SAS v. 8.1.

El diagrama de densidad fue implementado en la hoja de cálculo Excel. El diagrama final generado por la hoja de cálculo junto con las trayectorias y ubicación de algunas de las parcelas usadas para construirlo se presentan en la Figura 2.

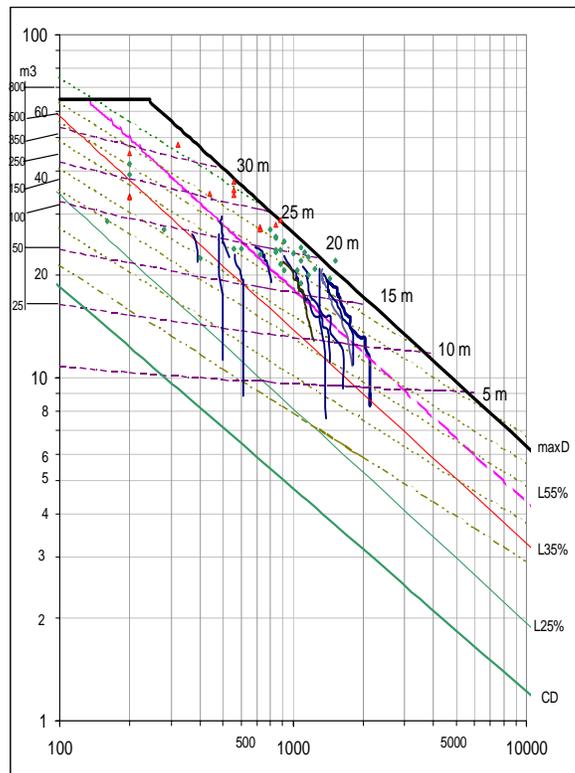


Figura 2 Diagrama de manejo de la densidad construido a partir de los datos provenientes de plantaciones de teca en los Llanos Occidentales en Venezuela y representando las trayectorias de algunas parcelas permanentes de crecimiento y la ubicación de algunas parcelas temporales. En el diagrama, maxD = línea de máxima densidad, Lnn% = líneas de densidad relativa y CD línea de cierre del dosel.

Aplicaciones del diagrama

Los diagramas de densidad permiten por una parte planificar el régimen de espesura a partir de los productos deseados tanto al final del turno como para los diferentes aclareos a realizarse y definir la densidad necesaria al final de la fase de establecimiento para obtener dichos productos. Por otro lado, también permite estimar el rendimiento al final del turno y durante los aclareos, así como la edad de dichas intervenciones, partiendo de una densidad de establecimiento determinada o bien, de una densidad existente en una plantación que ya tiene varios años de establecida (corrección del curso del manejo). Se ilustra la utilización de los DMDs proponiendo cuatro escenarios en función de los productos de uso más común provenientes del aprovechamiento de la teca en Venezuela (Cuadro 2), así como de las alternativas de espaciamiento más prometedoras. Los escenarios son los siguientes:

Cuadro 2 Características dimensionales de los productos obtenidos de aclareo de plantaciones de teca para diferentes usos (modificado de Osorio, 1997)

| Productos | Dimensiones * | | Volumen | |
|-------------|---------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| | Diámetro (cm) | Longitud (m) | m ³ /piezas | Piezas/m ³ |
| Aserrío | 20 | 3 | 0,0942 | 11 |
| Carpintería | 15 | 2 | 0,0353 | 28 |
| Vigas | 15 | 4 | 0,0708 | 14 |
| Varas | 10 | 4 | 0,0314 | 32 |
| Estantillos | 12 | 3 | 0,0339 | 29 |
| Parales | 8 | 3 | 0,0151 | 66 |

Escenario 1: Régimen con un solo aclareo intensivo para la producción de madera aserrada para muebles, carpintería y machihembrado. Se desea determinar cual sería la densidad inicial de implantación, edad del turno, y edad e intensidad de aclareos, si se desea producir madera para aserrío (dq = 40 cm) al final del turno y madera para machihembrado y carpintería (dq = 20 cm).

Escenario 2 Régimen con aclareos frecuentes para la obtención de una gama de productos antes del turno. Se desea determinar cual sería la densidad inicial de implantación, edad del turno, y edad e intensidad de aclareos, si se desea producir madera para aserrío de alta calidad (dq = 45 cm) al final del turno y madera para aserrío de pequeñas dimensiones (dq = 35 cm) ,machihembrado y carpintería (dq = 20 cm) y varas (dq = 15 cm)

Escenario 3 Régimen con espaciamento amplio (4 x 4 m, 6 x 2.5 m) y un solo aclareo. Este régimen permite la combinación con cultivos agrícolas durante los primeros años de la plantación. Se desea estimar el turno para la producción de madera para machihembrado (dq = 20 cm) y madera para aserrío (dq = 45 cm)

Escenario 4 Régimen estándar. Un propietario planta teca a 3 x 3 m. ¿Cuál sería el régimen a seguir si el manejo se mantiene dentro de los límites de ocupación máxima del manejo?.

Los dos primeros escenarios permiten ilustrar el uso de los DMDs para planificar el manejo en función de productos deseados antes de haber establecido la plantación. Los dos últimos escenarios ejemplifican el uso de los diagramas cuando el propietario ya ha predeterminado el espaciamento inicial, bien sea por tradición (3 x 3 m) ó por la necesidad de realizar cultivos agrícolas para pagar costos de establecimiento.

Resultados y discusión

En los Cuadros 3 y 4 se resumen los regímenes especificados para cada uno de los escenarios propuestos. Igualmente en la Figura se presentan las trayectorias de la masa en el diagrama de densidad para cada uno de los regímenes. Para el *Escenario 1* donde se planifica obtener madera para aserrío y realizar un aclareo único, se hizo una planificación hacia atrás (Cuadro 3 y Figura 3-E1). Primero se determinó que dq = 40 cm es alcanzado con una densidad de 300 arb/ha, altura mayor de 27 m y producirá un volumen de 450 m³/ha. La eq. 6 que relaciona edad y H_m permite inferir que el turno ocurre a los 31 años de edad. Si se desea que el potencial de crecimiento se concentre en el árbol individual en lugar de la masa, entonces el IDR limitante puede asumirse como 25 % del IDR_{max}.(Kumar

et al. 1995). Un $dq = 20$ cm puede obtenerse al alcanzar un 55% del IDR a una densidad de aproximadamente 1000 arb/ha.

Es decir, un único aclareo puede realizarse extrayendo 700 arb/ha. La H_m sería aproximadamente 17 m y la edad del aclareo 7 años. El volumen en pie sería de aproximadamente 250 m^3/ha y el volumen extraído de 150 m^3/ha . Asumiendo una mortalidad del 10%, la densidad inicial de implantación sería de alrededor de 1110 arb/ha equivalente a un espaciamiento de 3 x 3 m. El rendimiento en este régimen sería de alrededor de 600 m^3/ha . Las variaciones en dq debidas a las características del aclareo, son representadas por variaciones en la pendiente de las líneas que representan los aclareos. Por ejemplo, en un aclareo sistemático geométrico, la línea de aclareo tendrá pendiente cero, ya que el dq antes del aclareo será similar al dq después del aclareo.

Igualmente, se procedió con el Escenario 2 o régimen de aclareos frecuentes (Cuadro 3 y Figura 3-E2). Este régimen tiene un turno de 37 años ($dq = 45$ cm) con un rendimiento de 450 m^3/ha . Los productos previstos de los raleos se obtendrían a los 24 años (35 cm), 8 años (20 cm) y 5 años (15 cm) con volúmenes de 150, 125 y 100 m^3/ha respectivamente. El espaciamiento inicial debería ser de alrededor de 1600 arb/ha. El rendimiento total de este régimen es de 855 m^3/ha

Cuadro 3 Escenarios de planificación desde el final del turno hacia hasta la obtención de la densidad inicial.

| Escenarios | dq | H_m | Edad | Mortalidad | Vuelo | | Volumen (m^3/ha) | | |
|----------------------------------------------------|------|-------|--------|------------|--------|-----------|----------------------|------------|--------|
| | (cm) | (m) | (años) | % | en pie | eliminado | original | extraído | en pie |
| E1 Régimen para aserrío con un solo aclareo | | | | | | | | | |
| Aprovechamiento final | 40 | 27 | 31 | 0 | 300 | 300 | 450 | 450 | 0 |
| Raleo 1 (selectivo) | 22 | 17 | 7 | 0 | 1000 | 700 | 250 | 150 | 100 |
| Final fase establecimiento | | | | 10 | 1000 | | | | |
| Densidad inicial | | | | | 1110 | | | | |
| Volumen total extraído (m^3/ha) | | | | | | | | 600 | |
| E2 Régimen con aclareos frecuentes | | | | | | | | | |
| Aprovechamiento final | 45 | 27.5 | 37 | 0 | 225 | 225 | 480 | 480 | 0 |
| Raleo 3 (selectivo) | 35 | 26 | 24 | 0 | 375 | 150 | 400 | 150 | 250 |
| Raleo 2 (selectivo bajo) | 20 | 19 | 8 | 0 | 800 | 425 | 250 | 125 | 125 |
| Raleo 1 (sistemático) | 15 | 14 | 5 | 0 | 1400 | 600 | 225 | 100 | 125 |
| Dens. fase establecimiento | | | | 10 | 1400 | | | | |
| Densidad inicial | | | | | 1550 | | | | |
| Volumen total extraído (m^3/ha) | | | | | | | | 855 | |

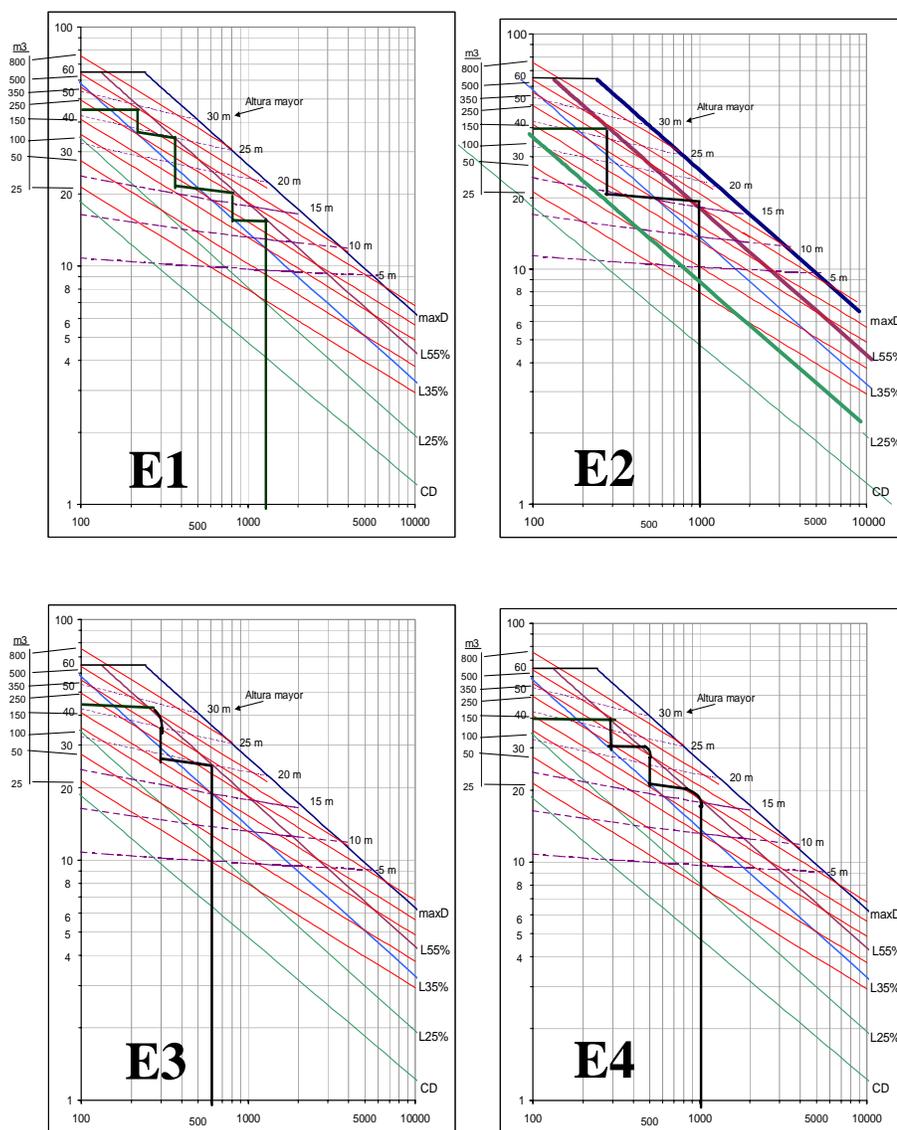


Figura 3 Regímenes de espesura trazados en el diagrama de densidad para los cuatro escenarios propuestos. Escenarios: E1 Régimen para aserrío con un solo aclareo, E2 Régimen con aclareos frecuentes, E3 Régimen espaciamento amplio y E4 Régimen estándar. MaxD es la línea de máxima densidad y CD es la línea de cierre del dosel

En el caso del escenario 3 que combinaría espaciamentos amplios con cultivos agrícolas (Cuadro 4 y Figura 3-E3), de acuerdo al diagrama, se podría realizar un único aclareo a los 10 años de edad con un $dq = 25$ cm y luego realizar la corta final a los 30 años con un dq de 45 cm. Para alcanzar el diámetro meta de 45 cm se excedió el límite de 55% de IDR lo que en teoría produciría una mortalidad de aproximadamente un 10 %. El volumen total producido sería de aproximadamente $700 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Cuadro 4 Escenarios de planificación desde el establecimiento hasta el aprovechamiento final

| Escenarios | Vuelo (arb/ha) | | Mort % | Hm (m) | Edad (años) | dq (cm) | Volumen (m ³ /ha) | | |
|---------------------------------------------|----------------|-----------|--------|--------|-------------|---------|------------------------------|------------|---------|
| | En pie | eliminada | | | | | antes | Extraído | después |
| E3 Régimen espaciamento amplio | | | | | | | | | |
| Densidad inicial | 625 | | 5 | | | | | | |
| Dens. fase establecimiento | 594 | | 0 | | | | | | |
| Raleo 1 (moderado por lo bajo) | 594 | 294 | 0 | 20 | 10 | 25 | 350 | 200 | 150 |
| Aprovechamiento final | 300 | | 10 | 27 | 30 | 45 | 500 | 500 | 0 |
| Volumen total extraído (m ³ /ha) | 270 | 270 | | | | | | 700 | |
| E4 Régimen estándar | | | | | | | | | |
| Densidad inicial | 1110 | | 10 | | | | | | |
| Dens. fase establecimiento | 1000 | | 10 | 16 | 6.5 | 20 | 250 | 100 | 150 |
| Raleo 1 (fuerte por lo bajo) | 900 | 400 | | | | | | | |
| Raleo 2 (por lo bajo) | 500 | | 5 | 23 | 14 | 30 | 375 | 150 | 225 |
| Aprovechamiento final | 475 | 175 | | 27 | 30 | 40 | 500 | 500 | 0 |
| Volumen total extraído (m ³ /ha) | 300 | 300 | | | | | | 750 | |

En el escenario 4 (Cuadro 4 y Figura 3-E4) con un espaciamento inicial de 3 x 3 m y manteniendo el desarrollo de la plantación dentro de los límites de máxima producción conduce a la aplicación de un aclareo a los 6,5 años de edad y otro alrededor de los 14 años de edad. Este régimen produce un rendimiento total alto (750 m³/ha), pero la proporción del volumen en aclareos es relativamente baja (250 m³/ha).

De acuerdo a estos resultados, los regímenes de espaciamentos estrechos con aclareos frecuentes parecen ser más productivos en cuanto a rendimiento total que los regímenes de espaciamentos más amplios o pocos aclareos. Sin embargo, espaciamentos más amplios, permiten alcanzar diámetros mayores en tiempos mas cortos. Un aspecto que no es considerado aquí, pero que es factible de incluir con la información disponible es la calidad y cantidad de los productos obtenidos de los aclareos y el aprovechamiento final. Para ello se han realizado investigaciones sobre distribuciones diamétricas (Quevedo 2002), ecuaciones de perfil (Mora 2001) y estudios sobre la calidad de la madera producida por estas plantaciones. Osorio (1997) encontró que las proporciones de madera aprovechable con respecto al volumen total eran mayores para los espaciamentos amplios, o si se realizaban aclareos intensivos a edad temprana. El autor, sin embargo, no consideró la posible reducción en la calidad de la madera producto de un menor grado de autopoda y la formación de aletones.

Los DMDs no toman en cuenta explícitamente los aspectos económicos. Si bien, desde el punto de vista del rendimiento biológico, ciertos regímenes pueden dar mejores rendimientos que otros para los aclareos y el aprovechamiento final, el efecto de las variables económicas tales como tasas de interés, costos de oportunidad, establecimiento y aprovechamiento no es tomado en cuenta. Los escenarios presentados aquí, sin embargo, también parecen los más promisorios desde el punto de vista económico. Osorio (1997) realizó estudios de rentabilidad en la teca basándose en la información de las PPAR de Caparo y en los costos de establecimiento y precios de venta para la época. Este autor encontró que espaciamentos reducidos y la falta de aplicación de aclareos en las plantaciones de teca no conducen a plantaciones rentables. Por otro lado, encontró que espaciamentos relativamente reducidos (1,110-1,600 arb/ha) con aclareos frecuentes a muy frecuentes (3 a 5) y con un primer aclareo temprano (5 a 6 años) son los de mayor rentabilidad. Igualmente, fueron rentables aunque

en menor medida, los regímenes con espaciamientos amplios. En este último caso, sin embargo, no se tomó en cuenta los posibles efectos beneficiosos tanto en lo económico como en lo biológico de la combinación con cultivos agrícolas. La incorporación de restricciones económicas a estos diagramas puede lograrse con relativa facilidad, aunque requeriría implementar el diagrama de manera numérica. Dean y Chang (2002) desarrollaron una metodología basada en análisis marginal a fin de incorporar el aspecto financiero en los DMD's. Aunque hasta el momento, los propietarios privados han utilizado la teca principalmente para plantaciones en cercas, la utilización de espaciamientos relativamente reducidos con un primer aclareo a los seis años parece ser una opción muy atractiva para los pequeños finqueros. El manejo posterior de estas plantaciones, sin embargo, no parece estar bien definido. Los DMDs pueden ser utilizados para preparar regímenes alternativos de espesura que puedan ser propuestos de manera sencilla a pequeños y medianos propietarios.

Existen algunas diferencias entre el diagrama elaborado para estas plantaciones y el desarrollado por Kumar et al. (1995) para las plantaciones de teca en Kerala, India. Estas diferencias, sin embargo, parecen no ser demasiado grandes y pueden deberse a diferencias en las características de los datos y ecuaciones utilizados. Nuestra base de datos es más limitada en cuanto al rango de edades. La ecuación de altura mayor es solo provisional y se desarrolló con datos provenientes de plantaciones establecidas calidades de estación similares. El efecto de la calidad de sitio, aunque no afecta las relaciones tamaño densidad, si influye en las edades a las cuales un rodal se encontrará en una determinada posición dentro del diagrama (Saunders y Puettmann, 2000). A menor calidad de sitio, mas años tardará un rodal en alcanzar la línea de autoaclareo. De cualquier modo, las similitudes, apoyan la robustez desde el punto de vista biológico de dichos diagramas.

Los DMDs parecen ser una herramienta útil para la especificación preliminar de regímenes de espesura en plantaciones ya que permiten examinar una serie de variables silviculturales y biométricas simultáneamente, particularmente, las relaciones entre crecimiento del rodal, tamaño de los árboles y edad del turno, lo cual ejemplifica el problema de la optimización en la silvicultura. Los diagramas de manejo, sin embargo, son únicamente un paso previo al desarrollo de modelos más precisos de simulación. Estudios en el área de la Ecología de la Producción han encontrado que los principios en que se basan estos diagramas están directamente con relacionados con la dinámica de la biomasa foliar y la eficiencia de crecimiento (Jack y Long 1996, Dean y Baldwin 1996a,b), por lo que su incorporación en modelos de simulación puede ayudar en la construcción de simuladores que integren aspectos ecológicos y fisiológicos con aspectos económicos y silviculturales.

Conclusiones

Los DMDs son herramientas útiles para la planificación de regímenes de espesura en plantaciones de teca ya que permiten examinar varias alternativas rápidamente y a que están basadas en principios biológicos robustos.

La comparación del presente diagrama, con el desarrollado para la India por Kumar et al. (1995) y por Arias y Camacho (2003) en Costa Rica parece indicar que las relaciones básicas tamaño densidad en la teca no varían considerablemente para diferentes regiones.

Regímenes con espaciamientos relativamente estrechos y aclareos frecuentes parecen ser los mas promisorios para el manejo de plantaciones de teca,

aunque espaciamientos mas amplios parecen ser atractivos si se desea madera de mayores dimensiones en turnos mas reducidos.

Recomendaciones

Profundizar en el estudio de la relación entre el manejo del régimen de espesura y las restricciones de tipo económico (mercado, costos de establecimiento e intervenciones) y tecnológico (por ejemplo, proporciones albura-duramen, defectos de la madera)

Explorar en mayor profundidad la factibilidad de usar DMDs para planificar y corregir el manejo en plantaciones de teca.

Implementar un DMD en un lenguaje de programación u hoja de cálculo, a fin de calcular automáticamente los regímenes de espesura

Desarrollar un DMD que incorpore las variables económicas como restricciones a la planificación de los regímenes de espesura.

Analizar el efecto de la variabilidad genética en las relaciones tamaño densidad en plantaciones de teca.

Tomar en cuenta los principios en los que se fundamentan los DMDs para el desarrollo de futuros modelos de simulación que combinen componentes empíricos y biológicos.

Bibliografía

- Ando, T. (1962). Growth analyses on the natural stands of Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc). II analysis of stand density and growth. Tokyo, Japan, pp 77.
- Arias, D. y P. Camacho 2003. Validación del índice de densidad del rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectona grandis* en el trópico. en Seminario y grupo de discusión virtual sobre teca Ed. Ponencia. INISEFOR, Heredia, Costa Rica.
- Dean, J.T. y S.J. Chang. 2002 Using simple marginal analysis and density management diagrams for prescribing density management. Southern Journal of Applied Forestry. 26:85-92.
- Dean, T.J., Baldwin, V.C. Jr.. 1996a. Growth in loblolly pine plantations as a function of stand density and canopy properties. Forest Ecology and Management.82:49-58.
- Dean, T.J., Baldwin, V.C. Jr.. The relationship between Reineke's stand-density index and physical stem mechanics. Forest Ecology and Management.81:25-34.
- Drew, T. J., Flewelling, T.J. (1979). Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. Forest Science 25(3): 518-532.
- Farndern, C. (1996). Stand density management diagrams for lodgepole pine, white spruce and interior douglas-fir., Canadian Forest Service. Pacific Forestry Centre. Victoria, British Columbia, Canada
- Franco, W. (1982) Estudio y levantamiento de sitios con fines de manejo forestal en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Edo. Barinas. Trabajo de Ascenso. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Instituto de Silvicultura, Mérida, Venezuela.

- Jack, S.B., Long, J.N. (1996) Linkages between Silviculture and Ecology: an analysis of density management diagrams. *Forest Ecology and Management* 86:205-220.
- Jerez, M., Vincent, L., Moret, Y. (1999). Un modelo de competencia para las plantaciones de teca del área experimental de la reserva forestal Caparo (Barinas, Venezuela). *Revista Forestal Venezolana* 43(2): 157-171.
- Long, J.N. (1985). A practical approach to density management. *Forestry Chronicles* 61: 23-27.
- Mora, E (2001) Evaluación de la variación del diámetro del fuste en plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.F.) con análisis de mediciones repetidas y curvas de perfil en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. pp 62
- Osorio, O. (1997) Regímenes de Espesura y sus Efectos en la Rentabilidad de Teca (*Tectona grandis* L.F.) en Caparo, Venezuela. Tesis MSc. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. pp 121
- Quevedo, A. 2002 Modelado de Distribuciones Diamétricas en Plantaciones de Teca del Area Experimental de Caparo. Tesis MSc.. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. pp 65
- Moret, Y., Jerez, M. Vincent, L. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal Caparo. *Revista Forestal Venezolana* 42(1): 41-50.
- Reineke, L. H. (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- Sackville Hamilton, N. R., Matthew, C., Lemaire G.. (1995) In defence of the $-3/2$ boundary rule: a re-evaluation of self-thinning concepts and status. *Annals of Botany* 76:569-577
- Saunders, M. R., Puettmann, K.J. (2000). A preliminary white spruce density management diagram for the Lake States. St. Paul, Minnesota, Department of Forest Resources, College of Natural Resources and Minnesota Agricultural Experiment Station. University of Minnesota pp 14.
- Tadaki, Y. (1963). The pre-estimating of stem yield based on the competition density effect. Tokyo, Japan, Government Forest Experimental Station. pp 17.
- Vincent, L. W. (1991). Un modelo de especificación de la densidad en plantaciones forestales. Mérida, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de los Andes. pp 20.
- Vincent, L. W. (1970). Estudio sobre la Tipificación del Bosque con Fines de Manejo en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Centro de Estudios Forestales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales,. Mérida, Venezuela, Universidad de Los Andes: 255.
- Weller, D.E., 1987 A re-evaluation of the $-3/2$ power rule of self-thinning. *Ecological Monographs* 57(1):23-43

- Yoda, K., Kira, T., Ogawa, H., Kozumi, K. (1963). Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology Osaka City University* 14: 107-129.
- Zambrano, T. J., M. y Vincent, L. (1995). "Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (*Tectona grandis* L.) en los Llanos Occidentales de Venezuela." *Revista Forestal Venezolana* 39(1): 1-119.
- Zerpa, F. , Vincent, L y Jerez, M (1997) SINFOPLAN.Sistema de Información para el Manejo de Plantaciones. Manual del Usuario Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela pp 20
- Zerpa, F. , Vincent, L y Jerez, M (1997) SAMAN.Sistema de Información para Procesamiento de inventarios en Plantaciones Forestales. Manual del Usuario Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela pp 25