



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO EN  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE  
LA MADERA**

**“Propiedades físicas de la madera, alometría y crecimiento de  
tres especies (género *Quercus*) bajo manejo en la Cuenca del  
Lago de Cuitzeo, Michoacán, México”.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGIA DE LA  
MADERA.**

**PRESENTA:**

**Rafael Aguilar Romero**

**Director de tesis: Dr. Alberto Ken Oyama Nakagawa**

**Codirectores: Dr. Adrián Ghilardi  
Dr. José Cruz de León**

**MORELIA, MICH., NOVIEMBRE DEL 2010**



## AGRADECIMIENTOS

A la División de estudios de posgrado Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la formación, a CONACYT por la beca otorgada a partir de Mazo de 2007 hasta Marzo de 2009.

Al Centro de Investigaciones en Ecosistemas por ofrecerme la oportunidad de desarrollar y plantear este estudio enfocado al manejo de recursos naturales. Al laboratorio de Ecología genética por el espacio otorgado para trabajar, al proyecto PAPIIT IN305909, UNAM.

A mi comité académico por sus valiosas aportaciones. Al Dr. Alberto Ken Oyama Nakagawa, por la dirección de mi tesis y su confianza depositada, al Dr. Adrian Ghilardi por su valiosa orientación en el proyecto y apoyo económico para la realización de este estudio, al Dr. José Cruz de León y Al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones por su detallada revisión y apreciables aportaciones

Al Dr. Ernesto Vega por sus asesorías enriquecedoras y su valiosa ayuda en la realización de este trabajo “Gracias Ernesto”.

A todos los compañeros de trabajo de campo Adrian Ghilardi “yayo”, Ernesto Vega, Ignacio Torres, Andrés Camú, Lorena Alvarado, Angélica Espinoza, Enrique Pascual, Hermilo Sánchez, Diego, Edgar Olvera, David Ibarra, Marcial Reyes, Enrique Valdovinos. A las personas de la comunidad de Tiristarán, el Fresno y la Soledad a el Sr. Mauro Zamudio, Sr. Andrés y el Sr. Jeremías gracias por el apoyo brindado.

A mis padres, a mi hermana y a Marbella Rodríguez por el apoyo incondicional que siempre me han brindado gracias. A mis amigos que a la distancia me siguen brindando lo mejor de ellos: el Shak (puerquito) y a el Charrito (terrorífico).

	Pág.
Índice	1
Resumen	3
Capítulo 1. <b>Introducción general</b>	5
Capítulo 2. <b>Propiedades físicas de la madera de tres especies de <i>Quercus</i></b>	
Introducción	9
Objetivos	10
Materiales y métodos	10
Resultados	16
Discusión	22
Anexos	24
Capítulo 3. <b>Relaciones alométricas de tres especies de encinos</b>	
Introducción	29
Objetivos	31
Materiales y métodos	31
Resultados	33
Discusión	35
Anexos	39
Capítulo 4. <b>Evaluación del crecimiento de rebrotes de encino mediante una cronosecuencia</b>	
Introducción	44

	Pág.
Objetivos	46
Materiales y métodos	46
Resultados	51
Discusión	54
Capítulo 5. <b>Discusión general</b>	59
<b>Recomendaciones generales</b>	63
<b>Referencias</b>	65

## Resumen

Para mejorar los sistemas de producción de carbón vegetal de madera de encinos se requiere información básica sobre aspectos ecológicos de las poblaciones, formas de manejo tradicional, así como también de algunas propiedades básicas de la madera.

Los trabajos hechos con rebrotes de encinos son escasos en la literatura, a pesar de que dicha estrategia de propagación vegetativa es frecuente en este género. En este estudio se analizaron dos aspectos de la ecología de tres especies de encinos que rebrotan (*Quercus castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola*) que son importantes para la producción de madera y de carbón en la Cuenca del Lago de Cuitzeo: las ecuaciones alométricas de biomasa y algunas propiedades básicas de la madera como son densidad, contenido de humedad y proporciones de tejidos. Además se estimaron las tasas de crecimiento de dos especies de encino mediante cronosecuencias.

Las estimaciones de biomasa total (BT) y madera seca para carbón (MSC) de los rebrotes como función del diámetro a la altura del pecho (DAP) se expresaron con la ecuación  $y = a \times DAP^b$ . El diámetro de los rebotes fue un excelente predictor de biomasa total (BT) y madera seca para carbón (MSC), resultando en valores de  $R^2$  mayores al 92% siendo significativos.

Para las propiedades de la madera se analizaron dos factores con su interacción: especie y tamaño (clase diamétrica). El tamaño fue el único factor que influyó al contenido de humedad en todas las especies. Las proporciones de duramen y de cortezas interna y externa son influenciadas por la especie, el tamaño y la interacción. En la densidad el factor importante fue la especie seguida de la clase diamétrica. Finalmente, para la proporción de albura el factor más importante fue la categoría diamétrica seguida de la interacción entre factores.

El estudio de cronosecuencias mostró que los rebrotes de *Q. castanea* tienen índices de crecimiento anual (ICA, medido en kg de biomasa total) significativamente mayores que *Q. laeta* ( $1.6 < ICA_{Cast} < 5.0$  y  $1.1 < ICA_{Laet} < 2.4$  respectivamente). Las estimaciones de la productividad por hectárea también son mayores para *Q. castanea* (0.3 a 8.0 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de BT) que para *Q. laeta* (0.2 a 4.0 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de BT). La productividad máxima de madera en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> ocurre entre los 30 a los 50 años, dependiendo de la densidad de

rebotes y de su sobrevivencia en el tiempo. Los tiempos de cosecha reales usados por los carboneros son la mitad de los sugeridos por los modelos.

Los resultados mostrados en este estudio aportan información importante para diseñar estrategias de manejo apropiadas para los encinos de México.

*Palabras clave:* Manejo de encinos, carbón, ecuaciones de biomasa, crecimiento de rebotes, cronosecuencia, propiedades de la madera, *Quercus castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola*.

## Capítulo 1: Introducción general y objetivos

### 1.- Generalidades

El género *Quercus* (familia *Fagaceae*) es uno de los grupos de árboles más importantes del mundo y se estima que existen de 350 a 500 especies distribuidas principalmente en el hemisferio norte (Rodríguez y Romero, 2007). En México se han descrito 161 especies, de las cuales 109 son endémicas del país; 76 corresponden a encinos rojos (sección *Lobatae*), 81 a encinos blancos (sección *Quercus*) y 4 especies de encinos intermedios (sección *Protobalanus*) (Valencia, 2004).

### 2.- Importancia biológica y ecológica

Los encinos son elementos dominantes o codominantes (junto con los pinos) en los bosques templados y son fundamentales en la formación de suelos ya que contribuyen en el reciclaje de nutrientes y en el balance hídrico. Se les considera como especies clave en los ecosistemas porque una gran cantidad de especies de plantas, hongos, insectos, aves y mamíferos se encuentran asociados a ellos, por lo que cualquier alteración produciría un impacto considerable en estas comunidades (Lewington y Streeter, 1993; Nixon, 1993; Reyes *et al.*, 1995).

Su distribución corresponde principalmente a las zonas montañosas. Los encinares se desarrollan normalmente en condiciones de clima templado subhúmedo con lluvias en verano, pero es posible encontrarlos también en climas tropicales lluviosos y en climas secos o áridos. El rango de precipitación media anual de todos estos climas varía de 350 mm a más de 2000 mm. La gran mayoría de la superficie cubierta por encinares se encuentra en los rangos de temperatura de entre 10 y 26 °C.

Como recurso forestal, se considera al encino dentro del grupo de las latifoliadas de clima templado-frío. Este grupo cubre una superficie de 8, 409, 343 hectáreas, con un volumen total de 355, 549, 780 m<sup>3</sup> en madera para México (Quintanar, 2002).

Los árboles o arbustos de *Quercus* tienen alturas que varían de 2 a 30 m y pueden ser totalmente caducifolios o totalmente perennifolios. Se trata de plantas de lento crecimiento que no toleran un drenaje deficiente. Debido a que son capaces de crecer y establecerse en suelos poco fértiles, los encinos funcionan como plantas pioneras, que en su etapa adulta aportan materia orgánica que favorece las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, generando un ambiente propicio para el desarrollo de otros organismos tanto animales como vegetales (Reyes y Gama, 1995).

### **3.- Importancia económica**

Los encinos tienen una gran importancia económica debido a su potencial como recurso forestal por los diversos usos a los que se destina la madera: celulosa, escuadría, combustible (leña y carbón), postes, pilotes, durmientes, etc. (SEMARNAT, 2001). Sin embargo, a nivel industrial los encinos han sido subutilizados y poco aprovechados, a pesar de ser el segundo género más importante después de los pinos. Una de las posibles razones es que de las aproximadamente 161 especies, sólo 60 de ellas presentan diámetros y alturas comerciales para la industria forestal.

La industria forestal nacional está desarrollada para el aprovechamiento del pino, por su facilidad para ser trabajado en comparación con lo difícil y costoso que es trabajar la madera de encino. Además, existe un desconocimiento de las características y propiedades de la madera de las especies de encino, que es considerada como preciosa en otros países. También influye la falta de una cultura del uso de los encinos como madera industrializada en productos terminados de alto valor agregado.

El uso de los encinos en México se restringe a la elaboración de leña y carbón, y en menor medida para la elaboración de artículos domésticos y de construcciones rústicas (Zavala, 1990).

Analizando los usos a los que se destina la madera de encino a nivel nacional se encuentra que el 50% de la producción de encino se destina para celulósicos y el 30% para escuadría. Por lo tanto, los volúmenes dedicados a combustibles (leña y carbón) son bajos (Tabla 1). Estos promedios se deben al alto volumen de producción de los estados de Chihuahua, Durango y Michoacán.

Tabla 1. Distribución porcentual de la producción nacional de encinos por sus usos.					
Año	Escuadría	Celulósicos	Combustibles	Otros usos	Producción total
1995	33.1	53.5	12.6	0.8	462,225
1996	37.0	35.3	16.2	11.5	642,879
1997	30.3	53.0	13.3	3.4	578,687
1998	37.5	39.9	17.6	5.0	692,915
1999	28.8	49.2	18.0	4.0	662, 509
Fuente: SEMARNAT, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000 y SEMARNAT (2001).					

Además, en algunas comunidades utilizan las bellotas como alimento. En la medicina tradicional es común que se utilice la corteza o pequeños trozos de madera como medicamentos astringentes o como antisépticos, y en otros casos se utiliza la corteza para la obtención de colorantes y taninos (Bello y Labat 1987; Luna, *et al.* 2003; Valencia, 2004). Algunas de las especies arbustivas de Michoacán y Jalisco son frecuentemente utilizadas para la elaboración de artesanías.

#### **4.-Aprovechamiento de los encinares en la cuenca del lago de Cuitzeo**

Los encinos en la Cuenca de Cuitzeo, en el estado de Michoacán son principalmente utilizados para la elaboración de carbón vegetal y leña, debido a lo pesado de su madera y a la gran capacidad de rebrote de los tocones una vez que los arboles son derribados. En ocasiones se utilizan en la construcción de cercas, viviendas y herramientas para el arado.

La principal actividad económica en algunos pueblos en la cuenca de Cuitzeo consiste en la producción de carbón vegetal a partir de madera de encinos. La gente dedicada a esta actividad es conocida como “carbonera” y ha desarrollado a lo largo del tiempo un conocimiento empírico del manejo de sus encinares.

El aspecto central del manejo depende de la edad de los árboles, ya que la altura del corte del tronco depende de su diámetro. Si éste es pequeño, el corte se suele hacer a una

altura de 30 cm del piso. Para el caso de árboles grandes (“zasones” como suelen ser nombrados) el corte se aplica a una altura que va 1.30 m a 2.00 m a la altura del piso ya que, de acuerdo a la experiencia tradicional de los carboneros, si los cortasen a ras del piso lo más seguro es que no rebroten.

En la actualidad, la práctica de extracción de carbón no es una actividad regulada, ya que no existen permisos expedidos por la Comisión Nacional Forestal, por lo tanto no existe información sobre esta actividad. Dada la importancia de la extracción de madera de los encinos para la elaboración de carbón vegetal en las comunidades rurales de México, es importante definir modelos de manejo sustentable para esta actividad. Para ello, es necesario conocer los aspectos ecológicos del crecimiento de las poblaciones y las formas de manejo tradicional así como también algunas propiedades básicas de la madera como son: densidad y contenido de humedad dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Para en futuro poder recabar información que nos permita implementar estrategias de manejo sustentable.

## **5.- Objetivos de la tesis**

Los objetivos principales de este trabajo son:

1. Generar y sistematizar la información sobre las propiedades físicas de la madera de tres especies de encino manejados por rebrotes.
2. Cuantificar la biomasa utilizada para la elaboración de carbón de tres especies de encinos mediante la elaboración de ecuaciones alométricas.
3. Estimar la tasa de regeneración vegetativa (crecimiento) de los rebrotes de árboles manejados para la elaboración de carbón en sitios aprovechados con diferente edad.

## Capítulo 2. Propiedades físicas de la madera de tres especies de *Quercus*

### Introducción

La madera es usada en una gran variedad de productos debido a sus características y propiedades físicas y mecánicas que difieren con respecto a otros materiales. En algunos casos más de una propiedad es importante para su uso final.

La variabilidad que presenta la madera como material se debe a la disposición de sus células, ya que son diferentes en sus distintas direcciones del tronco; por ello se considera como un material anisotrópico. Las propiedades físicas y mecánicas varían dependiendo del corte que se le realice a la madera.

Se hizo una revisión bibliográfica para identificar trabajos enfocados en estudiar las propiedades de la madera para las especies de encino consideradas en esta tesis (Anexo I). Las principales propiedades reportadas son:

- Organolépticas (color, olor, sabor).
- Anatómicas (porosidad, largo de la fibra).
- Químicas (celulosa, lignina, cenizas, solubilidad a la sosa, pH, extracción sucesiva y calorimetría).
- Físicas (densidad, contracción e hinchamiento).
- Mecánicas (flexión estática, compresión paralela, compresión perpendicular, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, dureza, tensión paralela, tensión perpendicular, rajadura e impacto).
- Tecnológicas (secado, preservación y aserrío).
- Trabajabilidad (susceptibilidad para usarse en diversas industrias).

La propiedad física más importante de la madera es su densidad, dado que está muy relacionada con las propiedades mecánicas. La producción de pulpa por unidad de volumen también se relaciona con la densidad, así como su conductividad térmica. Los cambios dimensionales (contracciones e hinchamientos) y el comportamiento de la madera en procesos como aserrío, secado, maquinado, elaboración de chapa y los tratamientos de preservación e impregnación, son afectados por la densidad.

Algunos factores ambientales que pueden modificar las propiedades de la madera son: el suelo, la precipitación y la luz. Por estos motivos, los estudios de las propiedades

antes mencionadas se realizan con base en las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés), que establecen protocolos detallados para realizar ensayos utilizando probetas de dimensiones específicas para cada propiedad (Quintanar, 2002). Las propiedades analizadas en este trabajo se midieron en rodajas de madera de árboles rebrotados, que incluyeron la corteza. Puesto que en la elaboración de carbón la corteza no es removida, era necesario conocer las propiedades para todo el árbol y no solamente para la madera aserrable. No logramos encontrar algún estudio que hubiera hecho pruebas sobre muestras de madera con corteza.

## **Objetivos**

El objetivo principal de este capítulo consistió en caracterizar las propiedades físicas de tres especies de encinos (*Quercus castanea*, *Q. deserticola* y *Q. laeta*). En particular, se estimó el contenido de humedad, la densidad básica y la proporción de tejidos macroestructurales (duramen, albura, corteza interna y corteza externa) en la sección transversal en las rodajas ya que influye en la calidad de la madera para fines alternativos a la producción de carbón.

## **Materiales y métodos**

### **Sitio de estudio**

El estudio fue hecho en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, la cual tiene una superficie de 4026 km<sup>2</sup>. Se localiza dentro de la Faja Volcánica Transmexicana entre los 19°30' y 20°05' latitud norte y 100°35' y 101°30' longitud oeste, en el estado de Michoacán.

El clima predominante de la cuenca corresponde al templado con lluvias de verano. Sin embargo, existe un gradiente de incremento de humedad y descenso de temperatura de norte a sur, debido sobre todo a un incremento en la amplitud de relieve en la cuenca. La temperatura media en la cuenca es de 15° C y la precipitación promedio anual es menor a 1000 mm.

El tipo de suelo del área de estudio es cambisol y luvisol. El tipo de vegetación del área de estudio es dominado por *Quercus castanea* Née, *Q. laeta* Liemb, y *Q. deserticola*

Trel. También se encuentran otras especies como *Eysenhardtia polystachya*, *Erythrina americana*, *Opuntia spp.*, e *Ipomea murucoides*.

Las principales actividades dentro de esta zona son: la agricultura, ganadería, extracción de madera para leña y la elaboración de carbón vegetal.

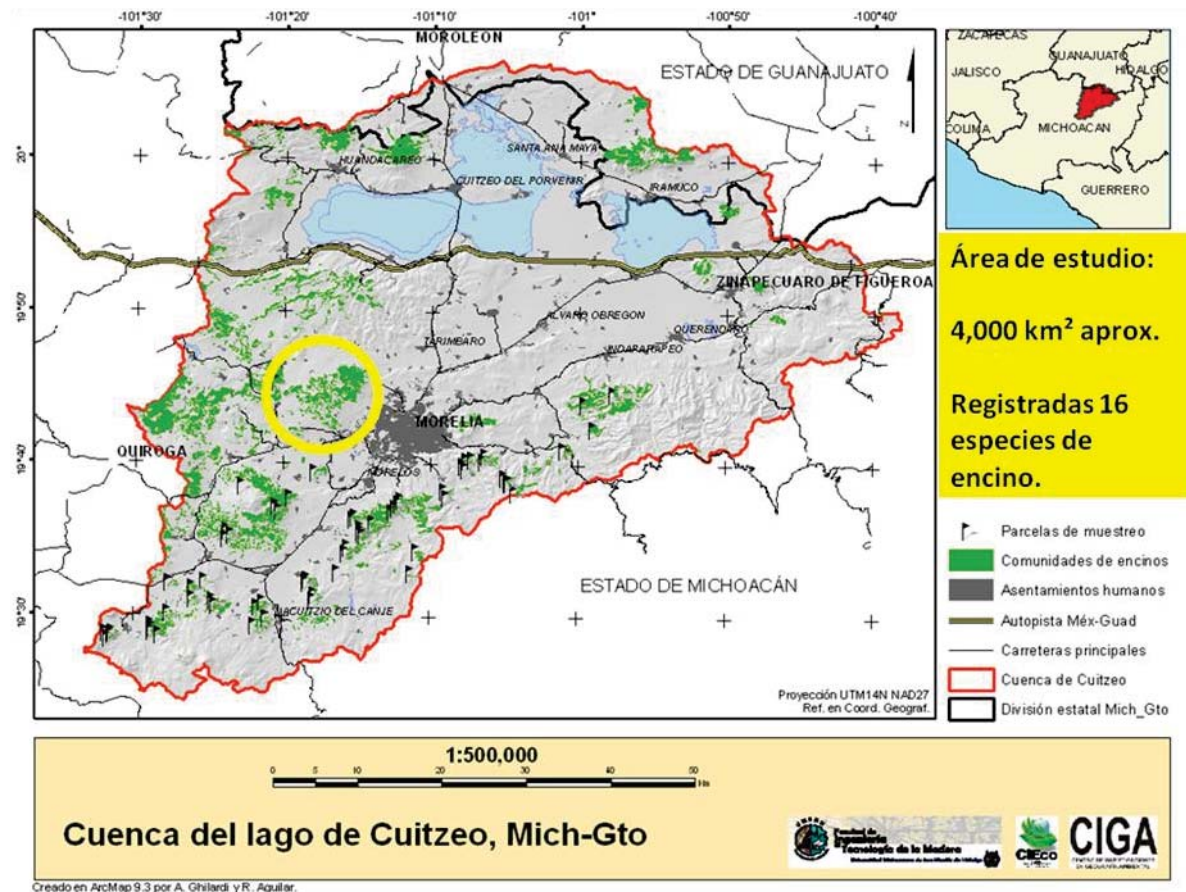


Figura 1. Sitio de estudio.

### Selección de especies

Empleando censos de vegetación previos (I. Torres, datos no publicados), se seleccionaron las tres especies más importantes de la cuenca, en términos de su distribución, abundancia relativa y área basal: *Quercus castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola* (Figura 2).



*Quercus castanea* Nee



*Quercus laeta* Liemb



*Quercus deserticola* Trel.

Figura 2. Especies seleccionadas de *Quercus*

### Toma de muestras

Se eligieron 9 árboles de cada especie, los cuales fueron categorizados en tres clases diamétricas: de 0-30 cm, 30-60 cm y mayores a 60 cm. Se colectaron tres rodajas de cada árbol, tomadas cada una a una altura diferente (en la base, a 1.3 m y a 2.3 m), dando un total de 27 rodajas (Figura 3). Las rodajas tuvieron un grosor de entre 5 y 10 cm y fueron colectadas con corteza. Al momento del corte las muestras se envolvieron en plástico y se refrigeraron a 10°C hasta implementar los análisis. Todas las muestras se procesaron antes de 48 horas.



Toma de muestras en campo



Pesado y etiquetado



Muestras en laboratorio

Figura 3. Procedimiento de recolección de rodajas

### Área de tejidos macro-estructurales

En el laboratorio las rodajas frescas fueron pesadas en una báscula gravimétrica de 3 kg  $\pm$  1 g. Las rodajas fueron marcadas con dos líneas perpendiculares a lo largo del diámetro, tomando en cuenta el diámetro mayor y menor, con la finalidad de determinar el

incremento del área de sus componentes estructurales con respecto a su clase diamétrica: duramen, albura, corteza interna y corteza externa. (Figura 4).

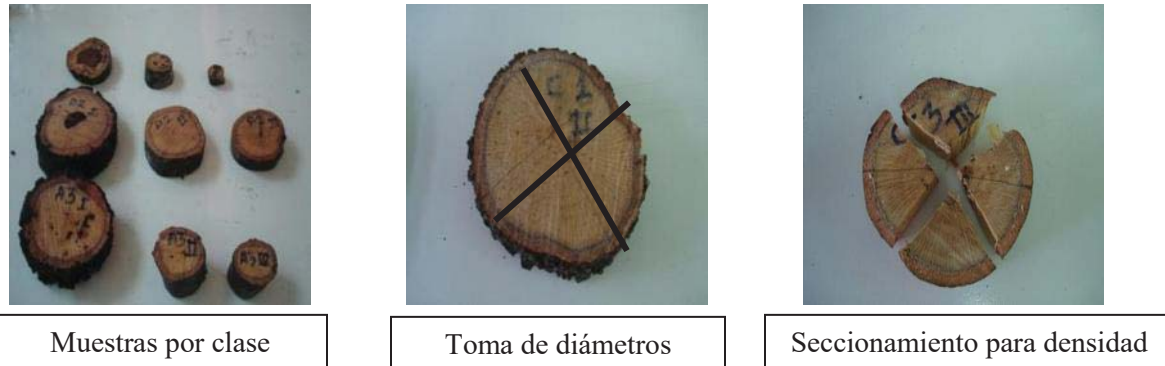


Figura 4. Procedimiento para tomar áreas y seccionamiento para determinar densidad.

Se registraron los diámetros mayor y menor para cada componente estructural, (duramen, duramen + albura, duramen + albura + corteza interna, duramen + albura + corteza interna + corteza externa), midiendo los diámetros mayor y menor para poder estimar la proporción de sus tejidos, por medio de la fórmula de la elipse ya que las rodajas se asimilaban más a esta forma. Así se determinó el área para cada componente por medio de la fórmula:

$$A = (\pi) * (r1) * (r2)$$

donde:

A= Área en mm<sup>2</sup>

Π= 3.1416

R1= diámetro mayor

R2= diámetro menor

### Contenido de humedad

El contenido de agua o contenido de humedad puede definirse como la masa de agua contenida en una pieza de madera expresada como porcentaje de la masa de la pieza en estado anhidro. El contenido de humedad de la madera se calcula con la expresión siguiente:

$$CH = \frac{Pg - Po}{Po} \times 100\%$$

en la que:

CH= contenido de humedad (%).

Pg = masa inicial de la madera en estado húmedo

Po = masa de la madera en estado anhidro

### **Densidad**

Esta variable expresa la relación entre la masa de los distintos tipos de elementos que forman la madera y el volumen que ellos ocupan. Como la madera es un material poroso, debe considerarse al referirse a la densidad de la madera el volumen interno de espacios vacíos existentes en el tejido. El contenido de humedad de la madera influye sobre la relación madera/volumen, por lo que también se modifican el peso y las dimensiones de la madera.

Se conocen distintos tipos de densidad, pero los más importantes es la densidad básica. En la densidad básica se relacionan la masa anhidra y el volumen de la madera saturada con agua de la siguiente forma:

$$Sog = \frac{Po}{Vg}$$

donde:

Sog =densidad básica (g/cm<sup>3</sup>)

Po = masa madera anhidra (g)

Vg = volumen madera saturada de agua (cm<sup>3</sup>)

Las rodajas fueron seccionadas para poder manipularlas al momento de la medición en el recipiente donde se sumergieron. El volumen se midió en un recipiente de 2 litros, el cual fue llenado de agua procurando que el nivel permitiera que la muestra no tocara el fondo. Se colocó el recipiente sobre la balanza, se tomó la lectura y después se taró la balanza, después se sumergió la rebanada y se tomó la lectura del agua desplazada, que es

equivalente al volumen de la muestra. Se obtuvieron los volúmenes de todas las secciones de cada rodaja y después se sumaron estas para determinar el volumen total de cada rodaja.

Después, todas las rodajas fueron llevadas a una estufa para secarse a 75°C, hasta alcanzar un peso constante. Una vez obtenido el peso seco se determinó la densidad básica de la madera para cada especie.

Finalmente, la anatomía de la sección transversal de las rodajas se describió según su macroestructura. Las variables medidas en las rodajas frescas fueron: a) diámetro mayor y menor, b) excentricidad de la médula y c) áreas de duramen, albura, corteza interna y corteza externa.

Se realizaron análisis de varianza bifactorial de cada una de las variables medidas para detectar la influencia de la especie y del tamaño (tres clases diamétricas: “C” - 0 a 30 cm), “M” - entre 30 y 60 cm) y “G” - mayores a 60 cm). Se utilizó la transformación arcoseno para los valores en proporciones (Sokal y Rohlf, 1995). Se realizaron comparaciones múltiples con la prueba de Tukey de cada una de las variables medidas para observar diferencias entre los niveles de los factores estudiados (especies y clases diamétricas). Así mismo se analizaron los residuales para cada una de las variables medidas. Todos los análisis fueron implementados con el software estadístico “R” (R Development Core Team 2007).

**-Resultados**

**Contenido de humedad**

El contenido de humedad varió entre 40% y 45% sin importar la especie, pero es menor en las rodajas grandes (categoría G) de *Q. castanea* (Figura 5A). La categoría de tamaño fue el único factor que influyó esta variable en todas las especies ( $F=7.68$ ,  $gl=2$ ,  $p<0.0001$ ).

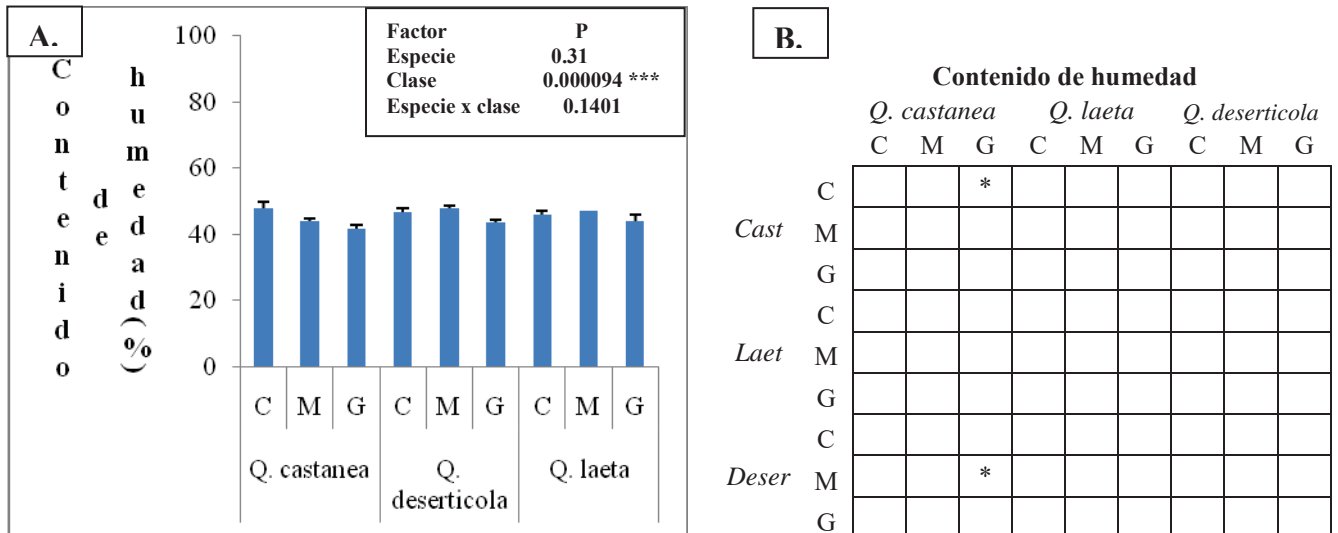


Figura 5. A. Contenido de humedad de la madera por especie y categoría diamétrica.

Promedios de contenido de humedad para tres especies y tres categorías diamétricas. Las barras indican el error estándar. C: 0 a 30 cm, M: entre 30 y 60 cm; G: mayores a 60 cm.

B. Comparaciones múltiples de Tukey para las especies y categorías diamétricas. Los asteriscos muestran el nivel de significancia. \*:  $p<0.05$ . Las pruebas múltiples indicaron que los árboles grandes (categoría G) de *Q. castanea* y *Q. deserticola* fueron diferentes a las demás combinaciones de factores.

No se encontraron diferencias significativas en el contenido de humedad entre especies *Q. castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola* ( $F = 0.8834$ ;  $p = 0.3521$ ) (Tabla 1). Esta variable decrece con el diámetro y fue significativamente diferente en *Q. castanea* ( $F = 4.6091$ ;  $p = 0.0149$ ).

Tabla 1. Contenido de humedad de *Q. castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola*.

	Contenido de humedad en %			
	Clase diametrica en cm			Media
	0-30	30-60	60-90	
<i>Q. castanea</i>	48.0 <sup>a</sup> ± 1.7	43.7 <sup>ab</sup> ± 0.9	41.5 <sup>b</sup> ± 1.6	44.5 <sup>a</sup> ± 1.0
<i>Q. laeta</i>	45.8 <sup>ab</sup> ± 1.0	46.8 <sup>ab</sup> ± 0.2	43.8 <sup>ab</sup> ± 2.2	45.5 <sup>a</sup> ± 0.8
<i>Q. deserticola</i>	46.4 <sup>ab</sup> ± 1.1	47.9 <sup>a</sup> ± 0.5	43.7 <sup>ab</sup> ± 0.8	46.0 <sup>a</sup> ± 0.6

Nota: DAP= Diámetro a la altura del pecho (1.30 cm). Se representan los errores estándar. Los niveles no están conectados por el mismo significado de la letra  $\alpha=0.05$ . Las suscripciones muestran las significancia de las comparaciones múltiples de Tukey en las especies, en las clases diamétricas y en las interacciones entre la clase diamétrica y la especie.

### Duramen

El duramen varió de 2,000 mm<sup>2</sup> a 24,000 mm<sup>2</sup> siendo importante en primer lugar la especie (Figura 6A), (F=84.26, gl=2,  $p<0.0001$ ), seguida de la clase diamétrica (F=21.22, gl=2,  $p<0.0001$ ) y por último, de la interacción especie x categoría de tamaño (F=5.91, gl=4,  $p<0.0001$ ). La categoría G de *Q. castanea* es la que tuvo mayor proporción de este tejido (Figura 6A).

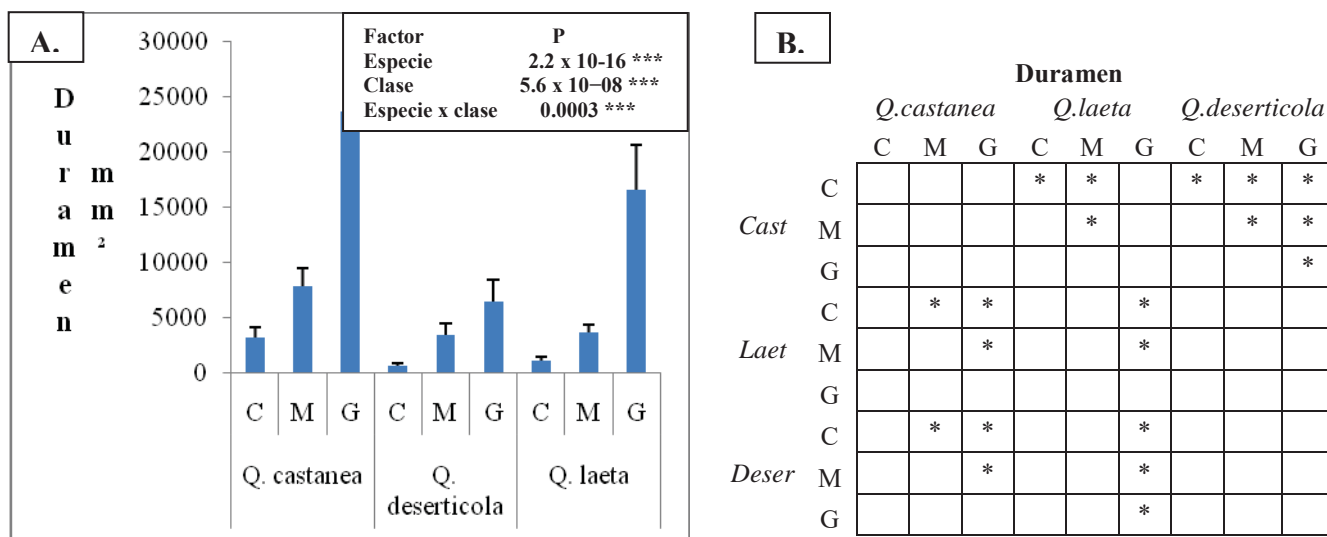


Figura 6. A. Cantidad de duramen en la madera por especie y categoría diamétrica.

Promedios de la proporción de duramen para tres especies y tres categorías diamétricas. Las barras indican el error estándar. C: 0 a 30 cm, M: entre 30 y 60 cm; G: mayores a 60 cm.

B. Comparaciones múltiples de Tukey para las especies y categorías diamétricas. Los asteriscos muestran el nivel de significancia. \*:  $p < 0.05$ . Las pruebas múltiples indicaron que los árboles grandes (categoría G) de *Q. laeta* y la (categoría G) de *Q. castanea* fueron diferentes en las demás combinaciones de factores.

### Albura

La albura varió de 5,000 mm<sup>2</sup> a 60,000 mm<sup>2</sup> siendo importante en primer lugar la clase diamétrica (Figura 7A) ( $F=12.25$ ,  $gl=2$ ,  $p < 0.0001$ ), seguida por la interacción entre especie y clase ( $F=4.41$ ,  $gl=4$ ,  $p < 0.0001$ ). La clase G de *Q. castanea* es la que tuvo mayor proporción de este tejido (Figura 7A).

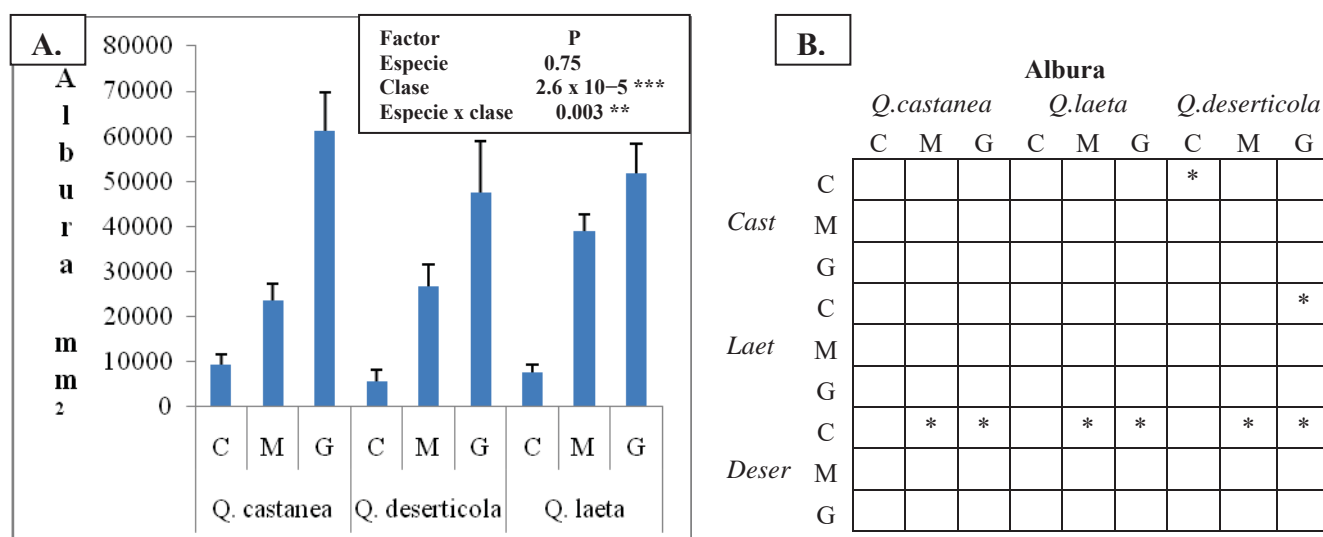


Figura 7. A. Cantidad de albura en la madera por especie y categoría diamétrica. Promedios de la proporción de albura para tres especies y tres categorías diamétricas. Las barras indican el error estándar. C: 0 a 30 cm, M: entre 30 y 60 cm; G: mayores a 60 cm.

B. Comparaciones múltiples de Tukey para las especies y categorías diamétricas. Los asteriscos muestran el nivel de significancia. \*:  $p < 0.05$ . Las pruebas múltiples indicaron que los árboles pequeños (categoría C) de *Q. deserticola* fueron diferentes a las demás combinaciones de factores.

## Corteza interna

La corteza interna varió de 3000 mm<sup>2</sup> a 16000 mm<sup>2</sup> siendo importante tanto la especie (Figura 8A) ( $F=8.39$ ,  $gl=2$ ,  $p<0.0001$ ) como la categoría de tamaño ( $F=3.64$ ,  $gl=2$ ,  $p<0.0001$ ). La clase G de *Q. laeta* es la que tuvo mayor proporción de este tejido (Figura 8A).

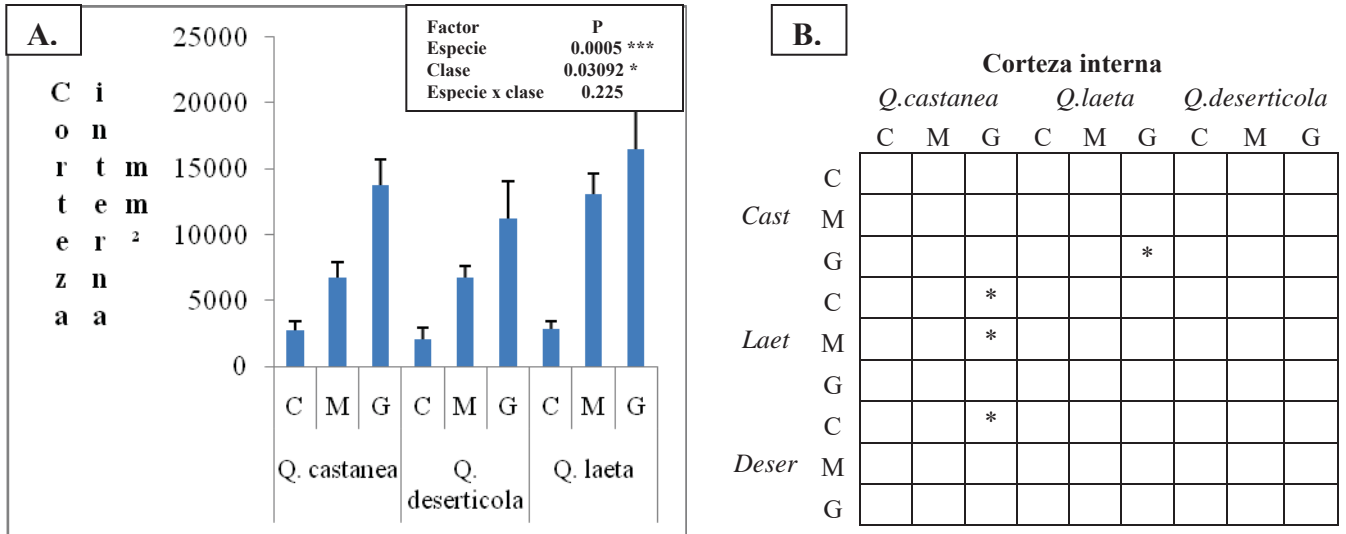


Figura 8. A. Cantidad de corteza interna en la madera por especie y categoría diamétrica.

Promedios de la proporción de corteza interna para tres especies y tres categorías diamétricas. Las barras indican el error estándar. C: 0 a 30 cm, M: entre 30 y 60 cm; G: mayores a 60 cm.

B. Comparaciones múltiples de Tukey para las especies y categorías diamétricas. Los asteriscos muestran el nivel de significancia. \*:  $p<0.05$ . Las pruebas múltiples indicaron que los arboles grandes (categoría G) de *Q. castanea* fueron diferentes a las demás combinaciones de factores.

## Corteza externa

La corteza externa varió de 500 mm<sup>2</sup> a 60,000 mm<sup>2</sup> siendo importante en primer lugar la especie (Figura 9A) (F=9.79, gl=2, p<0.0001), en segundo lugar la categoría de tamaño (F=19.45, gl=2, p<0.0001) y por último, la interacción especie x clase (F=4.10, gl=4, p<0.0001). La clase G de *Q. castanea* es la que tuvo mayor proporción de este tejido (Figura 9A).

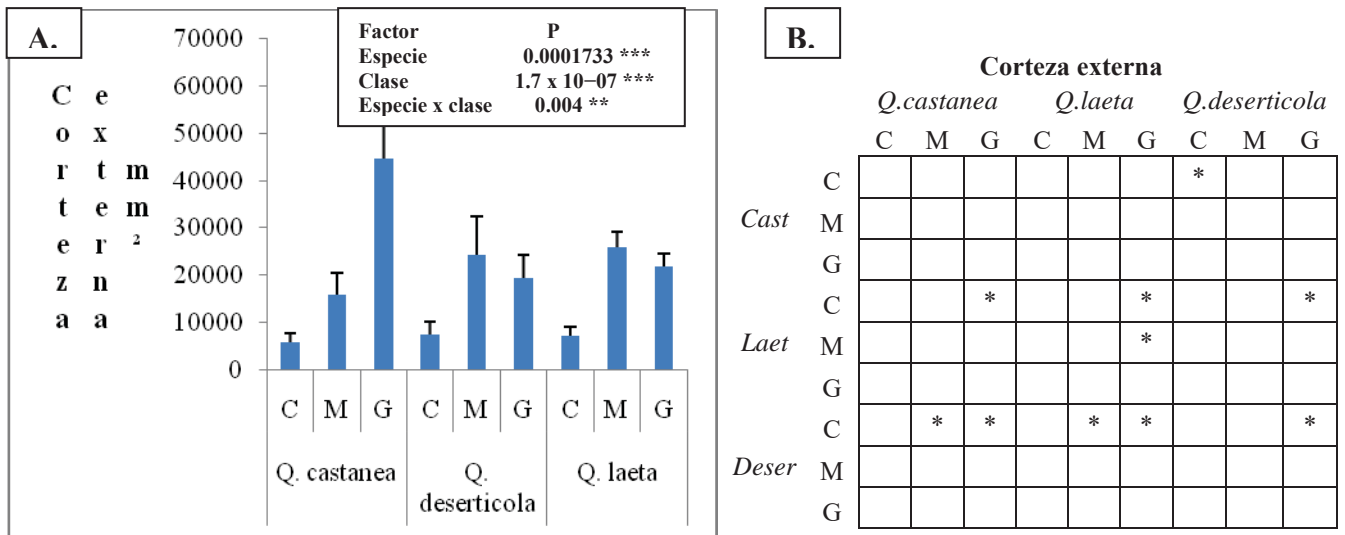


Figura 9. A. Cantidad de corteza externa en la madera por especie y categoría diamétrica.

Promedios de la proporción de corteza externa para tres especies y tres categorías diamétricas. Las barras indican el error estándar. C: 0 a 30 cm, M: entre 30 y 60 cm; G: mayores a 60 cm.

B. Comparaciones múltiples de Tukey para las especies y categorías diamétricas. Los asteriscos muestran el nivel de significancia. \*:  $p < 0.05$ . Las pruebas múltiples indicaron que los árboles pequeños (categoría C) de *Q. deserticola* fueron diferentes a las demás combinaciones de factores.

## Densidad

La densidad en la madera varió de 0.5 g/cm<sup>3</sup> a 0.7 g/cm<sup>3</sup> siendo importante la especie (Figura 10A) ( $F=11.63$ ,  $gl=2$ ,  $p<0.0001$ ) y la clase diamétrica ( $F=15.21$ ,  $gl=2$ ,  $p<0.0001$ ). Los factores que más afectaron fueron la especie y la clase diamétrica con la menor densidad fueron las rodajas pequeñas de *Q. deserticola* (Figura 10A).

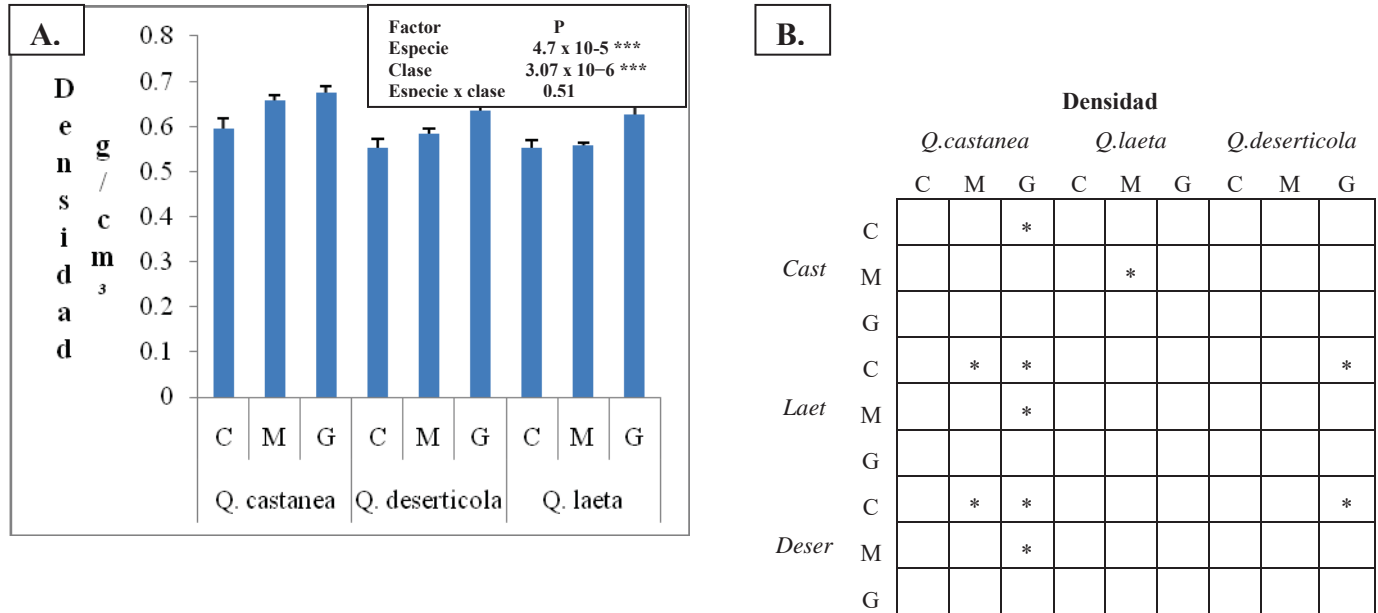


Figura 10. A. La densidad en la madera por especie y categoría diamétrica.

Promedios de la densidad para tres especies y tres categorías diamétricas. Las barras indican el error estándar.

C: 0 a 30 cm, M: entre 30 y 60 cm; G: mayores a 60 cm.

B. Comparaciones múltiples de Tukey para las especies y categorías diamétricas. Los asteriscos muestran el nivel de significancia. \*:  $p<0.05$ ; Las pruebas múltiples indicaron que los arboles grandes (categoría G) de *Q. castanea* fueron diferentes a las demás combinaciones de factores.

En la densidad básica la especie fueron significativamente distintas ( $F = 18.3384$ ;  $p < 0.0001$ ): los rebrotes de *Q. castanea* tienen una densidad mayor que *Q. deserticola* y *Q. laeta* (Tabla 2).

Tabla 2. Densidad básica para *Q. castanea*, *Q. desertícola* y *Q. laeta*.

	Densidad básica g/ cm <sup>3</sup>							
	Clase diametrica cm						Media	
	0-30		30-60		60-90			
<i>Q. castanea</i>	0.59 <sup>bcd</sup>	± 0.02	0.66 <sup>ab</sup>	± 0.01	0.68 <sup>a</sup>	± 0.02	0.64 <sup>a</sup>	± 0.01
<i>Q. laeta</i>	0.55 <sup>d</sup>	± 0.02	0.56 <sup>cd</sup>	± 0.01	0.62 <sup>abcd</sup>	± 0.03	0.58 <sup>b</sup>	± 0.01
<i>Q. deserticola</i>	0.55 <sup>d</sup>	± 0.02	0.58 <sup>bcd</sup>	± 0.01	0.63 <sup>abc</sup>	± 0.01	0.59 <sup>b</sup>	± 0.01

Nota: DAP= Diámetro a la altura del pecho (1.30 cm). Se representan los errores estándar. Los niveles no están conectados por el mismo significado de la letra  $\alpha=0.05$ . Las suscripciones muestran las significancia de las comparaciones múltiples de Tukey en las especies, en las clases diamétricas y en las interacciones entre la clase diamétrica y la especie.

## Discusión

Los valores obtenidos en este estudio no coinciden con los reportados en otros trabajos. Esto puede deberse a que las muestras, de las cuales se obtuvo el contenido de humedad y la densidad, contenían sus cuatro componentes estructurales: albura, duramen, corteza interna y corteza externa. Por lo tanto, la densidad reportada es un promedio del conjunto de tejidos.

El contenido de humedad determinado para las especies fue alto ya que las rodajas fueron tomadas de árboles recién derribados, es decir el contenido de humedad determinado fue muy alto debido a que el 50% del peso en árboles en pie es agua.

Los valores reportados en la literatura para encinos mexicanos son de  $\delta=$  g/cm<sup>3</sup> 0.51 a  $\delta=$  0.89 g/cm<sup>3</sup> (Quintanar, 2002). Nuestros resultados va de  $\delta=$  0.58 g/cm<sup>3</sup> a 0.64 g/cm<sup>3</sup> los cuales se encuentran dentro del rango reportado en trabajos previos.

El valor reportado para *Q. castanea* dentro de la literatura varia entre  $\delta=$ 0.63 g/cm<sup>3</sup> a  $\delta=$ 0.75 g/cm<sup>3</sup> (de la Paz, 2000) y  $\delta=$ 0.66 g/cm<sup>3</sup> (Quintanar, 2002). Nuestro resultado fue de  $\delta=$ 0.64 g/cm<sup>3</sup> el cual se encuentra dentro de los rangos reportados.

Para el caso de *Q. desertícola* y *Q. laeta* que están clasificados como encinos blancos la literatura reporta valores de  $\delta=$ 0.68 g/cm<sup>3</sup> para *Q. laeta* (Nájera *et al.*, 2005),

$\delta=0.71$  g/cm<sup>3</sup> para *Q. laeta* (Quintanar, 2002),  $\delta=0.74$  para *Q. laeta* (Dávalos y Bárcenas 1999),  $\delta=0.75$  g/cm<sup>3</sup> para *Q. laeta* (de la Paz, 2000). Nuestros resultados para *Q. deserticola* de  $\delta=0.58$  g/cm<sup>3</sup> y *Q. laeta* de  $\delta=0.59$  g/cm<sup>3</sup> se encuentran fuera del rango reportado para encinos blancos mexicanos. Así mismo se reporta un rango para encinos estadounidenses de  $\delta=0.66$  g/cm<sup>3</sup> a  $\delta=0.72$  g/cm<sup>3</sup> (Forest Products Laboratory, 1999). Estando nuestros resultados también fuera de este rango. Sin embargo, los valores que obtuvimos si están dentro del rango reportado para el encino blanco europeo *Q. robur* ( $\delta=0.50$  g/cm<sup>3</sup> a  $\delta=0.66$  g/cm<sup>3</sup>) (Bodirlau *et al.* 2007).

Cabe mencionar que nuestras muestras mantuvieron el duramen, la albura, la corteza interna y la corteza externa, lo cual podría explicar lo bajo de nuestros resultados en comparación con los reportados en la literatura. La densidad básica incrementa con el diámetro pero esta difiere significativamente en *Q. castanea* ( $F = 8.8154$ ;  $p = 0.0006$ ). Los resultados de la densidad son consistentes debido a que esta aumenta, cuando se incrementa la proporción de tejidos dentro del fuste (Panshin y de-Zeeuw, 1970; Kollmann y Cote, 1984).

Para la proporción de tejidos (duramen, albura, corteza interna y corteza externa), no se encontró información en la literatura para poder comparar nuestros resultados. En el (Anexo 111), se puede observar la proporción de tejidos por especie.

Por esto es importante y urgente desarrollar estudios de las propiedades físicas de la madera de encinos dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, para poder implementar estrategias de usos con mayor valor agregado para estas especies distribuidas.

## Anexo I

Anexo I. Recopilación de estudios que reportan características tecnológicas de las especies de encinos (Quintanar 2002).

Nom. científico	Organolépticas	Anatómicas	Químicas	Físicas	Mecánicas	Tecnológicas	Observaciones
<b>Encinos rojos (Sección <i>Lobatae</i>)</b>							
<i>Q. candicans</i>	X	X	X	X	X	X	Pulpa, Resistente, Secado, Maquinado.
<i>Q. castanea</i>	X	X		X	X	X	Pulpa, Resistente, Secado, Maquinado
<i>Q. crassifolia</i>	X	X	X	X	X	X	Pulpa, Resistente, Secado, Maquinado
<i>Q. crassipes</i>	X	X				X	Pulpa
<i>Q. laurina</i>	X	X	X	X	X		Pulpa, Resistente, Secado, Maquinado
<i>Q. scytophyla</i>	X	X		X			Pulpa, Modera. resistente
<i>Q. mexicana</i>	X		X	X	X		Pulpa, Resistente, Secado, Maquinado
<i>Q. Gentry</i>	X	X					Pulpa
<b>Encinos blancos (Sección <i>Quercus</i>)</b>							
<i>Q. deserticola</i>	X	X				X	Pulpa
<i>Q. glaucooides</i>	X	X		X			Pulpa
<i>Q. laeta</i>	X	X		X			Pulpa
<i>Q. magnoliifolia</i>	X	X		X			Pulpa
<i>Q. resinosa</i>	X	X	X				Pulpa, Resistente, Maquinado
<i>Q. rugosa</i>	X	X	X	X	X		Pulpa, Resistente, Secado, Maquinado
<b>Encinos arbustivos</b>							
<i>Q. frutex</i>							

Especies	Duramen mm <sup>2</sup>	Es	Albura mm <sup>2</sup>	Es	C interna mm <sup>2</sup>	Es	C externa mm <sup>2</sup>	Es
<i>Q. castanea</i>	11,564.21	3,843.32	31,302.30	8,720.09	7,742.37	1,913.05	16,871.20	4,741.77
<i>Q. deserticola</i>	3,482.78	1,414.49	26,699.35	8,573.57	6,698.32	2,046.84	16,899.81	4,732.69
<i>Q. laeta</i>	7,098.11	3,342.27	32,730.15	7,403.40	10,775.94	2,746.37	18,310.09	3,621.44

Anexo II. Proporción promedio de tejidos para *Q. castanea*, *Q. deserticola* y *Q. laeta*.

Nota: se muestran los errores estándar para cada una de las proporciones de tejidos.

Anexo III. Proporción de tejidos en tres categorías de tamaño de *Q. deserticola*

Categoría	Base, 1.30m, a 2.30m	Duramen mm <sup>2</sup>	%	Albura mm <sup>2</sup>	%	C interna mm <sup>2</sup>	%	C externa mm <sup>2</sup>	%	Densidad g/cm <sup>3</sup>	% humedad
Chicos	Abajo (base)	1,227.76	4	12,605.32	37	4,620.14	14	15,341.76	45	0.61	0.44
	En medio (1.30m)	419.69	5	3,090.37	35	1,336.05	15	4,025.90	45	0.56	0.45
	Arriba (2.30m)	108.89	2	1,393.41	33	667.43	16	2,101.34	49	0.48	0.50
Medianos	Abajo (base)	6,655.54	7	39,633.33	38	9,678.41	9	47,829.08	46	0.62	0.46
	En medio (1.30m)	2,283.28	5	24,863.61	53	6,181.58	13	13,798.56	29	0.58	0.48
	Arriba (2.30m)	1,322.22	4	16,093.46	49	4,190.32	13	10,931.08	34	0.56	0.49
Grandes	Abajo (base)	13,251.08	9	83,931.64	56	21,265.26	14	30,498.13	21	0.67	0.42
	En medio (1.30m)	4,801.57	7	42,057.25	59	7,590.09	10	16,897.26	24	0.63	0.44
	Arriba (2.30m)	1,274.98	4	16,625.75	50	4,755.60	14	10,675.16	32	0.60	0.45

Nota: se muestran los errores estándar para cada una de las proporciones de tejidos.

Anexo III. Proporción de tejidos en tres categorías de tamaño de *Q. castanea*

Categoría	Base, 1.30m, a 2.30m	Duramen mm <sup>2</sup>	%	Albura mm <sup>2</sup>	%	C interna mm <sup>2</sup>	%	C externa mm <sup>2</sup>	%	Densidad g/cm <sup>3</sup>	% humedad
Chicos	Abajo (base)	5,973.01	16	15,833.62	41	4,748.52	12	11,703.42	31	0.59	0.46
	En medio (1.30m)	2,281.86	15	7,392.33	49	2,242.98	15	3,209.12	21	0.61	0.48
	Arriba (2.30m)	1,170.45	13	4,555.28	48	1,216.90	13	2,468.04	25	0.59	0.50
Medianos	Abajo (base)	13,246.73	15	34,783.82	39	10,191.68	11	31,123.74	35	0.41	0.69
	En medio (1.30m)	5,748.63	14	20,750.76	49	5,952.99	14	9,744.22	23	0.46	0.64
	Arriba (2.30m)	4,526.47	15	15,155.09	50	4,100.56	13	6,844.93	22	0.45	0.65
Grandes	Abajo (base)	36,983.72	20	82,595.89	45	19,307.37	11	43,108.36	24	0.67	0.41
	En medio (1.30m)	21,818.36	18	60,559.65	49	12,508.14	10	29,108.19	23	0.71	0.39
	Arriba (2.30m)	12,328.63	16	40,094.26	53	9,412.22	12	14,530.81	19	0.65	0.44

Nota: se muestran los errores estándar para cada una de las proporciones de tejidos.

Anexo III. Proporción de tejidos en tres categorías de tamaño de *Q. laeta*

Categoría	Base, 1.30m, a 2.30m	Duramen mm <sup>2</sup>	%	Albura mm <sup>2</sup>	%	C interna mm <sup>2</sup>	%	C externa mm <sup>2</sup>	%	Densidad g/cm <sup>3</sup>	% humedad
Chicos	Abajo (base)	2,042.36	6	11,722.46	36	4,669.56	15	13,904.67	43	0.57	0.44
	En medio (1.30m)	833.94	6	6,684.71	46	2,231.21	15	4,796.84	33	0.55	0.46
	Arriba (2.30m)	465.44	5	4,321.90	46	1,543.63	17	2,945.75	32	0.54	0.47
Medianos	Abajo (base)	6,245.15	6	52,570.91	46	18,670.31	16	35,689.80	32	0.58	0.46
	En medio (1.30m)	2,765.11	4	35,560.67	48	11,080.17	15	24,154.60	33	0.56	0.47
	Arriba (2.30m)	1,887.37	3	28,660.02	50	9,349.56	16	17,732.10	31	0.55	0.47
Grandes	Abajo (base)	32,287.93	20	70,210.91	44	27,451.56	17	30,980.21	19	0.64	0.44
	En medio (1.30m)	10,837.87	13	44,517.89	51	12,560.40	14	19,170.14	22	0.57	0.48
	Arriba (2.30m)	6,517.85	9	40,321.85	56	9,427.02	13	15,416.65	22	0.67	0.40

Nota: se muestran los errores estándar para cada una de las proporciones de tejidos.

Apéndice 1. Descripción de las especies bajo estudio

*Quercus castanea* Neé

Árbol de 5-20m de alto, diámetro de 10-80cm; ramillas de 2.5-5mm de grueso, tomentosas de color café castaño cuando son jóvenes, pronto glabras, generalmente con abundantes lenticelas; yemas de 2-4mm de largo, ovoides o agudas, de color café claro; estipulas de 1-4mm de longitud, lanceoladas; envés de las hojas jóvenes con abundante tomento de color amarillo, haz generalmente verde, con escasa pubescencia estrellada, con pelos glandulares, de color rojo; las hojas maduras de color blanco en el envés, coriáceas y rígidas, usualmente oblanceoladas, pero varían entre oblongas, lanceoladas y obovadas, de 2.5-15cm de longitud por 1.3-5cm de ancho, ápice de agudo a redondeado, base subcordada,

margen liso o revoluto, provisto de aristas que se engrosan cerca del ápice, en número de 5-9 a cada lado, en ocasiones con 4 serraciones a cada lado, 7-12 pares de nervios laterales; peciolos tomentosos, pronto glabros y lisos de color moreno claro a amarillo, de 0.3-1cm de longitud; flores esta minadas con aproximadamente 40-60 estambres, filamentos filiformes, las flores incluidas en una bráctea amarillenta de 1.5mm de longitud por 2mm de ancho; fruto anual en grupos de 2 o 3 sobre un pedúnculo grueso de 4-5mm de longitud, involucre hemisférico de 10-14mm de diámetro por 5-10mm de alto, escamas delgadas con escasa pubescencia de color gris, bellota ovoide de aproximadamente 18-25mm de largo por 12mm de ancho.

Distribución en Michoacán; prácticamente a lo largo de la cordillera Neo volcánica, incluyendo manchones de la parte central y este de la Depresión del Río Lerma, así como en la parte central de la Sierra Madre del Sur. En México: Chiapas, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, Tlaxcala y Veracruz.

Habitad; laderas de cerros rocosos, terrenos planos, suelos arcillosos-arenosos, con basalto, someros o profundos, cañadas, barrancas, “malpaís”, frecuentemente mezclado con pinos y encinos o con otras hojosas o bien disperso en pastizales o matorrales. Se localiza entre 1 450-2 600m, raras veces en mayor o menor altitud. Nombres comunes; encino blanco, encino colorado, encino rojo, encino negro, encino roble, encino amarillo, palo colorado, urikua, urik urapiti y capulincillo.

Uso regional; carbón, leña, postes para cerca, horcones, arados, cabos para herramienta, ejes para carreta, trompos y baleros (artesanías), enramadas, medicinal (corteza), muebles y construcción.

### ***Quercus desertícola* Trel.**

Árbol caducifolio de 2.5-10m de alto, diámetro de 12-70cm, corteza café oscura, con lenticelas muy evidentes; ramillas de 1.5-4mm de grueso con abundante tomento amarillo intenso; yemas café claro, filiformes, delgadas y pilosas de 2-4mm de largo, persistentes en las terminales o bien deciduas; hojas tardíamente deciduas, con abundante tomento amarillo cuando son jóvenes, en la madurez coriáceas y con pubescencia amarilla, de oblongo oblanceoladas a lanceoladas o bien angostamente obovadas, de 3-16cm de largo por 1.2-5cm de ancho, ápice agudo y base cordada o redondeada, enteras, sinuoso dentadas o toscamente aserradas hacia el ápice, márgenes gruesos y revolutos; cuando presentan dientes, 3-5 a cada lado, con una punta endurecida o mucrón, haz verde oscuro, ligeramente brillante, con pubescencia estrellada persistente, rugosa, envés claro con abundantes pelos, de 6-10 pares de nervios laterales; peciolos tomentosos de 2-7mm de largo, fruto anual solitario o en grupos de 2 o 3 sobre un grueso pedúnculo tomentoso, involucre hemisférico

y profundo de 17-20mm de diámetro por 10-12mm de alto, bellota ovoide de 15mm de largo por 15mm de ancho.

Distribución en Michoacán; se restringe casi exclusivamente a la Depresión del Río Lerma, acentuándose más en la parte central, sur y este; también en la parte norte del Tancítaro, suroeste de Villa Madero y noroeste de la Cordillera Neo volcánica. En México: Distrito Federal (Desierto de los Leones), Guanajuato, Hidalgo, Jalisco y Querétaro.

Habitad; ladera de cerros, terrenos planos, suelos someros, pedregosos, con basalto, arcillosos o limo-arcillosos; se mezcla con especies de encino o bien con elementos propios del matorral subtropical. Se distribuye entre los 2 000 – 2 300m.

Nombre común; encino colorado, tocuz, encino de hoja ancha, encino prieto, palo chino, encino chino y encino blanco.

Uso regional; leña, carbón, postes para cerca, arados, cabos para herramienta y horcones.

### ***Quercus laeta* Liebm.**

Árbol o arbusto de 2-10m de alto, diámetro de 12-45cm; ramillas de 4-6mm de grueso, color de café rojizo a café grisáceo, cuando jóvenes con abundante tomento amarillo, abundantes lenticelas de color amarillo pálido; yemas de 2-3mm de largo, ovoides y obtusas; estipulas de 1.5-3mm de largo, pilosas; hojas jóvenes verdes amarillentas o rojizas, con suave pubescencia estrellada, envés de la hoja con abundante tomento amarillo y con pelos glandulares en el nervio central; hojas maduras rígidas y coriáceas, de color verde claro a verde oscuro, lanceoladas, oblanceoladas o obovadas, de 3-15cm de largo por 1-6cm de ancho, ápice redondeada, márgenes revolutos o enteros, generalmente de 2-11 dientes cortos, mucronados, de la mitad hacia arriba de la hoja, haz verde y lustroso, envés con abundante pubescencia amarilla y pelos enrollados, de 7-12 nervios laterales a cada lado; peciolo de 2-10mm de largo, pubescentes, fruto anual, solitario o en pares, involucro hemisférico de 12-15mm de diámetro con escamas delgadas y canescentes, bellota ovoide de 12-18mm de largo.

Distribución; a lo largo de la Depresión del Río Lerma, especialmente al norte y este; parte central, este y oeste de la Cordillera Neo volcánica. En México; Aguascalientes, Coahuila, Distrito Federal (Desierto de los Leones), Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Nayarit, Nuevo León, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa y Zacatecas.

Habitad; laderas de cerro, praderas suelos someros, pedregosos o rocosos, basálticos, en bosques de encino o bien en transición con el matorral subtropical. Se distribuye entre 2 000 – 2 300m. Nombres comunes; encino blanco, encino chino, palo chino y charari. Uso regional; leña, carbón, postes para cerca, cabos para herramientas y horcones.

### **Capítulo 3. Relaciones alométricas de tres especies de encino**

#### **Introducción**

Las relaciones alométricas o alometría se refiere a los cambios de dimensión relativa de las partes corporales correlacionadas con el tamaño total. La alometría es muy importante dentro del ámbito forestal ya que ayuda a evaluar los cambios de la dimensión relativa de las partes de un árbol con respecto al tamaño total del mismo.

La estimación de biomasa en árboles es útil para evaluar la condición y estructura del bosque, así como para implementar estrategias de explotación sustentable. Las ecuaciones de predicción de biomasa han sido desarrolladas principalmente para especies de bosque templado. Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997) reportaron una lista de 66 ecuaciones para especies de bosques templados de Norteamérica.

Las relaciones alométricas que se calculan con más frecuencia son las que sirven para estimar la biomasa aérea total y el área foliar a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP) usando el método destructivo directo (Grier y Waring, 1974; Geron y Ruark, 1988; Chapman y Gower, 1991; Castellanos *et al.*, 1996, Brown *et al.*, 1989).

La gran mayoría de las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea total y el área foliar se han desarrollado en especies forestales de clima templado, bosque mesófilo y bosque tropical seco de México (Grier y Waring, 1974; Geron y Ruark, 1988; Chapman y Gower, 1991; Castellanos *et al.*, 1996).

#### **Alometría de encinos en México**

Se realizó una recopilación bibliográfica de estudios sobre encinos mexicanos (Tabla 8; Anexo I) en los que se han realizado ecuaciones alométricas para *Q. lacely*, *Q. cambyi*, *Q. rysophylla* (Rodríguez *et al.*, 2007), *Q. spp* (Ayala, 1998), *Q. peduncularis* (Costa-Mireles, 2000), *Q. rugosa* Neé, *Q. sideroxylla* Humb. & Bonpl, *Q. spp* (Navar, 2009). Sin embargo, hasta donde sabemos no existen estimaciones alométricas para especies arbóreas de encinos rebrotados.

Estas ecuaciones generadas no se pueden aplicar directamente a otras especies ya que se construyeron mediante un modelo que se calculó a partir de árboles provenientes de semilla, cuya arquitectura difiere de un individuo con crecimiento vegetativo o “rebrotado” (Figura 1). Esta diferencia en la forma de crecimiento determina que la distribución

espacial de la biomasa adquiriendo un patrón determinado, conocido como arquitectura del árbol. En consecuencia, las ecuaciones obtenidas de árboles nacidos de semilla no son adecuadas para usarse en rebrotes cuya biomasa proviene de regeneración vegetativa. La propagación vegetativa es una estrategia frecuente en los encinos, por lo que los estudios de alometría deberían tomarlo en consideración.



Figura 1. Arquitectura de encinos nacidos de semilla vs rebrotados

En la Cuenca del Lago de Cuitzeo, los encinos se emplean fundamentalmente para la elaboración de carbón vegetal de manera tradicional. Esta práctica se realiza cortando todo el bosque o el fragmento de encinar a mata rasa. Las especies más usadas son *Quercus castanea* Neé, *Q. laeta* Liemb y *Q. deserticola* Trel, debido a que estas especies tienen una gran capacidad de regeneración vegetativa. Estas tres especies son las más abundantes dentro de la Cuenca, siendo *Q. castanea* la de mayor abundancia.

No se encontraron estudios para dichas especies y menos aún que se hayan concentrado en árboles de rebrote. En general los estudios reportan ecuaciones para árboles maduros en bosques primarios o manejados, lo cual no es de utilidad para el caso de la cuenca.

Calcular las ecuaciones alométricas de estas especies distribuidas ampliamente dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, constituye una herramienta importante para evaluar la asignación de la biomasa a diversas partes del árbol (fuste, follaje, etc). Las ecuaciones además son útiles para construir modelos mecánicos de crecimiento forestal (Causton, 1985).

## Objetivos

El objetivo de este trabajo fue calcular las relaciones alométricas de árboles rebrotados de las tres especies de encino más abundantes en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

## Materiales y métodos

Los árboles empleados en este estudio, fueron obtenidos de un predio bajo aprovechamiento en el Ejido El Fresno, ubicado al noreste de la población de Tiristarán, municipio de Morelia, Michoacán. Se encuentra localizado entre las coordenadas 19° 45' 01.14'' N y 101° 21' 12.69'' W, a una altitud de 2184 msnm.

Se estableció una relación laboral con el Sr. Mauro Zamudio, persona dedicada a la elaboración de carbón en la zona, quien nos permitió medir y pesar los árboles que derribaría para después utilizarlos en la elaboración de carbón.

Se seleccionaron 180 árboles de *Quercus*, los cuales estaban destinados para ser aprovechados en la elaboración de hornos para carbón. Una vez derribado, a cada rebrote seleccionado se le midió el perímetro a la altura del pecho (PAP) y la altura total, para después ser seccionados en clases diamétricas. La biomasa de cada rebrote se seleccionó en madera útil para carbón, ramillas delgadas y hojas. Se pesó cada una de las secciones con una balanza de 50 kg para obtener así la biomasa total de cada rebrote (Figura 2). Del total de rebrotes, 115 fueron de *Q. castanea* (rango de PAP de 3.81 cm a 26.6 cm), 50 de *Q. deserticola* (rango de PAP de 5.25 cm a 20.1 cm) y 17 de *Q. laeta* (rango de PAP de 5.57 cm a 46.5 cm).

## Estimación de la biomasa seca

Con la finalidad de determinar la relación peso seco (peso fresco del tronco y de la copa a diferentes alturas y calcular la biomasa total de cada rebrote), se colectaron 27 rodajas para cada especie, en tres diferentes clases diamétricas (0-30, 30-60, >60 cm) y a tres diferentes alturas (a la base, 1.30 m y a 2.30 m). Las rodajas fueron colectadas con corteza ya que esta no se remueve al momento de la elaboración de carbón. Las rodajas fueron cortadas entre 5 y 10 cm de grosor, estas se pesaron justo después de ser cortadas en

el campo. Esto para calcular el peso fresco, las muestras se envolvieron en plástico y se refrigeraron a 10 °C.



Figura 2. Procedimiento para obtención de datos alométricos.

### Trabajo de laboratorio

Para obtener el peso total del material se les determinó la humedad a las muestras en una estufa de secado a 75° C hasta peso constante. Después se procedió a pesar todas las muestras con una báscula gravimétrica de 3 kg. +/- 1 g, para obtener los pesos con mayor precisión.

La relación peso seco: peso fresco del conjunto de rodajas para cada clase diamétrica permitió calcular el peso seco de la biomasa de los rebrotes para cada especie y cada categoría de tamaño a partir de su respectivo peso fresco. Se categorizaron los árboles derribados por especie y en función de su clase diamétrica. Esto porque del conjunto de rodajas para cada clase diamétrica se obtuvo un promedio del contenido de humedad el cual fue aplicado a su especie y a su clase diamétrica a la que pertenecía. La suma del peso seco de las secciones del tronco constituyó la biomasa total para cada rebrote.

### Análisis

Los datos obtenidos en campo fueron ordenados para su procesamiento las variables de especie, perímetro del rebrote a la altura del pecho en (cm), altura total del rebrote (m), altura/PAP fuste comercial (m/cm), peso madera fresca para carbón (KgMF), peso fresco

de desechos (KgMF), peso fresco total del rebrote (KgMF), peso de madera seca para carbón (KgMS), peso seco de desechos (KgMS) y peso seco total del rebrote (KgMS).

El método utilizado para desarrollar las relaciones alométricas fue destructivo aprovechando el derribo de rebrotes que se utilizarían para la elaboración de carbón. Cada individuo fue seccionado en madera útil para carbón (casi todo el rebrote) y residuos (follaje y ramas pequeñas). El follaje es utilizado para cubrir los hornos y sólo se descartan las ramillas pequeñas. La proporción de biomasa total y la madera seca para carbón fueron calculadas como porcentaje.

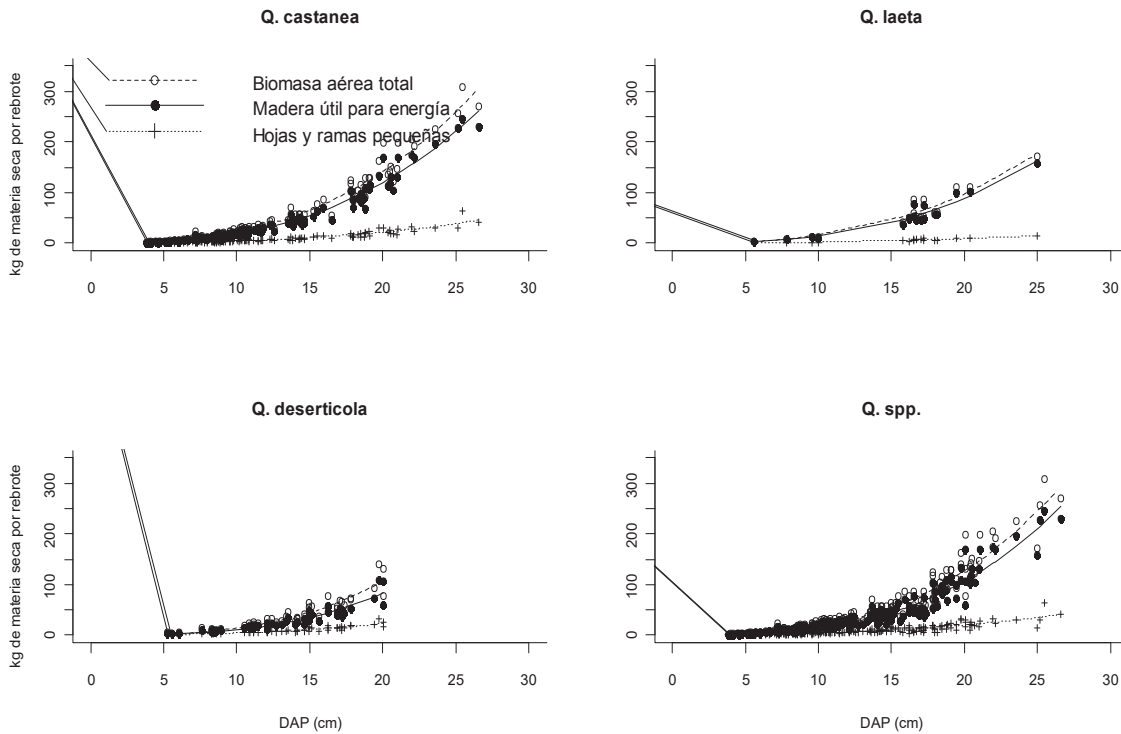
Las regresiones fueron calculadas por especie para: a) madera útil para carbón en peso seco y volumen; b) biomasa total en peso seco y volumen; y c) follaje y ramas pequeñas en peso seco y volumen como una función de DAP de cada rebrote individual. También se desarrolló una ecuación para las tres especies juntas, que se identificará como *Q. spp.* Las regresiones no lineales fueron aplicadas usando los parámetros típicos para ecuaciones alométricas  $y = a(DAP)^b$ , usando la variable de medición más utilizada para estudios forestales (DAP) (TerMikaelian y Korzukhin, 1997). Sin embargo, las regresiones no lineales no requieren un factor de corrección para hacer transformaciones a logaritmos, cuando se convierten los valores estimados de las ecuaciones logarítmicas a las unidades originales no transformadas (Meyer, 1941; Baskerville, 1972). La altura de los rebrotes no fue considerada como una variable predictiva de incremento, ya que ésta podría estimar más del 5% (Freedman *et al.*, 1982; TerMikaelian y Korzukhin, 1997).

Para cada modelo de regresión se obtuvo el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y se revisaron los residuales. Todos los análisis fueron implementados con el software estadístico “R” (R Development Core Team 2007).

## Resultados

La estimación de los componentes de los árboles individuales: biomasa útil para la elaboración de carbón (MSC) y biomasa total (BT) expresada en una función del DAP en la forma  $y = a(DAP)^b$  resultó en valores de  $R^2$  mayores al 92% con muy baja resistencia en relación positiva ( $p < 0.0001$ ). El follaje y las ramas pequeñas (residuos) con valores de  $R^2$  entre 78% y 89% ( $p < 0.0001$ ). La proporción de BT a MSC tuvo como resultado  $81 \pm 1\%$  (SE) para *Q. castanea*;  $89 \pm 1\%$ , *Q. laeta*; y  $74 \pm 1\%$  para *Q. deserticola* (Figura 3; Tabla 2).

La Figura 3.- muestra las regresiones de las especies de estudio donde se utilizó para construirlas las variables de madera útil para carbón (MSC), biomasa total (BT) y residuos (follaje y ramas pequeñas) de *Q. castanea*, *Q. laeta*, *Q. deserticola* y todas las especies juntas *Q. spp.*



Nota: Las ecuaciones son de la forma  $y = a(\text{DBH})^b$ . Parámetros de las ecuaciones, estimación de los errores estándar, coeficiente de determinación ( $pseudo-R^2$ ), y  $p$ -valores se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones alométricas y de volumen para rebrotes de encino.

	Componente de biomasa	kg madera seca				m <sup>3</sup>			
		a	b	S <sub>Y·X</sub>	R <sup>2</sup>	a	b	S <sub>Y·X</sub>	R <sup>2</sup>
<i>Q. castanea</i>	Madera útil para carbón vegetal	0.0324	2.7425	9.7	0.97	5.8E-05	2.6831	0.0143	0.97
	Residuos (follaje y ramas pequeñas)	0.0103	2.5551	3.3	0.89	1.6E-05	2.5550	0.0052	0.89
	Biomasa total	0.0416	2.7154	11.6	0.97	7.3E-05	2.6639	0.0174	0.97
<i>Q. laeta</i>	Madera útil para carbón vegetal	0.0256	2.7206	11.5	0.92	4.6E-05	2.7206	0.0209	0.92
	Residuos (follaje y ramas pequeñas)	0.0150	2.1318	1.7	0.80	2.6E-05	2.1318	0.0030	0.80
	Biomasa total	0.0333	2.6648	12.8	0.92	6.0E-05	2.6672	0.0231	0.92
<i>Q. deserticola</i>	Madera útil para carbón vegetal	0.0085	3.0667	8.6	0.87	1.5E-05	3.0667	0.0156	0.87
	Residuos (follaje y ramas pequeñas)	0.0101	2.5868	2.6	0.85	1.7E-05	2.5868	0.0045	0.85
	Biomasa total	0.0156	2.9458	10.7	0.88	2.7E-05	2.9519	0.0192	0.88
<i>Q. spp</i>	Madera útil para carbón vegetal	0.0120	3.0357	13.4	0.92	3.1E-05	2.8685	0.0170	0.94
	Residuos (follaje y ramas pequeñas)	0.0125	2.4628	4.1	0.78	2.4E-05	2.4001	0.0064	0.78
	Biomasa total	0.0187	2.9451	15.7	0.92	4.7E-05	2.7932	0.0203	0.94

Nota: las ecuaciones de forma  $y = a(DAP)^b$ , “y” en kg o m<sup>3</sup> por rebrote y el DAP en cm. Los parámetros de la ecuaciones **a** (coeficiente) y **b** (exponente) resueltas por los logaritmos cuadrados no lineales de Gauss-Newton (Hartley, 1961). Todos los exponentes difieren significativamente de 1 (p<0.0001). S<sub>Y·X</sub> es la raíz del cuadrado del error. El error estándar de la estimación (SEE), en kg o m<sup>3</sup>; correspondiendo a la desviación estándar del error residual, los cuales son la raíz cuadrada de media del cuadrado del error ( $\sqrt{MSE}$ ). Las siglas MSE es la proporción de la suma de cuadrados de los errores (SSE) y los grados de libertad del error. *Pseudo-R<sup>2</sup>* es una regresión no lineal que relaciona al coeficiente de determinación ( $R^2$ ) la regresión lineal fue calculada como 1- (la suma de los errores cuadrados (SSE) / suma total de los cuadrados (SST<sub>correcta</sub>)).

## Discusión

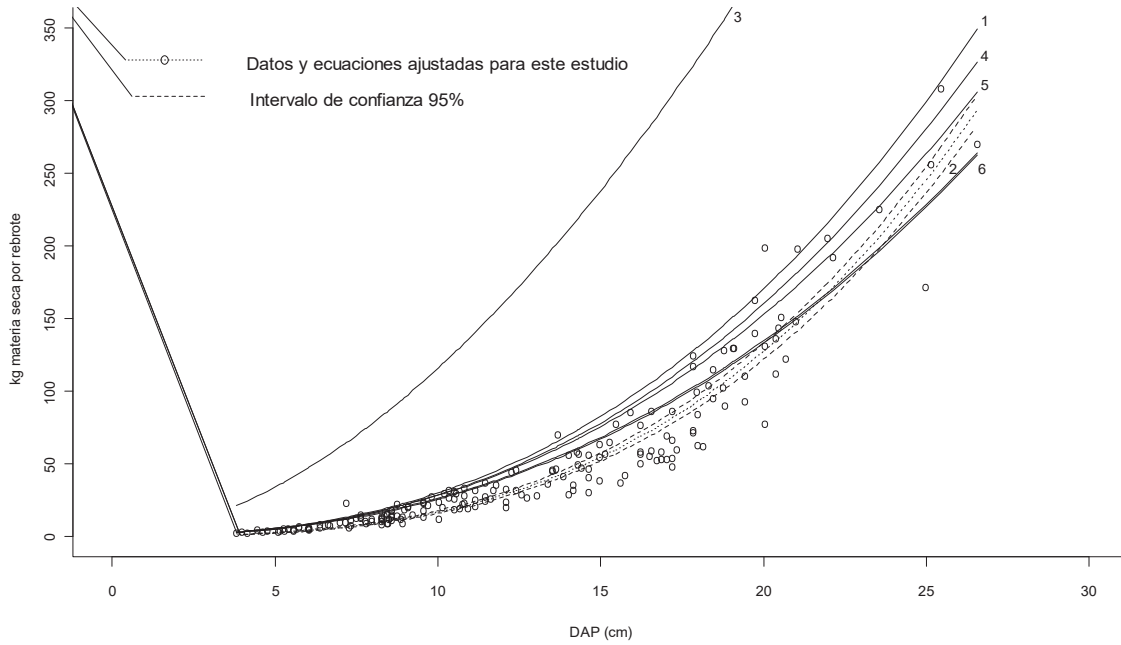
El objetivo de este estudio fue desarrollar ecuaciones alométricas para encinos rebrotados, ya que su arquitectura difiere mucho de la de los encinos provenientes de semilla. Las ecuaciones reportadas en la literatura para predecir biomasa total de encinos mexicanos fueron comparadas con las construidas en este estudio para observar las diferencias en la predicción de biomasa.

El DAP fue un buen estimador para predecir la madera útil para carbón y la biomasa total en rebrotes de encino manejados. El parámetro altura no fue considerado necesario como otro posible estimador de biomasa. La baja correlación entre los residuos (i.e. follaje y ramas pequeñas) útiles para carbón y el DAP puede deberse a la diferencia entre las coberturas de los árboles. Las diferencias en proporción de biomasa total y madera útil para carbón entre especies se deben a las diferentes arquitecturas que tienen los rebrotes. *Q. laeta* y *Q. castanea* generalmente crecen de una forma bien conformada y con fustes rectos, por ello la mayor parte del rebrote es usado en la elaboración de los hornos para carbón. Sin embargo, *Q. deserticola* tiene un desarrollo de fuste demasiado irregular y muchas bifurcaciones, que hacen que las ramas y el fuste no crezcan rectos. Por ello no la hace muy útil para la elaboración de hornos ya que dificulta mucho el acomodo de la madera.

Las ecuaciones alométricas reportadas en la literatura sobreestiman la biomasa total para encinos rebrotados (Figura 4; Tabla 3). Esto puede deberse al hecho de que el crecimiento de estos árboles en campos abiertos hace que desarrollen grandes copas al igual que DAP (Johnson *et al.*, 2002), caso contrario con el crecimiento en los rebrotes ya que los espacios se ven reducidos por la competencia entre ellos. En otras palabras, la reducción de espacios hace que se vea afectado el crecimiento en las copas al igual que en el DAP. Así mismo esto puede hacer que los parámetros de las ecuaciones se alteren.

Las ecuaciones 2 y 6 estiman los rebrotes pequeños (DAP<20cm) y sobrestiman los mayores (DAP>20cm). Sin embargo, esas dos ecuaciones junto con la 4 y 5 muestran sesgos sistemáticos para sobreestimar “y” (biomasa total). Ninguna de ellas fue correcta con la transformación a unidades naturales. La ecuación 3 se muestra muy poco representativa para alometría de encinos. Todas las ecuaciones reportan rangos de DAP similares o incluso mayores a nuestro estudio, lo cual permite hacer la comparación. En un estudio previo (Harrington y Fownes 1993), no encontraron diferencias en la comparación de árboles de rebrote y plantaciones individuales por semilla de *Acacia auriculiformis*, *Eucalyptus camaldulencis*, *Gliricidia sepium* y *Leucaena diversifolia*. La comparación con nuestros resultados son diferentes debido a que son diferentes especies y ellos en sus muestras incluyeron sólo rebrotes jóvenes de 18 meses.

Figura 4. Comparación de ecuaciones reportadas en la literatura para predecir biomasa total en encinos mexicanos.



Nota: ver la tabla 3 que muestra los detalles de las ecuaciones reportadas en la literatura (1 a 6).

Tabla 3. Ecuaciones alométricas para encinos mexicanos de la literatura

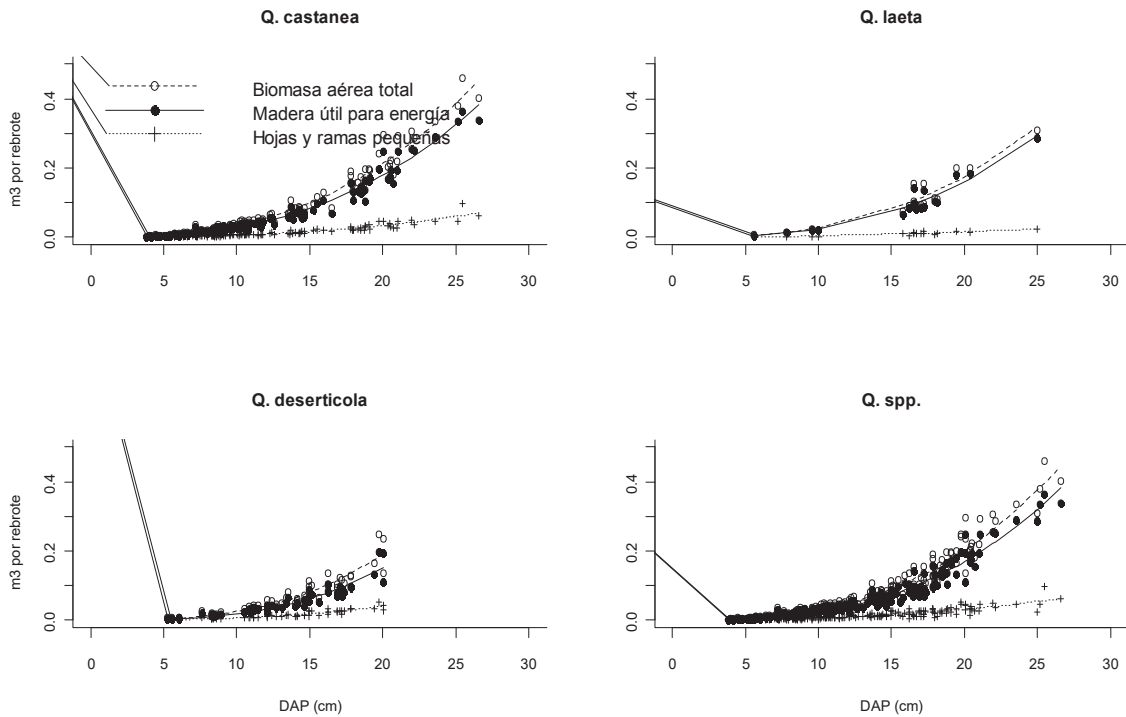
Nº	Especies	a	b		N	Rango DAP	Método*	Región	Coordenadas aproximadas	Referencia
				kg de madera seca		Cm				
1	<i>Q. spp</i>	0.0890	2.5226	3,875	118	7.3 - 63.5	pwr	Bosques de Pino-Encino en la Sierra Madre Occidental en el norte de Mexico; Estados de Chihuahua, Durango y Sinaloa	27°N 108°W	Návar, 2009
2	<i>Q. peduncularis</i>	0.1033	2.3900	2,230	8	3.4 - 22.6	ln	Bosques de encino en el sureste de Mexico; estado de Oaxaca	17°N 95°W	Acosta-Mireles et al., 2000
3	<i>Q. spp</i>	1.9100	1.7820	26,665	50	5.0 - 110.0	ln	Bosque de pino-encino en el sureste de Mexico; estado de Chiapas	17°N 92°W	Ayala, 1998
4	<i>Q. laceyi</i>	0.0877	2.5069	3,247	7	5.0 - 35.2	ln	Bosque de pino-encino de la Sierra Madre Oriental en el norte de Mexico; estado de Nuevo Leon	25°N 100°W	Rodríguez-Laguna et al., 2007
5	<i>Q. cambyi</i>	0.0991	2.4497	2,925	8	5.0 - 39.5	ln	<i>Idem</i>	<i>idem</i>	<i>idem</i>
6	<i>Q. rysophylla</i>	0.1098	2.3736	2,307	8	7.4 - 40.6	ln	<i>Idem</i>	<i>idem</i>	<i>idem</i>
7	<i>Q. spp</i>	0.0187	2.9451	1,853	185	3.8 - 26.6	pwr	Rebrotos en el centro de Mexico; estado de Michoacán	20°N 100°W	Este estudio
7b	<i>Q. spp</i>	0.0595	2.5189	1,990	185	3.8 - 26.6	ln	<i>Idem</i>	<i>idem</i>	<i>idem</i>

Notas: (†) es la suma absoluta de las diferencias entre las mediciones vs. valores de biomasa (i.e la raíz cuadrada de la sumas de los errores cuadrados ( $\sqrt{SEE}$ ) para cada ecuación (\*) pwr= análisis de regresiones no lineales seguidas de una ecuación usando DAP como predictor; ln= el análisis de regresiones lineales usando DAP como predictor. Los coeficientes de determinación  $R^2$  y l pseudo- $R^2$  no fueron incluidos en las otras (Kvalseth, 1985; Scott and Wild, 1991; Huang and Draper, 2003), Especies evaluadas 1) fueron: *Q. rugosa* n=15, *Q. sideroxylla* n=51 y *Q. spp.* n=52. Especies evaluadas (2) fueron: *Q. crassipes* n=7, *Q. segoviensis* n=2, *Q. crispipilis* n=11, *Q. laurina* n=17, *Q. rugosa*, n=7 and *Q. sp.* n=6.

El sitio y la especie son importantes cuando se quieren construir modelos específicos para estimar biomasa. Sin embargo, es importante cuantificarla dentro de ciertos límites, ya que si se aplicáran las ecuaciones de la literatura para estimar la biomasa en sitios de manejo se tendría un margen de error. De la comparación de ecuaciones (Figura 4) puede verse que después de un evento de corte, el crecimiento de los rebrotos requieren del desarrollo de ecuaciones específicas para cada tipo de manejo.

## Anexo I

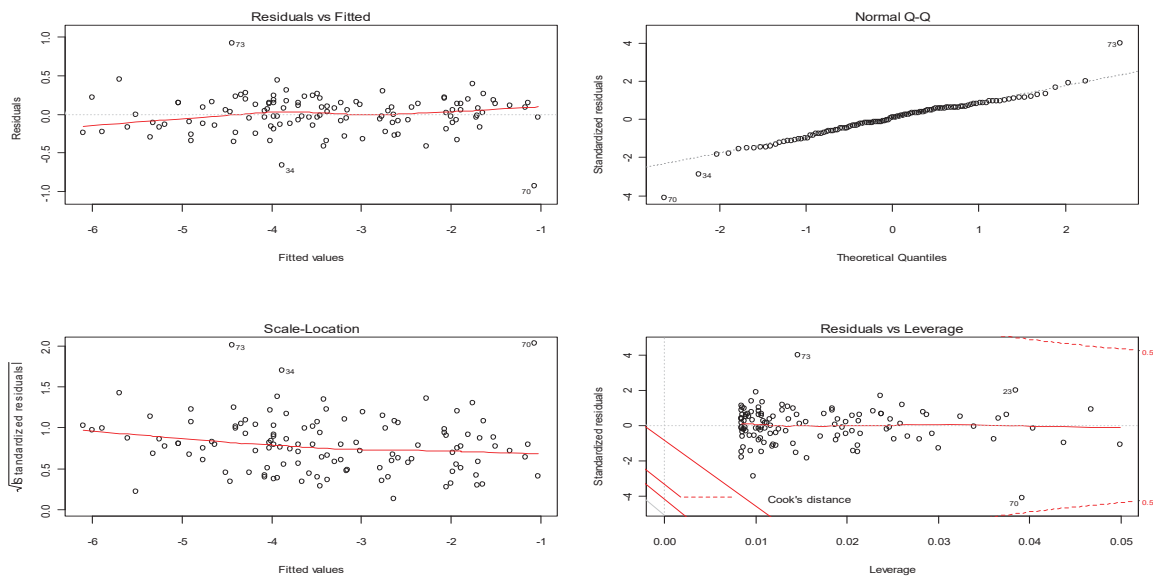
La Figura I.1 muestra las regresiones usando  $m^3$  para madera útil para carbón (MSC), biomasa total (BT) y residuos (follaje y ramas pequeñas) de *Q. castanea*, *Q. laeta*, *Q. deserticola* y todas las especies juntas (*Q. spp.*).



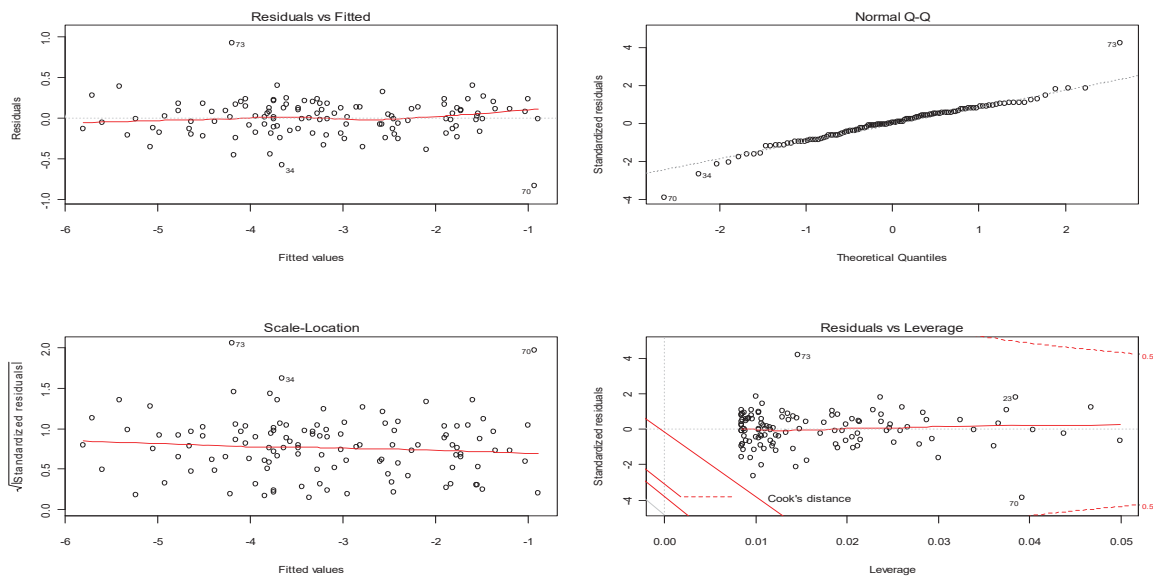
Nota: Las ecuaciones son de la forma  $= a(DBH)^b$ . Parámetros de las ecuaciones, estimación de los errores estándar, coeficiente de determinación ( $pseudo-R^2$ ), y  $p$ -valores se muestran en la Tabla 2.

## Anexo II. Gráficos de residuales

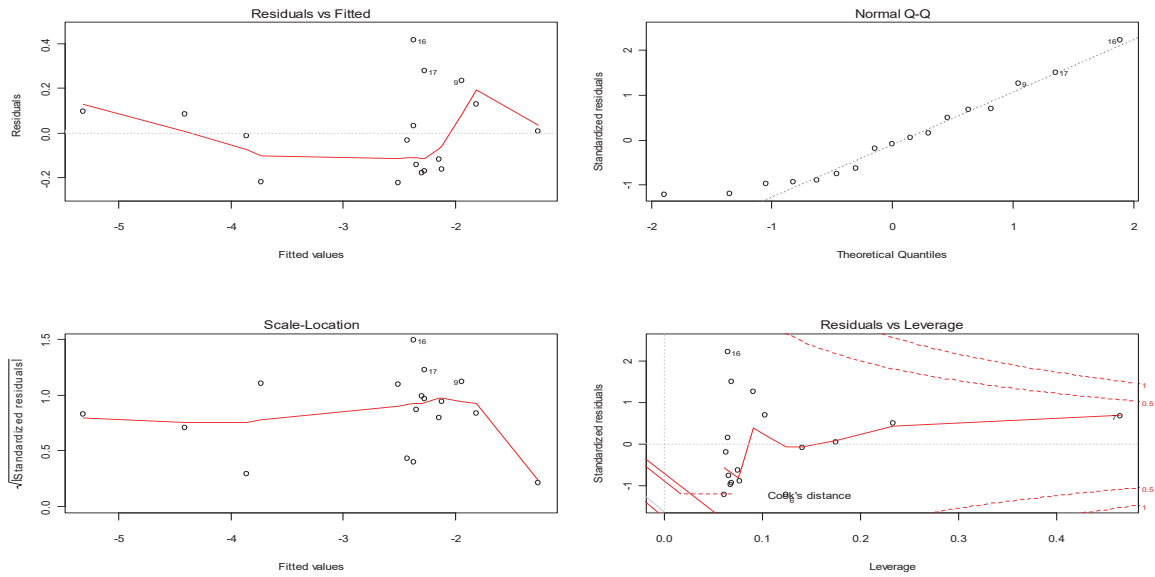
### Residuales para la regresión de madera útil para carbón de *Q. castanea*



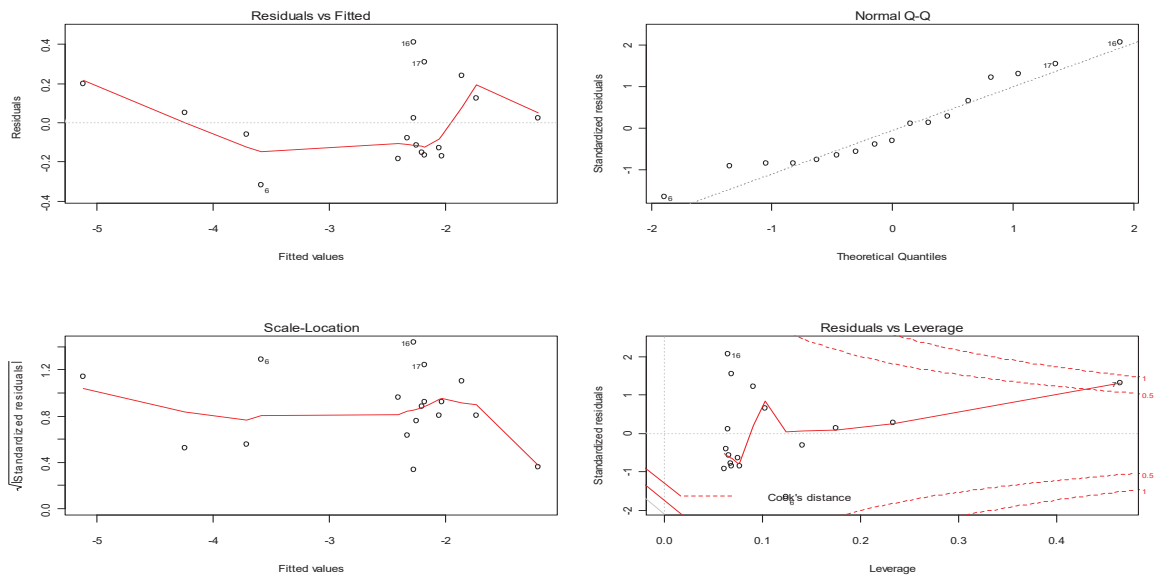
### Residuales para la regresión de biomasa total para *Q. castanea*



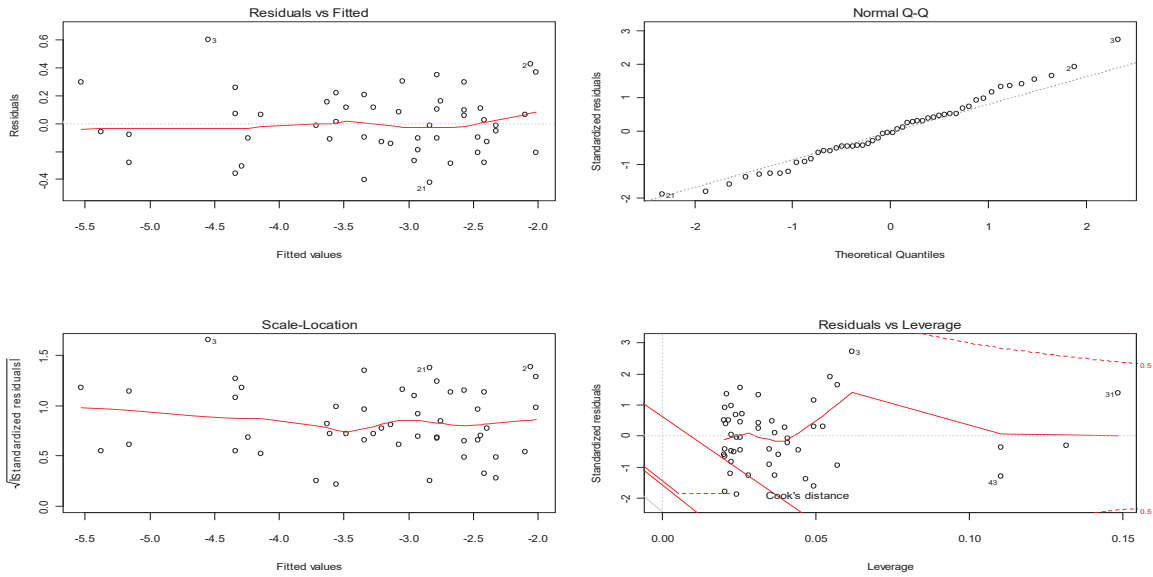
## Residuales para la regresión de madera útil para carbón de *Q. laeta*



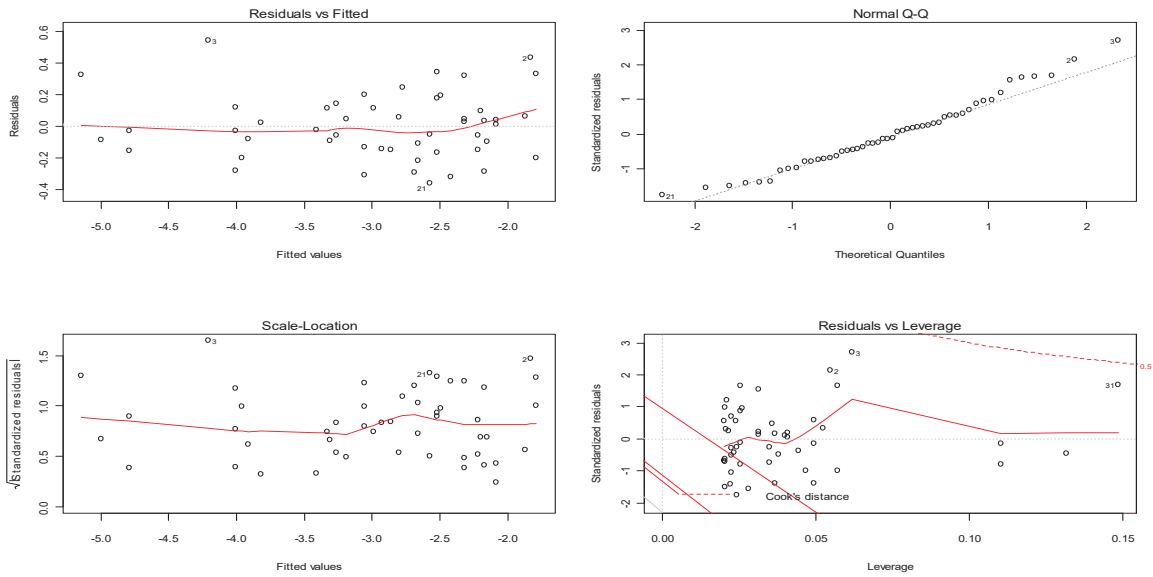
## Residuales para la regresión de biomasa total para *Q. laeta*



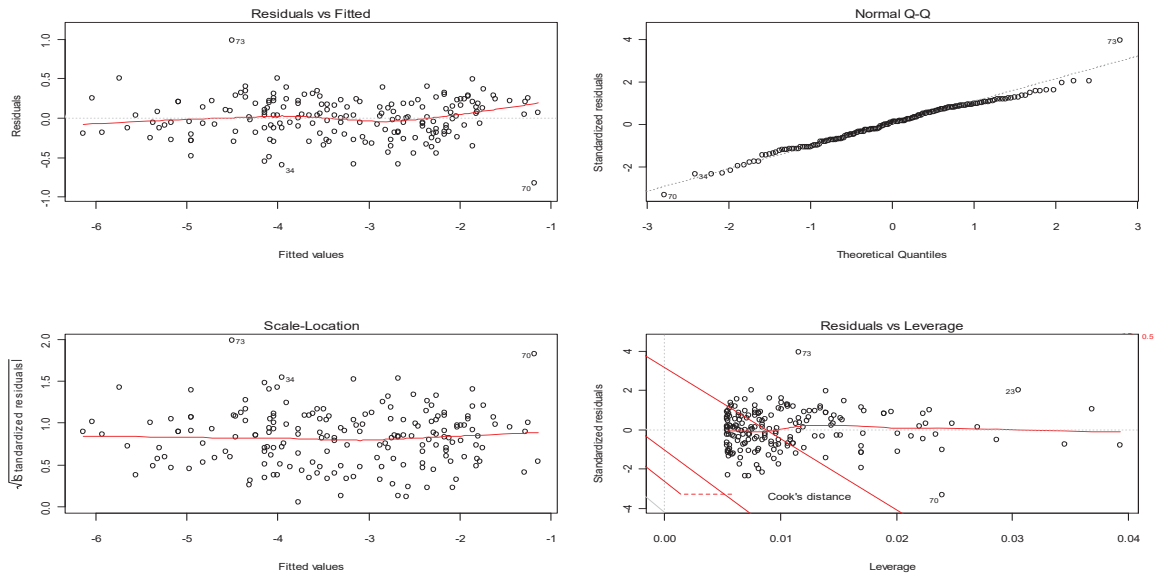
Residuales para la regresión de madera útil para carbón de *Q. deserticola*



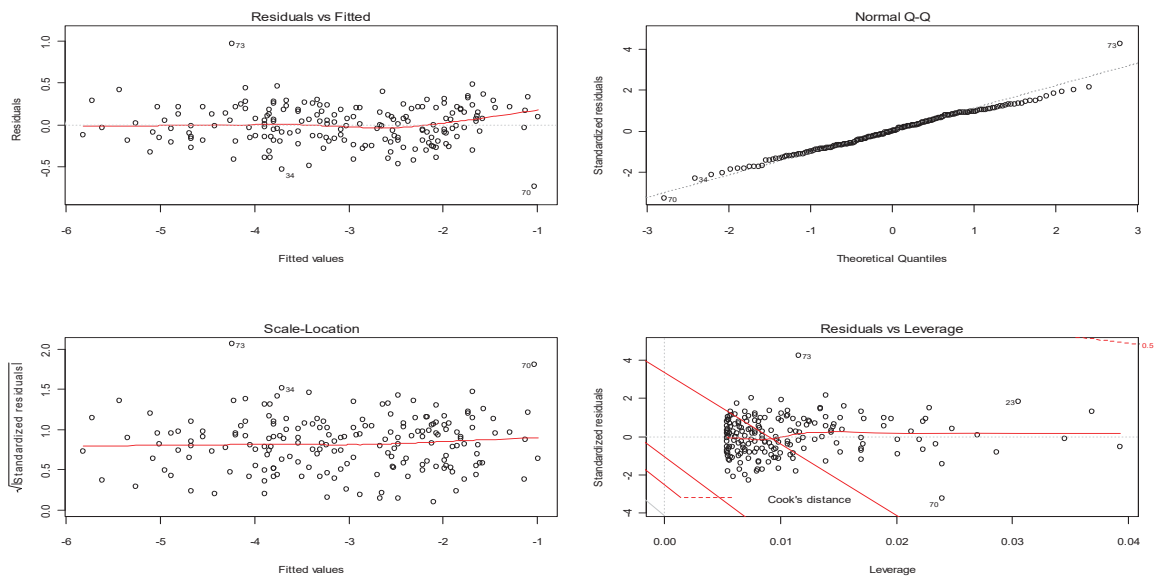
Residuales para la regresión de biomasa total para *Q. laeta*



Residuales para las regresiones de madera útil para carbón del conjunto de las tres especies *Q. castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola*.



Residuales para las regresiones de biomasa total del conjunto de las tres especies *Q. castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola*.



## **Capítulo 4. Evaluación del crecimiento de rebrotes de encino mediante una cronosecuencia.**

### **Introducción**

El manejo de ecosistemas se dirige por metas explícitas y se ejecuta por políticas, protocolos y prácticas. Este manejo debe estar fundamentado por investigación enfocada a entender las interacciones ecológicas y procesos dentro de un ecosistema (Christensen *et al.*, 1996).

La cuenca del lago de Cuitzeo tiene una gran superficie forestal en la que existe una gran riqueza de especies. En la cuenca se encuentran cerca de 14 especies de encinos, muchas de las cuales tienen reproducción vegetativa. Por lo tanto, la extracción de madera es una de las prácticas de manejo más difundida en la Cuenca.

Algunas de las especies distribuidas en la Cuenca son utilizadas principalmente para la elaboración de carbón vegetal, siendo las más utilizadas *Quercus castanea*, *Q. laeta* y *Q. deserticola*. En la actualidad esta práctica de extracción no es una actividad regulada puesto que no existen permisos emitidos por la Comisión Nacional Forestal; por lo tanto no existe información disponible al respecto. Por ello es importante conocer las tasas de crecimiento de los bosques de encino dentro de la Cuenca del lago de Cuitzeo.

### **Regeneración vegetativa y manejo de los encinos**

La regeneración de los sitios utilizados para la elaboración de carbón es principalmente vegetativa ya que los sitios se talan a ras por carboneros, por lo tanto no dejan árboles maduros para que haya regeneración por semilla.

Los requerimientos para la regeneración de los encinos varían entre especies, ya que difieren en la habilidad para producir semillas, germinar y tolerar diversas formas de estrés, como sequía y sombra (Larsen y Jonson, 1998).

En la mayoría de las especies de encino la regeneración vegetativa se presenta cuando la producción de bellotas es irregular, escasa o nula (Zavala, 2001). Sus sistemas radiculares permiten que los encinos sobrevivan después de que son cortadas las partes aéreas de la planta favoreciéndose el crecimiento de rebrotes. En la regeneración vegetativa

los rebrotes crecen más rápido en longitud que las plantas de regeneración por semilla de las mismas especies (Larsen y Jhonson, 1998).

Se sabe que tanto la humedad del suelo como la perturbación antropogénica influyen de una forma considerable en la dinámica del proceso de regeneración de rebrotes, ya que estos factores afectan la competencia entre especies (Larsen y Jhonson, 1998). Otros factores importantes en el manejo de rebrotes son el diámetro y la altura del corte del tocón, los cuales intervienen en el surgimiento de nuevos rebrotes (Khan y Tripathi, 1986).

Se tiene la experiencia en España del manejo de rebrotes para leña, donde los encinos fueron manejados de una forma intensiva mediante técnicas de poda y quema, obteniendo como resultado de esta práctica sitios abiertos con árboles de copas bien conformadas y con una alta producción de bellotas (Plieninger *et al.*, 2004). El caso contrario ocurre en Norteamérica, donde la práctica de aclareo ha sido el método silvícola exitoso y confiable para la regeneración de bosques de encino (Larsen y Johnson, 1998).

Finalmente, el empleo de estas técnicas silvícolas dependerá en gran medida de la dinámica de las poblaciones y de cada especie dentro de un ecosistema en particular. Generar información es importante para el desarrollo de modelos silvícolas predictivos para la regeneración de rebrotes de encinos (Larsen y Johnson, 1998).

### **Cronosecuencias**

El fundamento de construir una cronosecuencia para rebrotes de encinos consiste en encontrar sitios con edades diferentes, es decir, parcelas con distintas fechas de corte. Asumiendo que los sitios tienen las mismas condiciones, se esperaría que el crecimiento fuese igual; por lo tanto, se puede comparar la biomasa entre parcelas para estimar una tasa de crecimiento. Una de las ventajas de la cronosecuencia es que no es necesario estar tomando mediciones de biomasa año con año en los mismos sitios para calcular la tasa de incremento. La forma de datar los sitios se puede hacer mediante información recabada con informantes claves, tales como dueños de los predios, o por personas dedicadas a la actividad carbonera durante mucho tiempo, así como por evidencia de hornos dentro de los fragmentos. También se suelen utilizar imágenes de percepción remota.

## Objetivos

El propósito de este capítulo fue construir una cronosecuencia de rebrotes de encinos, mediante sitios utilizados para la elaboración de carbón vegetal en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

## Materiales y métodos

El fundamento de construir una cronosecuencia consiste en encontrar sitios que habían sido talados a mata rasa en años conocidos para reconstruir posteriormente la historia de crecimiento asumiendo que todos los sitios se comportan de manera similar. Era importante que desde el momento del corte al día de hoy no hubiesen sufrido perturbaciones significativas de origen antrópogenico (e.g. extracción de leña e incendios).

La ventaja de este método en contraposición a la medición de anillos de crecimiento es que incluye la mortalidad natural de los árboles, mientras que la medición de anillos sólo mide el crecimiento de aquellos árboles que siguen vivos. Las limitantes del método, en comparación con mediciones sucesivas de sitios permanentes, es justamente el supuesto que sitios con ubicaciones diferentes en el espacio se comportan de manera similar.

La productividad de rebrotes fue estimada para *Q. castanea* y *Q. laeta* por medio de una cronosecuencia que utiliza múltiples sitios, en los cuales se conoce la última fecha de corte para hacer carbón. Nosotros seleccionamos una serie de sitios con diferentes años pero con el mismo tipo de manejo. La cronosecuencia es útil para predecir atributos como área basal y está muy relacionada con la biomasa total (Pascarella *et al.*, 2004; Chazdon *et al.*, 2007), pero a su vez tiene la desventaja de otras variables que son más difíciles de predecir como riqueza de especies, densidad y composición (Sheil, 2001; Pascarella *et al.*, 2004; Chazdon *et al.*, 2007; Johnson y Miyanishi, 2008).

La cronosecuencia fue construida a partir de ocho sitios, los cuales tenían el mismo tipo de suelo (leptosol), topografía, exposición solar y el mismo historial de uso del suelo. Los sitios fueron lugares donde en algún momento se llevó a cabo la práctica de elaboración de carbón. La Figura 1 es un ejemplo del aspecto que tienen a nivel del suelo tres encinares en proceso de regeneración después de una tala rasa para la producción de carbón vegetal en la Cuenca de Cuitzeo.



Fragmento de 5 años

Fragmento de 10 años

Fragmento de 20 años

Figura 1. Ejemplo de sitios con diferentes edades después de una tala rasa.

### Características de los sitios

Se eligieron parcelas que fueron taladas a ras para la elaboración tradicional de carbón en un rango de tiempo conocido estableciendo rangos de edades entre sitios de 11-15, 16-34 y de 35-60 años, como se muestran en la Figura 2. Podemos apreciar en la imagen como se ve la conformación del bosque con respecto al tiempo de cosecha.

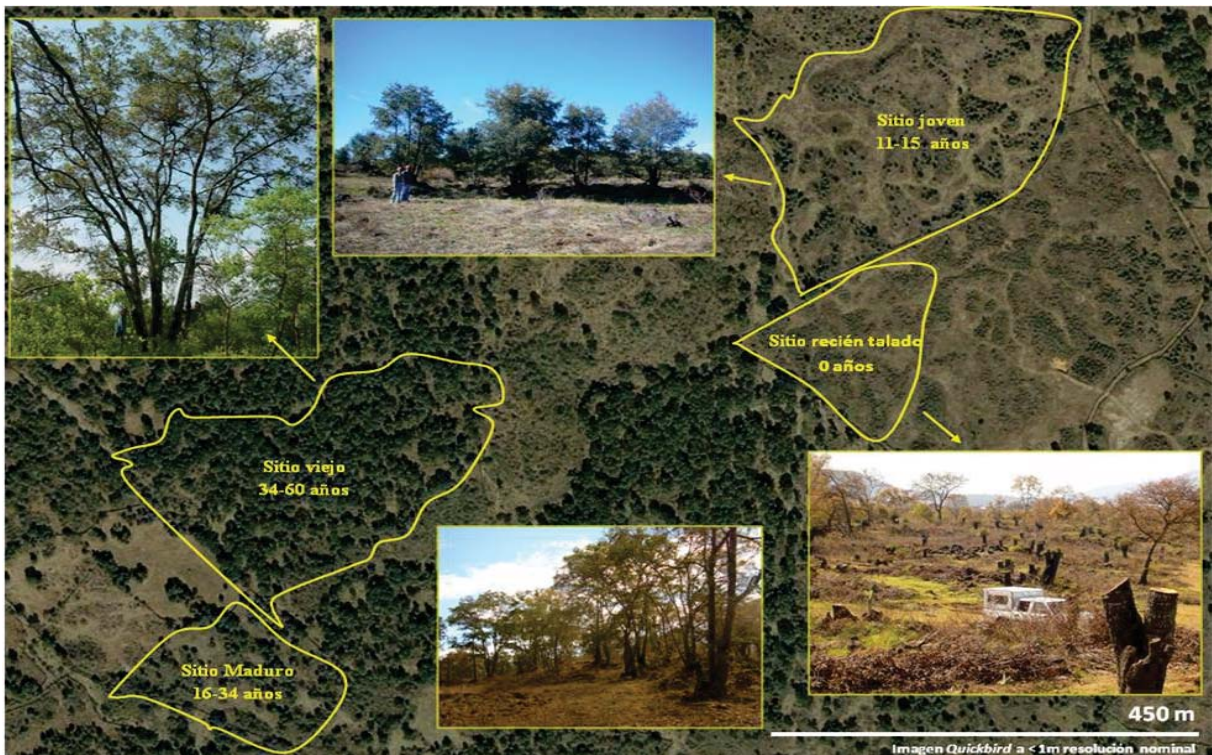


Figura 2. Mosaicos de sitios y coberturas según el tiempo de cosecha.

En la Figura 2 se observan los diferentes escenarios con los que se trabajó para armar la cronosecuencia y se ve como está la estratificación.

Se ubicaron en la zona ocho sitios carboneros con distinta fecha de perturbación como se muestran en la Tabla 1. Los sitios se ubicaron a partir del último evento de corte y se trató de homogenizarlos de forma que no hubieran sufrido ninguna perturbación de origen antropogénica (e.g., extracción de leña e incendios).

Se usaron estas categorías debido a que sólo se contaban con herramientas para poder datar sitios de no más de 60 años y no para sitios mucho más viejos, aunque sabemos que la actividad carbonera en la zona lleva muchísimo tiempo. La Figura 3 muestra como quedaron distribuidos los sitios dentro de la zona de estudio.

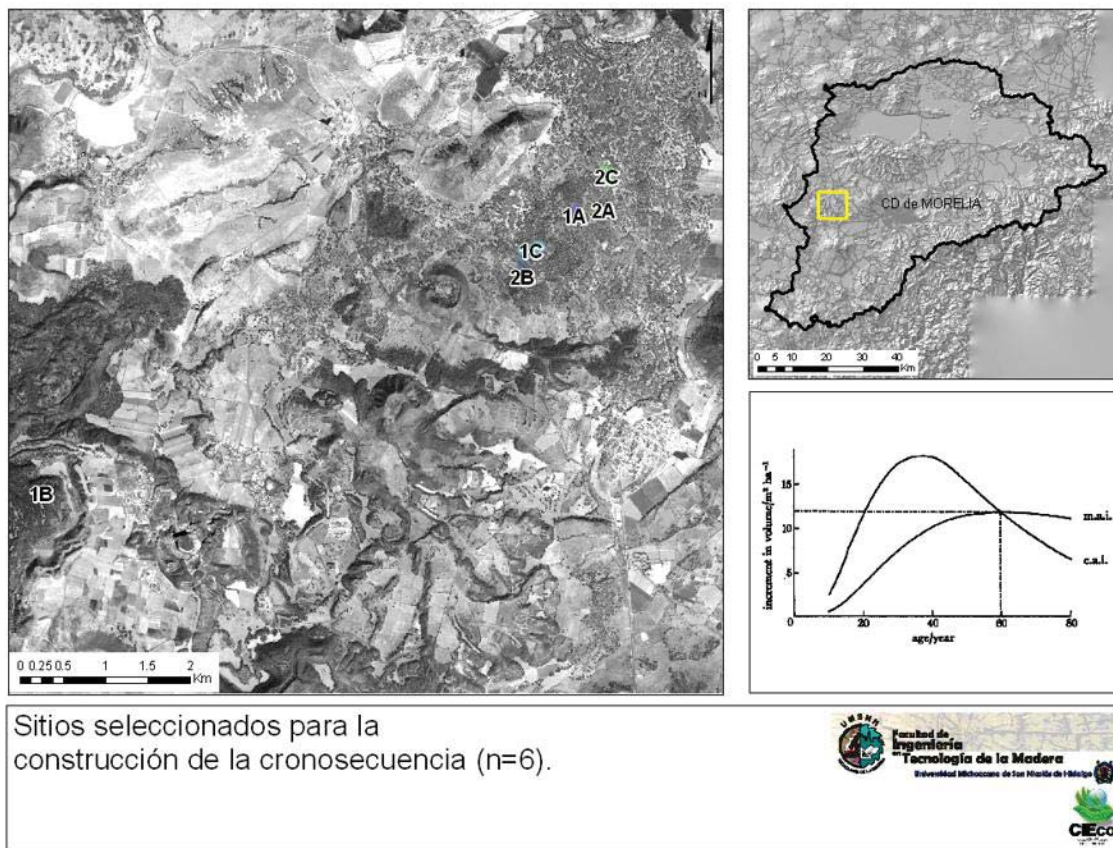


Figura 3. Selección de sitios.

## Validación de sitios

La datación de la última perturbación que sufrieron los sitios se realizó mediante la información recabada a través de informantes claves tales como los dueños de los predios, o por personas dedicadas la actividad carbonera durante mucho tiempo, así como por evidencia de hornos dentro de los fragmentos. También se realizaron evaluaciones visuales de la estructura de la vegetación, pues los bosques de encino manejados para la elaboración de carbón muestran una morfología típica de rebrotes después de haber sufrido un evento de corte, con rebrotes emergiendo del tocón o del sistema radicular. Las imágenes de percepción remota de los años 1975, 1986, 1996, 2000, 2003 (Landsat a 30m), 2005 (Spot a 5m) y 2006-2009 (Quickbird a 70cm) nos sirvieron para corroborar las fechas de disturbio en los diferentes sitios (Figura 4).

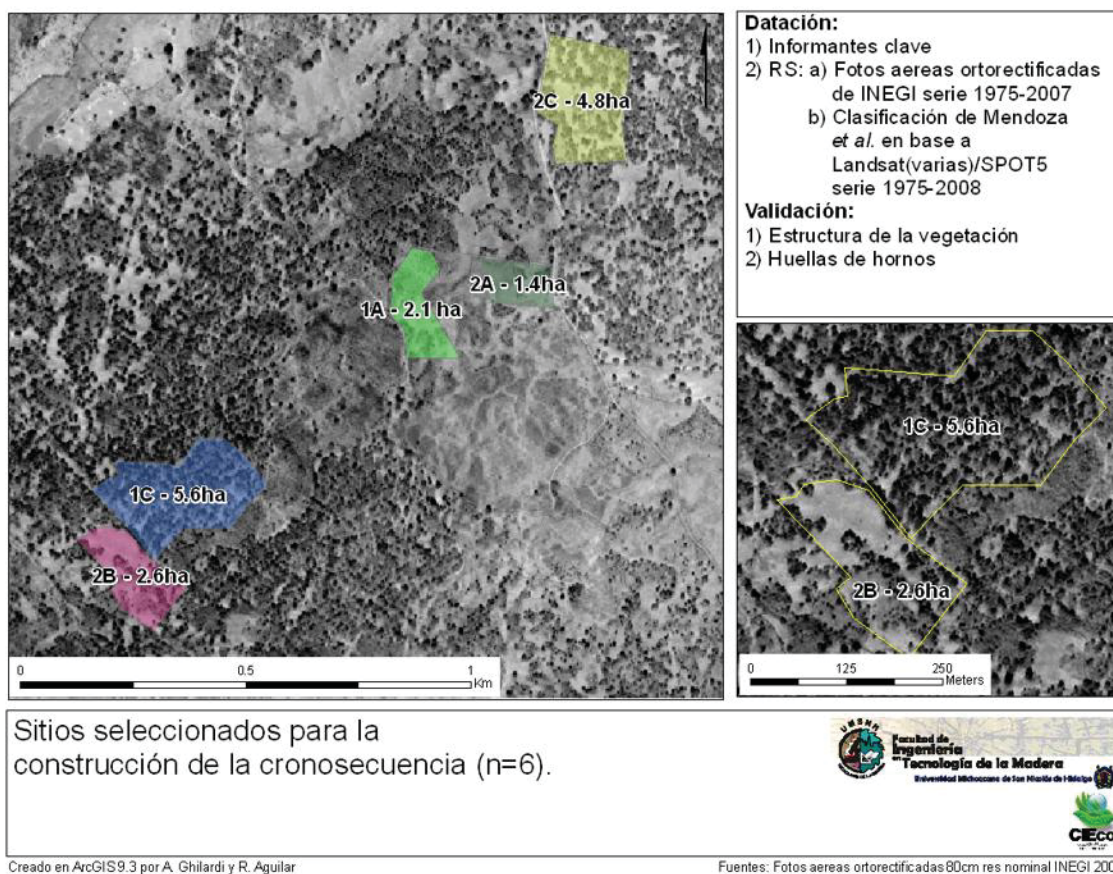


Figura 4. Validación de sitios.

Se levantaron los ocho sitios tomando datos de especie, altura de tocón (cm), perímetro a la altura del pecho (Pap) del tocón (cm) cuando este era visible y el Pap de

rebrote (cm). Se definieron áreas en los sitios donde había tenido lugar la producción de carbón, incluyendo áreas desnudas, pastizales y mosaicos de vegetación donde se encontraban fragmentos de encinares. Se excluyeron árboles no manejados porque tienen arquitectura diferente a la de los árboles rebrotados. Usando las ecuaciones alométricas previamente desarrolladas, se calculó para cada sitio la biomasa total y la madera útil para la elaboración de carbón, en términos de madera seca y volumen.

Tabla 1. Principales características de los sitios para la construcción de la cronosecuencia

<i>Q. castanea</i>											
Sitio N°	Edad (RS)* años	Edad (intervalo)* años	Edad cronosecuencia* años	Rebrotos n	Racimos n	Rebrotos / tocones Proporción	Area† ha	Rebrotos n ha <sup>-1</sup>	Tocones n ha <sup>-1</sup>	Rango DAP cm	
1	11-14	11	11	830	277	3	1.4	597	199	2.1 - 20	
2	11-14	14	14	600	179	3.4	1.4	444	133	3 - 27	
3	16-34	17	17	129	50	2.6	2.8	47	18	2.9 - 20	
4	16-34	23-24	24	391	92	4.3	1.3	296	70	3.2 - 28	
5	16-34	20-30	25	119	42	2.8	2.6	47	16	3.8 - 27	
6	>36	35-40	38	298	102	2.9	5.2	58	20	4.6 - 40	
7	>36	35-40	38	214	86	2.5	2.6	83	33	3.8 - 41	
8	>36	40-45	43	544	270	2	2.9	190	94	4.5 - 44	

<i>Q. laeta</i>											
Sitio N°	Edad(RS)* años	Edad (intervalo)* años	Edad cronosecuencia* años	Rebrotos n	Racimos n	Rebrotos / tocones Proporción	Area† ha	Rebrotos n ha <sup>-1</sup>	Tocones n ha <sup>-1</sup>	Rango DAP cm	
1	11-14	11	11	26	10	2.6	1.4	19	7	3.8 - 15	
2	11-14	14	14	45	16	2.8	1.4	33	12	3.2 - 19	
3	16-34	17	17	85	34	2.5	2.8	31	12	2.8 - 21	
4	16-34	23-24	24	29	9	3.2	1.3	22	7	3.5 - 21	
5	16-34	20-30	25	17	6	2.8	2.6	7	2	5.6 - 25	
6	>36	35-40	38	20	5	4	5.2	4	1	12 - 26	
7	>36	35-40	38	79	25	3.2	2.6	31	10	3.6 - 34	
8‡	>36	40-45	43	--	--	--	2.9	--	--	-- - --	

Nota: (\*) las parcelas y la edad de los rebrotos, están definidos al momento de que emergen los rebrotos después de sufrir el disturbio. RS= la datación de los sitios se hizo usando técnicas de sesión remota; intervalo = la datación de los sitios se hizo mediante entrevistas con los dueños de los predio y con viejos carboneros. La cronosecuencia es el rango de edad de las entrevistas y la valida dación con RS. Cuando las entrevistas de los sitios no coincidían con lo validado por RS estos fueron descartados. (†) Los sitios fueron representados por polígonos donde se llevo acabo la producción de carbón, incluyendo áreas de pastizales o parches de bosques de encinas. La densidad de los rebrotos dependió más de la proporción de los fragmentos

de encinares vs. la edad de otros sitios donde había pastizales que quedaban dentro del polígono de producción de carbón.

La relación entre la edad del sitio evaluada en años y su cantidad de biomasa ( $y$ ) se representó con la ecuación  $y = a + edad \times b_{sp}$ . Se desarrollaron modelos para *Q. castanea* y para *Q. laeta* ya que fueron las especies que estuvieron presentes en la mayoría de los sitios. La biomasa se evaluó como madera útil para elaboración de carbón y como biomasa total. En ambos casos, los análisis se hicieron tanto en peso seco (kg) y en volumen ( $m^3$ ). La hipótesis de igualdad de pendientes entre modelos ( $b_{castanea} = b_{laeta}$ ) se evaluó mediante un análisis de ANCOVA usando una prueba de  $t$  (Zar, 1984).

Tabla 2. Ecuaciones para estimar el incremento de biomasa en sitios de *Q. castanea* y *Q. laeta*.

Componente de biomasa		kg Madera seca					m <sup>3</sup>				
		A	b	S <sub>Y,X</sub>	R <sup>2</sup>	p-valor	a	b	S <sub>Y,X</sub>	R <sup>2</sup>	p-valor
<i>Q. castanea</i>	Madera útil para carbón (MSC)	-72.02	5.85	21.55	0.91	0.0001	-0.1038	0.0086	0.0314	0.91	0.0001
	Biomasa total (BT)	-83.76	6.85	25.18	0.91	0.0001	-0.1221	0.0101	0.037	0.91	0.0001
<i>Q. laeta</i>	Madera útil para carbón (MSC)	-27.91	2.88	9.2	0.92	0.0004	-0.0506	0.0052	0.0167	0.92	0.0004
	Biomasa total (BT)	-29.77	3.14	10.04	0.92	0.0004	-0.0538	0.0057	0.0181	0.92	0.0004

Nota: las ecuaciones son de la forma  $y=a+(edad)*b$ , por rebrote y años en kg y m<sup>3</sup>. S<sub>Y,X</sub> es la raíz cuadrada de la media (RMSE) o la estimación del error estándar (SEE) en kg y m<sup>3</sup>. Los coeficientes de determinación reportados corresponden al ajuste (R<sup>2</sup>). El ANOVA muestra que las ecuaciones son significativamente diferentes entre especies ( $\alpha= 0.05$ , valor de  $p=0.0279$ ).

## Resultados

La Figura 5 muestra la distribución de los diámetros de los rebrotes de *Q. castanea* en la cronosecuencia. Los sitios se agruparon en tres clases de edad. El intervalo usado fue 11-15, 16-34 y más de 36 años desde su último evento de corte. Un ANOVA indicó que el promedio de los diámetros fue significativamente distinto entre cada una de las categorías de edad ( $F= 1,860$ ;  $p<0.0001$ ); la comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) mostró diferencias entre todas las comparaciones de promedios.

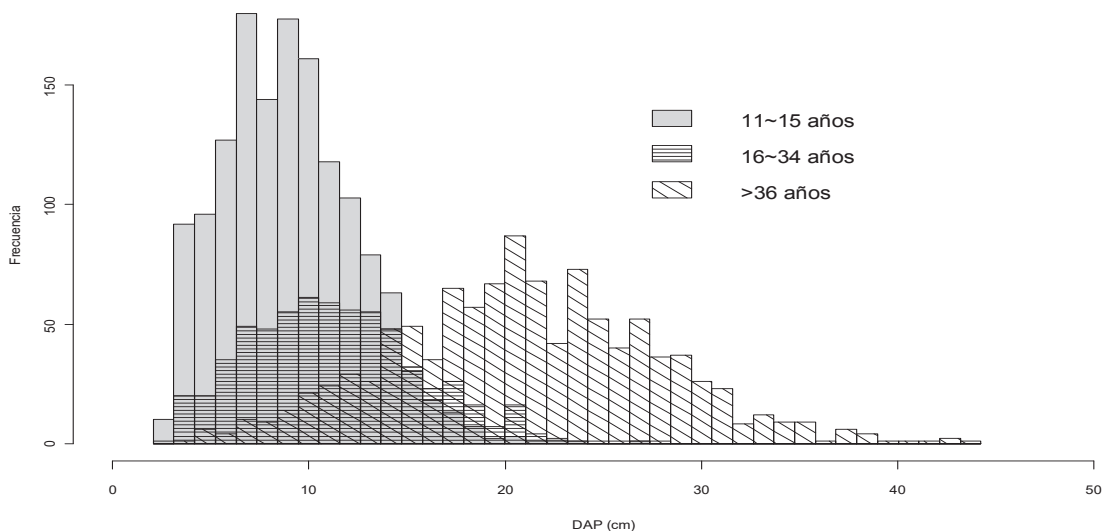


Figura 5. Distribución de las clases diamétricas de *Q. castanea* entre los sitios de la cronosecuencia.

Nota: el ANOVA y las comparaciones múltiples de Tukey muestran una alta significancia entre las diferentes clases de edad ( $p < 0.0001$ ). El eje “y” representa la frecuencia absoluta de los rebrotes, los cuales no están relacionados con la densidad de rebrotes en las categorías de edad. La densidad de rebrotes depende de los fragmentos de encinares utilizados para la elaboración de carbón:  $n$  (11-15 años)=1,428,  $n$  (16-34 años)=638,  $n$  (>36 años)=1,056.

La Tabla 3 muestra el incremento de madera útil para carbón y biomasa total por rebrote en función de la edad del sitio. La cantidad de la madera útil para carbón y la biomasa total por rebrote como funciones de la edad del sitio se calculó mediante la ecuación  $y = a + edad \times b_{sp}$  (Tabla 4; Figura 6). Los coeficientes de determinación fueron altos (mayores al 91%) y muy significativos ( $p = 0.0004$ ) en todos los casos. El índice de crecimiento de los rebrotes de *Q. laeta* fue la mitad que para *Q. castanea* (Figura 6; Tabla 4). Las ecuaciones son significativamente diferentes una de otra (*i.e.* la pendiente de la regresión lineal de *Q. castanea* es diferente que la de *Q. laeta*) en todos los casos: kg de madera seca útil para carbón ( $t = 3.4981$ ;  $p = 0.0050$ ), kg de madera seca de biomasa total ( $t = 3.7757$ ;  $p = 0.0031$ ),  $m^3$  de madera útil para carbón ( $t = 2.6169$ ;  $p = 0.0240$ ) y  $m^3$  de biomasa total ( $t = 2.9986$ ;  $p = 0.0121$ ).

Tabla 3. Biomasa útil para elaboración de carbón y biomasa total por rebrote como función de la edad del sitio.

*Q. castanea*

Nº Sitio	edad años	Madera útil para carbón(MSC)		Biomasa total (BT)		Madera útil para carbón (IMA)		Biomasa total (IMA)	
		kg MS rebrote	m3 rebrote	kg MS rebrote	m3 rebrote	kg MS rebrote/año	m3 rebrote/año	kg MS rebrote/año	m3 rebrote/año
1	11	14 ± 1	0.0224 ± 0.0008	17 ± 1	0.027 ± 0.0009	1.3 ± 0	0.002 ± 0.0001	1.6 ± 0.1	0.0025 ± 0.0001
2	14	24 ± 1	0.0366 ± 0.0016	29 ± 1	0.044 ± 0.0018	1.7 ± 0.1	0.0026 ± 0.0001	2 ± 0.1	0.0031 ± 0.0001
3	17	21 ± 2	0.0322 ± 0.0025	25 ± 2	0.0387 ± 0.003	1.2 ± 0.1	0.0019 ± 0.0001	1.5 ± 0.1	0.0023 ± 0.0002
4	24	37 ± 2	0.0556 ± 0.0025	44 ± 2	0.0666 ± 0.003	1.6 ± 0.1	0.0024 ± 0.0001	1.9 ± 0.1	0.0028 ± 0.0001
5	25	45 ± 5	0.0683 ± 0.0076	54 ± 6	0.0815 ± 0.009	1.8 ± 0.2	0.0027 ± 0.0003	2.2 ± 0.2	0.0033 ± 0.0004
6	38	165 ± 7	0.2437 ± 0.0098	194 ± 8	0.2888 ± 0.0115	4.4 ± 0.2	0.0065 ± 0.0003	5.2 ± 0.2	0.0077 ± 0.0003
7	38	156 ± 9	0.2296 ± 0.0127	183 ± 10	0.2721 ± 0.015	4.1 ± 0.2	0.0061 ± 0.0003	4.9 ± 0.3	0.0073 ± 0.0004
8	43	179 ± 7	0.2636 ± 0.0098	210 ± 8	0.3121 ± 0.0115	4.2 ± 0.2	0.0062 ± 0.0002	5 ± 0.2	0.0073 ± 0.0003

*Q. laeta*

Nº Sitio	edad años	Madera útil para carbón(MSC)		Biomasa total (BT)		Madera útil para carbón (IMA)		Biomasa total (IMA)	
		kg MS rebrote	m3 rebrote	kg MS rebrote	m3 rebrote	kgMS rebrote/año	m3 rebrote/año	kg MS rebrote/año	m3 rebrote/año
1	11	11 ± 2	0.0193 ± 0.0037	12 ± 2	0.0219 ± 0.0042	1 ± 0.2	0.0018 ± 0.0003	1.1 ± 0.2	0.002 ± 0.0004
2	14	14 ± 2	0.0256 ± 0.0042	16 ± 3	0.0288 ± 0.0047	1 ± 0.2	0.0018 ± 0.0003	1.1 ± 0.2	0.0021 ± 0.0003
3	17	13 ± 2	0.0228 ± 0.0031	14 ± 2	0.0257 ± 0.0034	0.7 ± 0.1	0.0013 ± 0.0002	0.8 ± 0.1	0.0015 ± 0.0002
4	24	27 ± 4	0.048 ± 0.0071	30 ± 4	0.0536 ± 0.0078	1.1 ± 0.2	0.002 ± 0.0003	1.3 ± 0.2	0.0023 ± 0.0003
5	25	55 ± 9	0.0999 ± 0.0166	61 ± 10	0.1101 ± 0.0179	2.2 ± 0.4	0.004 ± 0.0007	2.4 ± 0.4	0.0044 ± 0.0007
6	38	81 ± 11	0.1474 ± 0.0193	89 ± 11	0.1613 ± 0.0207	2.2 ± 0.3	0.0039 ± 0.0005	2.4 ± 0.3	0.0043 ± 0.0006
7	38	81 ± 9	0.147 ± 0.0162	89 ± 10	0.1602 ± 0.0174	2.2 ± 0.2	0.0039 ± 0.0004	2.4 ± 0.3	0.0043 ± 0.0005
8*	43	-- ± --	-- ± --	-- ± --	-- ± --	-- ± --	-- ± --	-- ± --	-- ± --

Nota: los errores son representados como el error estándar.

Tabla 4. Ecuaciones para estimar biomasa de rebrotes en sitios de *Q. castanea* y *Q. laeta*.

Componente de biomasa	kg Madera seca					m3					
	a	b	S <sub>Y·X</sub>	R <sup>2</sup>	p-valor	a	b	S <sub>Y·X</sub>	R <sup>2</sup>	p-valor	
<i>Q. castanea</i>	Madera útil para carbón (MSC)	-72.02	5.85	21.55	0.91	0.0001	-0.1038	0.0086	0.0314	0.91	0.0001
	Biomasa total (BT)	-83.76	6.85	25.18	0.91	0.0001	-0.1221	0.0101	0.037	0.91	0.0001
<i>Q. laeta</i>	Madera útil para carbón (MSC)	-27.91	2.88	9.2	0.92	0.0004	-0.0506	0.0052	0.0167	0.92	0.0004
	Biomasa total (BT)	-29.77	3.14	10.04	0.92	0.0004	-0.0538	0.0057	0.0181	0.92	0.0004

Nota: las ecuaciones son de la forma  $y=a+(\text{años})\cdot b$ , por rebrote y años en  $\text{kg}$  y  $\text{m}^3$ .  $S_{Y,X}$  es la raíz cuadrada de la media (RMSE) o la estimación del error estándar (SEE) en  $\text{kg}$  y  $\text{m}^3$ . Los coeficientes de determinación reportados corresponden al ajuste ( $R^2$ ). El ANOVA muestra que las ecuaciones son significativamente diferentes entre especies ( $\alpha=0.05$ , valor de  $p=0.0279$ ).

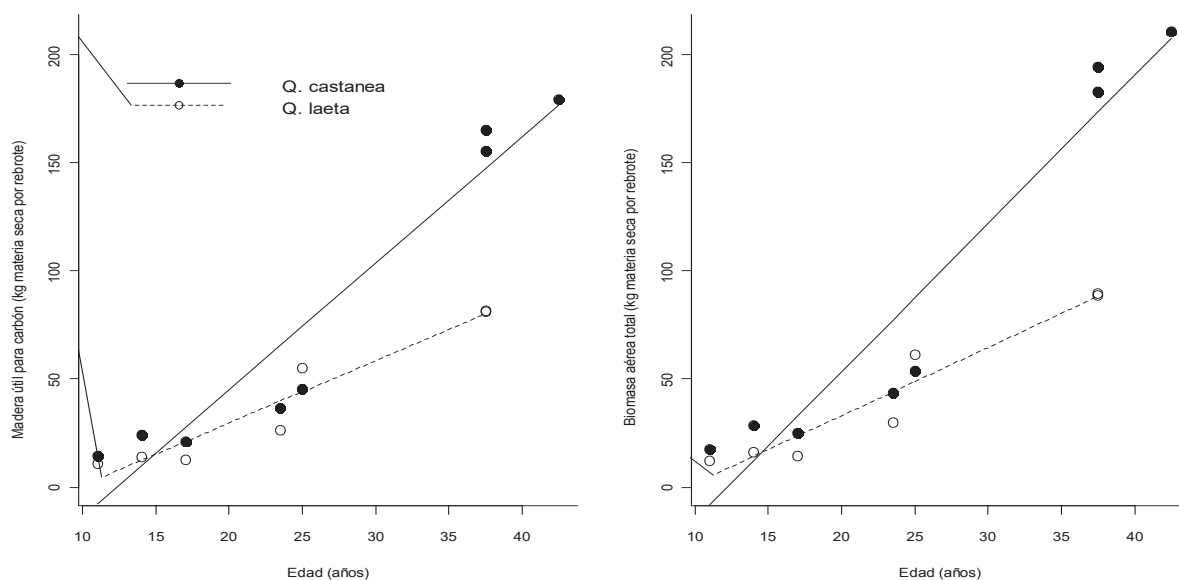


Figura 6. Crecimiento de rebrotes durante un intervalo de 43 años para *Q. castanea* y *Q. laeta*.

Nota: Las ecuaciones son de la forma  $y= a+(\text{años})\cdot b$ . Los parámetros evaluados fueron coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error estándar y  $p$ -valores como se muestran en la Tabla 7.

## Discusión

Muchos de los factores que afectan la sucesión en la regeneración de los encinos después de eventos de corte son: 1) la especie; 2) el sistema radicular del tocón remanente; 3) la edad del individuo; 4) el número de ciclos de corte; 5) el número de retoños del tocón vs. los de la raíz; 6) la competencia entre retoños; 7) las condiciones abióticas como la lluvia, temperatura, radiación solar, fertilidad del suelo; y 8) la incidencia de fuego o plagas (Thadani y Ashton, 1995; Rogers y Johnson, 1998; Bellingham y Sparrow, 2000; Johnson *et al.*, 2002; Espelta *et al.*, 2003; González-Tagle *et al.*, 2008).

Todos estos factores a excepción de la especie, fueron diferentes entre los sitios de la cronosecuencia, y no hubo forma de homogeneizarlos. Aún así, con los sitios fue posible construir un modelo de crecimiento lineal, aunque no fueron suficientes para desarrollar uno sigmoidal. Usando las ecuaciones alométricas se pudo predecir la trayectoria de

crecimiento hasta los 40-45 años con buena estimación. A pesar de las variables no controladas dentro de los sitios, y aunque se usó un modelo lineal, se observa que el índice de acumulación de madera útil para carbón y biomasa total (i.e. en el crecimiento de rebrotes de ambas especies) tienen coeficientes de determinación  $R^2$  altos y valores de  $p$  significativos.

Para calcular el promedio del potencial de productividad de los rebrotes para carbón vegetal, se consideraron cuatro densidades de retoños (Tabla 5). Los datos de las densidades de los retoños de los sitios de la cronosecuencia no se usaron en esta estimación, porque las densidades de retoños están mucho más influenciadas por el historial de uso del suelo que por la edad.

Tabla 5. Potencial de productividad de rebrotes bajo diferentes ciclos de rotación y diferentes densidades de rebrotes.

<i>Q. castanea</i>										
Ciclo de rotación	Densidad de rebrotes	Productividad de madera útil para carbón (MSC)				Potencial de productividad de biomasa total (BT)				Potencial de productividad para carbón
Años	n ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
15	200	3	0.2	5	0.3	4	0.3	6	0.4	59
	400	6	0.4	10	0.7	8	0.5	12	0.8	118
	800	13	0.8	20	1.3	15	1	24	1.6	235
	1600	25	1.7	40	2.6	30	2	48	3.2	471
30	200	21	0.7	31	1	24	0.8	36	1.2	193
	400	41	1.4	61	2	49	1.6	73	2.4	387
	800	83	2.8	123	4.1	97	3.2	145	4.8	773
	1600	166	5.5	245	8.2	195	6.5	291	9.7	1,546
45	200	38	0.9	56	1.3	45	1	67	1.5	238
	400	77	1.7	113	2.5	90	2	134	3	476
	800	153	3.4	225	5	180	4	267	5.9	952
	1600	306	6.8	451	10	360	8	534	11.9	1,905
<i>Q. laeta</i>										
Ciclo de rotación	Densidad de rebrotes	Productividad de madera útil para carbón (MSC)				Potencial de productividad de biomasa total (BT)				Potencial de productividad para carbón
Años	n ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
15	200	3	0.2	6	0.4	3	0.2	6	0.4	57
	400	6	0.4	11	0.7	7	0.5	13	0.8	114
	800	12	0.8	22	1.5	14	0.9	25	1.7	229
	1,600	25	1.6	44	3	28	1.9	50	3.3	457
30	200	12	0.4	21	0.7	13	0.4	23	0.8	109
	400	23	0.8	42	1.4	26	0.9	47	1.6	219
	800	47	1.6	85	2.8	52	1.7	93	3.1	437
	1,600	94	3.1	170	5.7	103	3.4	186	6.2	874
45	200	20	0.5	37	0.8	22	0.5	40	1.3	127
	400	41	0.9	74	1.6	45	1	81	2.7	253
	800	81	1.8	147	3.3	89	2	161	5.4	507
	1,600	163	3.6	295	6.6	179	4	322	10.7	1,013

Nota: representa los errores estándar

El potencial de productividad de carbón varía por la densidad de rebrotes y por los ciclos de corte. En la Tabla 5 se muestran estrategias para hacer ciclos de rotación que maximicen la productividad independientemente de la densidad de rebrotes. Para identificar los mejores ciclos de rotación que maximicen la productividad de carbón, se desarrollaron tres escenarios asumiendo que las curvas decaen por la densidad de rebrotes (Figura 7).

En el escenario A, se asume que el promedio de rebrotes decae de los 900 a los 450 rebrotes por hectárea dentro de los 90 años; en el escenario B, el promedio de la densidad de rebrotes se asume que decae en un índice anual del 10%; y en el escenario C, en un índice anual del 20%.

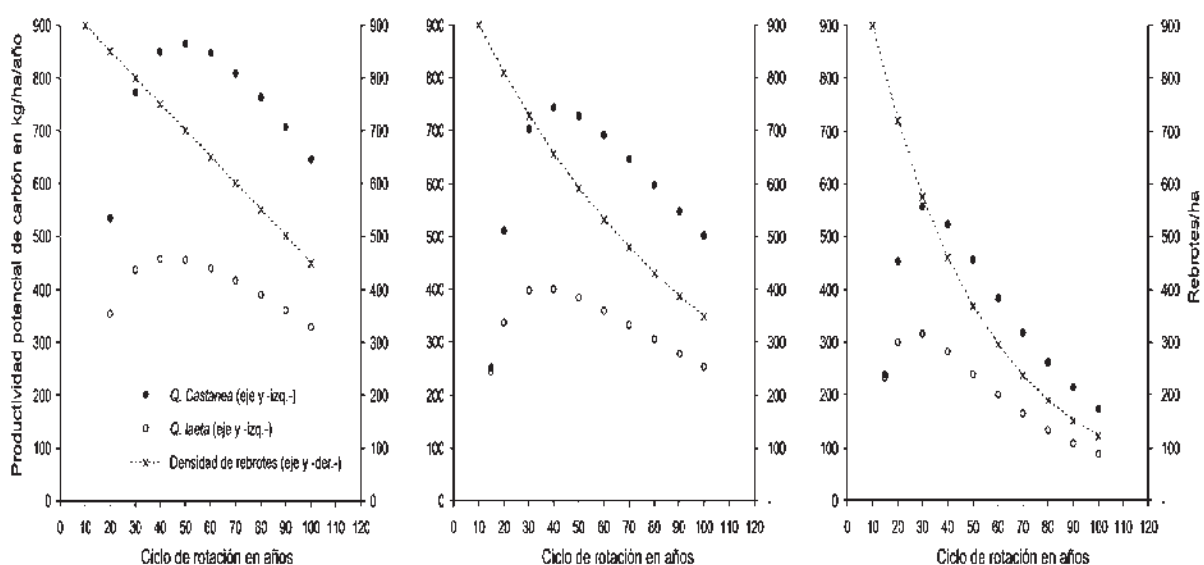


Figura 7. Potencial de productividad de carbón bajo diferentes ciclos de rotación y diferente densidad de rebrotes de *Q. castanea* y *Q. laeta*.

Nota: En el escenario A, se asume que el promedio de rebrotes decae de los 900 a los 450 rebrotes por hectárea dentro de los 90 años; en el escenario B, el promedio de la densidad de rebrotes se asume que decae en un índice anual del 10%; y en el escenario C, en un índice anual del 20%.

El máximo potencial de productividad decrece de los 50 a los 30 años esto depende de la densidad de rebrotes. El escenario A fue conservador y el escenario C es poco menos con respecto a la densidad de rebrotes por década.

Los ciclos de rotación para el área de estudio son de aproximadamente entre 15-20 años (Ghilardi *et al.*, datos no publicados), en los cuales se observa que los rebrotes de encino desarrollan un fuste y un DAP aprovechable para la producción de carbón. Para la

elaboración de hornos primero se colocan en el centro troncos cortos y gruesos, después troncos medianos (rebotes de DAP de 10 cm en promedio); para cubrir el horno utilizan finalmente los residuos de ramas de diámetros más pequeños. En consecuencia, para hacer un horno se necesita un bosque que tenga una estructura diversa de clases diamétricas (Figura 5), que únicamente se desarrolla si transcurre el tiempo necesario. Sin embargo, los carboneros prefieren árboles grandes, pero esto lleva más tiempo de espera para poder cosecharlos. Debido a eso no se incluyeron estos árboles dentro del ciclo de rotación.

Los rangos de DAP de los rebotes dentro de los sitios de la cronosecuencia (sitios 6 al 8) fueron mayores que los usados para desarrollar la ecuaciones alométricas (Tablas 2 y 4). Debido a que los rebotes utilizados para la elaboración de las ecuaciones provenían de árboles jóvenes (aproximadamente de 25-30 años), la capacidad de predicción de ellas disminuirá en arboles mayores.

Futuras investigaciones pueden completar la cronosecuencia con sitios que incluyan tanto árboles muy jóvenes (menores a 10 años) como muy viejos (mayores a 50 años), para calcular una curva más realista (i.e. sigmoidal).

Para generar estrategias de manejo de encinares es importante entender la habilidad que tienen para producir rebotes después de sufrir cortes. Sin embargo, también existen otros factores de importancia de acuerdo a Johnson *et al.* (2002): “(i) la sustentabilidad de un ecosistema específico que mantenga la regeneración después del corte; (ii) predicciones de regeneración; y (iii) desarrollo social y económico”. Finalmente, un aspecto que debe ser tomado en consideración es que la productividad de rebotes puede decrecer e incluso inhibirse por completo debido a la acumulación de varios eventos de corte. Por ello, se vuelve imprescindible implementar prácticas de restauración y manejo sustentable de este recurso maderable.

## Discusión general

El objetivo de este estudio fue determinar las propiedades físicas de tres de las especies más utilizadas para la elaboración de carbón en la cuenca de Cuitzeo, *Quercus castanea*, *Q. deserticola* y *Q. laeta*. Asimismo, se desarrollaron ecuaciones alométricas para los rebrotes de estas especies con el fin de poder estimar su biomasa. También se construyó una cronosecuencia con sitios donde se realizaba la actividad carbonera, esto para evaluar el crecimiento de los rebrotes de encinos.

Los principales resultados obtenidos para la densidad básica de las especies fueron significativamente distintos: los rebrotes de *Q. castanea* tienen una densidad mayor que *Q. deserticola* y *Q. laeta*. Se observó también que esta variable es afectada por la clase diamétrica (tamaño de la rodaja). La densidad aumenta cuando se incrementa la proporción de tejidos dentro del fuste, como se ha observado previamente (Panshin y de-Zeeuw, 1970; Kollmann y Coté, 1984).

Las densidades de *Q. deserticola* y *Q. laeta* se encuentran por debajo del rango reportado para encinos blancos mexicanos. En cambio, las densidades de *Q. castanea* sí quedaron dentro de los rangos de los encinos rojos (Quintanar, 2002). Los datos de este trabajo también quedaron por debajo de los rangos reportados para encinos estadounidenses (Forest Products Laboratory, 1999), pero coincidieron con los rangos de encinos europeos (Bodirlau *et al.* 2007).

El contenido de humedad no varió entre especies, pero se detectó que el tamaño sí influye a esta variable, ya que ella decrece con el diámetro. El contenido de humedad fue alto, ya que las rodajas fueron tomadas de rebrotes recién derribados, cuyos contenidos de agua en pie puede ser de hasta 50%.

Nuestros resultados de humedad y densidad son bajos en comparación con los reportados en la literatura. Esto puede deberse a que los análisis se hicieron en muestras que conservaron el duramen, la albura, la corteza interna y la corteza externa.

Las variables que influyen más en la proporción de tejidos en el duramen son la especie y la clase diamétrica, siendo *Q. castanea* la que tiene mayor proporción. La variable que llega a afectar la proporción de albura es la clase diamétrica, no observándose diferencia entre especies. Para el caso de corteza interna la variable que afecta su

proporción es la especie, siendo *Q. laeta* la que tiene mayores valores. Finalmente para la corteza externa las variables que la afectan son la especie y la clase diamétrica, detectándose que la especie de *Q. castanea* es la que tiene mayor proporción de este tejido. No se encontró información en la literatura para poder comparar nuestros resultados.

Las regresiones no lineales calculadas para la elaboración de carbón (MSC) y biomasa total (BT) como funciones del DAP tuvieron valores de  $R^2$  mayores al 92% para cada una de las especies estudiadas. También se calcularon ecuaciones para los residuos (ramillas y hojas), que tuvieron valores de  $R^2$  de 89%.

Las ecuaciones alométricas reportadas en la literatura sobreestiman la biomasa total para encinos rebrotados, ya que las ecuaciones de *Q. peduncularis* (Costa-Mireles, 2000) sólo estiman rebrotes pequeños ( $DAP < 20\text{cm}$ ) y sobrestiman los mayores ( $DAP > 20\text{cm}$ ). Sin embargo las ecuaciones de *Q. lacely*, *Q. cambyi* y *Q. rysophylla* (Rodríguez *et al.*, 2007), muestran sesgos sistemáticos para sobreestimar la biomasa total. Asimismo las ecuaciones de *Q. spp* (Ayala, 1998) muestran muy poca representatividad para alometría de encinos. Todas las ecuaciones reportaron rangos de DAP similares o incluso mayores a nuestro estudio, lo cual permitió hacer estas comparaciones. Las regresiones no lineales aplicadas en este estudio son mejores, ya que no requieren un factor de corrección para logaritmos cuando la ecuación se convierte de su forma logarítmica a su forma exponencial (Meyer, 1941; Baskerville, 1972).

Las diferencias entre modelos pueden deberse a que las ecuaciones reportadas en la literatura se hicieron con árboles de regeneración por semilla cuyo crecimiento es distinto, ya que el hecho de tener solamente un fuste permite que las copas se desarrollen mejor al igual que DAP (Johnson *et al.*, 2002). Caso contrario es el crecimiento de los rebrotes, ya que los espacios entre fustes se ven reducidos por la competencia entre ellos. En otras palabras, la reducción de espacios hace que se vea afectado el crecimiento en las copas al igual que en el DAP. Asimismo esto puede hacer que los parámetros de las ecuaciones se alteren.

El estudio de cronosecuencia mostró que el tamaño de los rebrotes aumenta linealmente con la edad del sitio. Además, se encontró que la tasa de crecimiento de *Q. laeta* es la mitad que el de *Q. castanea*. Las proyecciones de las tasas de crecimiento

indican que el intervalo de tiempo que optimiza la cosecha de madera está entre los 30 y 50 años.

Los encinos son un recurso forestal que durante mucho tiempo se ha subutilizado debido a que de las aproximadamente 161 especies que se han detectado en el país, sólo 60 de ellas presentan diámetros y alturas comerciales para la industria forestal. A pesar de su potencial como recurso forestal (todas las partes o estructuras del árbol son susceptibles de utilización) el uso generalizado de los encinos en México se restringe a la elaboración de leña y carbón, y en menor medida para la elaboración de artículos domésticos y de construcciones rústicas (Zavala, 1990). Esto ocurre debido al desconocimiento de las características y propiedades de la madera, que es considerada como preciosa en otros países.

Existen diversos trabajos para especies de encinos los cuales han estado orientados para árboles de regeneración por semilla. Este trabajo estuvo enfocado principalmente para rebrotes de encino en sitios donde se lleva a cabo la actividad carbonera, de ahí la importancia de trabajar con rebrotes de encinos para poder generar información que oriente mejor los posibles usos a los encinares de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Los usos opcionales de la madera dependen en parte de sus características de crecimiento, que se manifiestan en la proporción de tejidos (duramen, albura, corteza interna y corteza externa) y en las propiedades de la madera como son densidad básica y contenido de humedad. En consecuencia, resulta fundamental conocer dichas propiedades para determinar otros usos posibles para la madera.

La alometría de árboles y las cronosecuencias son la base para realizar estudios de captura de carbono, de servicios ambientales y planes de explotación sustentable, por mencionar algunas opciones. En la actualidad, la práctica de extracción de carbón no es una actividad regulada, puesto que no existen permisos ni reglamentaciones expedidos por la Comisión Nacional Forestal. Esta carencia de regulación, aunada a la “tradicional” falta de interés por estudiar estas especies, son las principales causas de que prácticamente no existan trabajos previos. Este estudio provee información importante de algunos aspectos básicos de los rebrotes de encino, tales como: densidad, contenido de humedad, tipo de manejo que se lleva a cabo y crecimiento, para en un futuro poder implementar estrategias de manejo sustentable.

Creo que es importante profundizar y ampliar el contacto con las personas que actualmente se dedican a la actividad carbonera. Esto permitirá entender más las técnicas usadas en la elaboración de carbón vegetal y saber cuáles otras especies se pueden usar para esta actividad. Además, es relevante buscar de qué forma se puede hacer más eficiente la elaboración de carbón vegetal. Debido a que la actividad carbonera está ampliamente distribuida en toda la Cuenca del Lago de Cuitzeo, también falta averiguar si todas las especies de encino rebrotan en la cuenca. Asimismo considero que para apuntalar más la información generada en la cronosecuencia, es importante aumentar el número de sitios y aplicar técnicas dendrocronológicas para evaluar el crecimiento de los rebrotes en parcelas utilizadas para la actividad carbonera. Conviene remarcar que los modelos de crecimiento más adecuados son sigmoidales en vez de lineales, por lo que también debería considerarse usarlos para caracterizar el incremento de biomasa de los encinos de la cuenca.

Puede haber otros usos alternativos de los encinos, como la captura de carbono, el pago por servicios ambientales o la realización de tratamientos culturales en los rebrotes para tener ya sea árboles con fustes rectos (para facilitar su cosecha) o con una arquitectura adecuada para otros usos que den un mayor valor agregado a la madera.

## Recomendaciones generales

A partir de las proporciones relativas de tejidos que presentan estas especies, creo que *Q. castanea* es adecuada para la restauración de bosques de encino, ya que es una especie que presenta la mayoría de las veces un fuste recto y tiene un crecimiento más rápido con respecto a *Q. laeta*. Por otra parte, *Q. desertícola* no alcanza tamaños muy grandes y su patrón de crecimiento produce una arquitectura muy heterogénea, por lo que a los carboneros no les atrae demasiado utilizarla en la elaboración de carbón ya que implica un problema en el acomodo de la madera al momento de la formación del horno. Consecuentemente, se podría utilizar para postes para cerca o para la extracción de leña. Además recomendaría realizar estudios de mercado para evaluar los costos y beneficios de otros usos alternativos que pudieran llegar a tener estas especies dentro de la industria maderera (parquet, duela, entre otras).

Observaciones empíricas sugieren que hay dos factores que parecen ser importantes en la regeneración de los rebrotes: la altura a la que se realiza el corte y la herramienta empleada (hacha o motosierra). Es necesario evaluar la importancia de estos factores para desarrollar estrategias de manejo sustentables.

Es importante incluir en la cronosecuencia sitios con edades diferentes a las ya usadas, para mejorar las estimaciones del crecimiento de estas especies. Además hay que caracterizar en escala de parcela las tasas de crecimiento, regeneración poblacional y de extracción de madera. Esta información permitirá desarrollar propuestas de aprovechamiento que no comprometan la viabilidad del bosque.

Como tareas particulares, es necesario evaluar cuándo es más conveniente cortar los rebrotes y cuándo mantenerlos para optimizar el crecimiento de éstos. Así mismo, es importante determinar a partir de qué diámetro se debe hacer el primer corte de un encino para mantener cosechas sucesivas de rebrotes y cuáles son las características del corte que optimizarían esto (p.e. altura, estación del año). El diseño de un buen sistema de manejo para la elaboración de carbón vegetal también depende de la tecnología empleada, por lo

que la implementación de hornos metálicos podría coadyuvar a la optimización de este proceso.

Finalmente, se recomienda diseñar un plan de aprovechamiento forestal en el que las parcelas de producción tengan propósitos múltiples, para que en ellas se realicen además del aclareo y la cosecha, labores culturales de permanencia de arbolado y de regeneración natural por semilla.

## Referencias

Acosta M., M *et al.* (2000) Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36:725-736.

Ayala, L, R., S. (1998) Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales, México.

Baskerville, G.L. (1972) Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2, 49-53.

Bellingham, P.J. y Sparrow, A.D. (2000) Resprouting as a life history strategy in woody plant communities. *Oikos* 89, 409–416.

Bello, M. y Labat, J. (1987) Los encinos (*Quercus*) del estado de Michoacán, México *in* Cuaderno de Estudios Michoacanos 1, México.

Bodirlau, R., I. Spiridion y C. A. Teaca (2007) Chemical investigation of wood tree species en temperate forest in East Northern Romania. *BioResources* (2):41-57.

Brown, S., J. R. Gillespe A. y A.E. Lugo. (1989) Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35(4): 881-902.

Castellanos, B. J., A. Velásquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. Fierros G. (1996) Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30:123-128

Causton, D. R. (1985) Biometrical, structural and physiological relationships among tree parts. In : Attributes of trees crop plants. Cannell, M. G. R. y J. E. Jackson (eds). *Inst. Terrestrial Ecology, Huntingdon*. Pp:137-159.

Chapman, J. W. y S. T. Gower. (1991) Aboveground production and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 21: 1533-1543.

Chazdon, R.L., Letcher, S.G., van Breugel, M., Martinez-Ramos, M., Bongers, F. y Finegan, B. (2007) Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* 362, 273-289.

Christense, N.L., A. M. Bartuska, J. H. Brown, S. Carpenter, C. D' Antonio, R. Francis, J. F. Franklin, J. A. MacMahon, R. F. Noss, D. J. Parsons, C. H. Peterson, M. G. Turner y R. G. Woodmansee.(1996). The report of the Ecological Society of America Committee on the Scientific Basis for Ecosystem Management. *Ecological Applications*. Vol.6:665-691.

Dávalos S., R. y G. M. Bárcenas P. (1999) Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca. *Madera y Bosques* 5(1):61-69.

Espelta, J.M., Retana, J. y Habrouk, A. (2003) Resprouting patterns after fire and response to stool cleaning of two coexisting Mediterranean oaks with contrasting leaf habits on two different sites. *Forest Ecology and Management* 179:401-414.

Etchevers B., J. D Hernández V., J. Velázquez M., A. y Acosta M., M. (2000) Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36:725-736.

Forest Products Laboratory (FPL) (1999) Wood as engineering material. *Agricultural Handbook No. 72*. Forest Service, US Department of Agriculture. Madison, WI. USA. 387p.

Freedman, B., Duinker, P.N., Barclay, H., Morash, R., Prager, U. (1982) Forest biomass and nutrient studies in central Nova Scotia. *Can. For. Serv., Marit. For. Res. Cent., Inf. Rep. M-X-134*.

Geron, C. D. y G. A. Ruark. (1988) Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Can. J. For. Res.* 18:1298-1304.

González-Tagle, M.A., Schwendenmann, L., Perez, J.J. y Schulz, R. (2008) Forest structure and woody plant species composition along a fire chronosequence in mixed pine-oak forest in the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico. *Forest Ecology and Management* 256, 161-167.

Grier, C. C. y R.H. Waring. (1974) Conifer foliage mass related to sapwood area. *For. Sci.* 20:205-206

Harrington, R.A. y Fownes, J.H. (1993) Allometry and growth of planted versus coppice stands of 4 fast-growing tropical tree species. *For. Ecol. Manage.* 56: 315-327.

Johnson, E.A. y Miyanishi, K. (2008) Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology Letters* 11, 419-431.

Johnson, P.S., Shifley, S.R. y Robert, R. (2002) The ecology and silviculture of oaks. CABI Publishing, New York.

Khan, M.L. y Tripathi, R. S. (1986) Tree regeneration in a disturbed sub-tropical wet hill forest of North-East India: Effect of stump diameter and height on sprouting of four tree species. 17:199-209.

Kollmann, F.F.P. y Cote, W.A.J. (1984) Principles of Wood Science and Technology: Volume 1: Solid Wood. Springer-Verlag, Berlin.

Larsen D. R. y P. S. Johnson. (1998) Linking the ecology of natural oak regeneration to silvicultura. *Forest Ecology and Management* 106: 1-7.

- Lewington, R. y Streeter, D. (1993) La historia natural de los robles. España.
- Luna, J., Montalvo, L. y Rendón, B. (2003) Los usos no leñosos de los encinos en México. *Boletín Sociedad Botánica de México* 72:107-117.
- Meyer, H.A., (1941) A correction for a systematic error occurring in the application of the Logarithmic Volume Equation. Pa. State For. School Res. Paper 7, 1-3.
- Navar, J. (2009) Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257:427–434.
- Nixon, K. C. (1993). The genus *Quercus* in Mexico. Oxford University Press, New York, , USA.
- Panshin, A.J. y de-Zeeuw, C. (1970) Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada. second ed. McGraw-Hill College, New York.
- Pascarella, J.B., Aide, T.M. y Zimmerman, J.K. (2004) Short-term response of secondary forests to hurricane disturbance in Puerto Rico, USA. *Forest Ecology and Management* 199:379-393.
- Plieninger T., J. Modolell y Mainou, W. Konold. (2004) Land manager attitudes toward management, regeneration, and conservation of Spanish holm oak savannas (dehesas). *Landscape and Urban Planning* 66:185-198.
- Quintanar O.J. (Editor) (2002) Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México. INIFAP-CIRCE. C.E. San Martinito. Tlahuapan, Puebla. México. Libro Técnico No.2. 194 p.

R Development Core Team (2007) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Reyes, I. y Gama, J. C. (1995) Revaloración de la importancia de los encinos. III Seminario nacional sobre utilización de encinos. UANL, Nuevo León, México.

Rodríguez, I. y Romero, S. (2007) Arquitectura foliar de diez especies de encino (*Quercus*, Fagaceae) de México. *Acta Botánica Mexicana* 81:9-34.

Rodríguez-Laguna *et al.*, (2007) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N.L. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Rogers, R. y Johnson, P.S. (1998) Approaches to modeling natural regeneration in oak-dominated forests. *Forest Ecology and Management* 106:45-54.

SEMARNAT. (2001) Anuario estadístico de la producción forestal 1999. SEMARNAT-DGF. Mexico, D.F.

Sheil, D. (2001) Long-term observations of rain forest succession, tree diversity and responses to disturbance. *Plant Ecology* 155:183-199.

Sokal, R. y J. Rohlf. (1995) Biometry. Freeman and Company, 887 pp.

TerMikaelian, M.T., Korzukhin, M.D. (1997) Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology Management* 97:1-24.

Thadani, R., Ashton, P.M.S. (1995) Regeneration of Banj Oak J (*Quercus-Leucotrichophora* Camus, A.) in the Central Himalaya. *Forest Ecology and Management* 78:217-224.

Valencia, S. (2004) Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75:33-53.

Zar, J.H. (1984) *Biostatistical analysis*. second ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Zavala Ch. F. (1990) Los encinos mexicanos: un recurso desaprovechado. *Ciencia y Desarrollo* 16(95):43-51.

Zavala F. (2001) *Introducción a la ecología de la regeneración natural de encinos*. Universidad Autónoma de Chapingo, México.