

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION
ESCUELA DE POSTGRADO

ESTIMACION DEL INCREMENTO DIAMETRICO EN
Cordia alliodora Y *Vochysia ferruginea* **A PARTIR DE**
VARIABLES DEL ARBOL Y FACTORES DEL SITIO EN UN
BOSQUE SECUNDARIO EN COSTA RICA

POR

CARLOS ENRIQUE REYES REYES

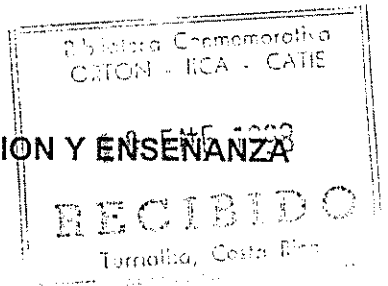


Turrialba, Costa Rica
1997

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSTGRADO



// ESTIMACION DEL INCREMENTO DIAMETRICO EN *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea* A PARTIR DE VARIABLES DEL ARBOL Y FACTORES DEL SITIO EN UN BOSQUE SECUNDARIO EN COSTA RICA

POR

✓
CARLOS ENRIQUE REYES REYES

CATIE

Turrialba, Costa Rica
1997

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Subdirección General Adjunta de Enseñanza
Programa de Estudios de Postgrado

**ESTIMACION DEL INCREMENTO DIAMETRICO EN *Cordia alliodora* y
Vochysia ferruginea A PARTIR DE VARIABLES DEL ARBOL
Y FACTORES DEL SITIO EN UN BOSQUE SECUNDARIO
EN COSTA RICA**

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico Académico del Programa de Estudios de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

Por

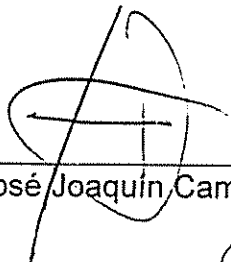
Carlos Enrique Reyes Reyes

CATIE
Turrialba, Costa Rica.
Diciembre de 1997

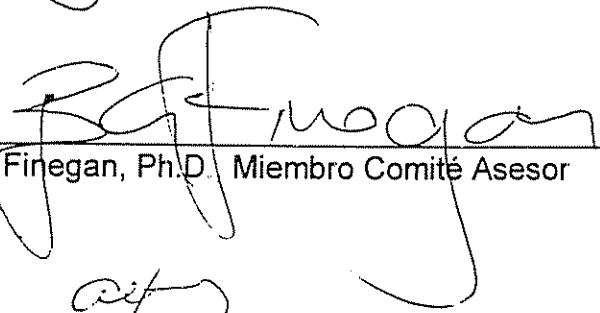
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area Estudios de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante, como requisito parcial para optar al grado de ;

MAGISTER SCIENTIAE

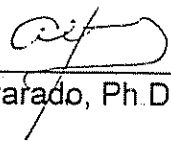
FIRMANTES :



José Joaquín Campos, Ph.D., Profesor Consejero



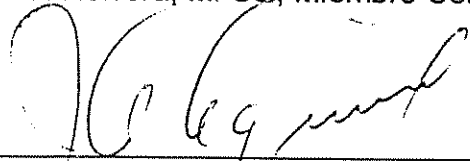
Bryan Firégan, Ph.D. Miembro Comité Asesor



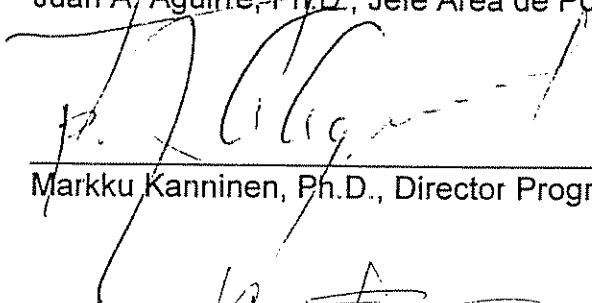
Alfredo Alvarado, Ph.D., Miembro Comité Asesor



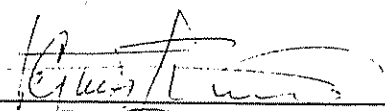
Bernal Herrera, M. Sc., Miembro Comité Asesor



Juan A. Aguirre, Ph.D., Jefe Area de Postgrado



Markku Kanninen, Ph.D., Director Programa de Enseñanza



Carlos Enrique Reyes Reyes, Candidato

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad Ejecutora del Proyecto Manejo y Conservación de los Recursos Naturales Renovables de la Cuenca Alta del Río Chixoy -UNEPROCH- por financiar mis estudios de maestría.

Al Dr. José Joaquín Campos Arce, consejero principal, por su amistad y valiosa asesoría y orientación en el desarrollo del presente estudio.

Al Dr. Bryan Finegan, por sus acertados comentarios y sugerencias para mejorar el presente trabajo

Al Dr. Alfredo Alvarado, por sus invaluable sugerencias para la comprensión e interpretación de las relaciones suelo-planta.

Al M. Sc. Bernal Herrera y M. Sc. Marlen Camacho, por el apoyo brindado en la investigación.

A Jonhy Pérez, por su apoyo en los análisis estadísticos

A Lorena Orozco, por su valiosa colaboración en la edición del presente documento.

Al señor Vicente Herra, por el aporte de su experiencia y ayuda desinteresada durante el trabajo de campo.

Al Señor Hugo Brenes y a mi amigo y compañero de estudios Alfonso Castillo, por su amistad, colaboración y apoyo brindado en los momentos difíciles, durante el desarrollo de mis estudios de maestría.

DEDICATORIA

A DIOS por haberme dado la vida, sabiduría e inteligencia, para culminar con éxito mis estudios.

A mi madre Marina Matilde Reyes de Reyes (QEPD) por el ejemplo; que el ser supremo la tenga gozando de su infinita misericordia.

A mis hermanos Concepción, Victoria, Cristy, Efrén y Arturo, por la ayuda en mi formación profesional.

A mis cuñados, sobrinos y demás familiares, por el apoyo incondicional en los buenos y malos momentos.

REYES REYES, C. 1997. Estimación del incremento diamétrico en *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea* a partir de variables del árbol y factores del sitio en un bosque secundario en Costa Rica.

Palabras clave; Bosque húmedo tropical, bosque secundario, *Cordia alliodora*, *Vochysia ferruginea*, sucesión, incremento diamétrico, calidad de sitio, modelos de crecimiento.

RESUMEN

En los últimos años ha habido gran interés en desarrollar modelos de predicción del crecimiento de bosques tropicales. Estos modelos han usado como variables de predicción parámetros del rodal y del árbol, pero no han incluido algún parámetro indicador de la capacidad productiva del sitio. En estos bosques, a diferencia de las plantaciones forestales, se conoce muy poco sobre el efecto del sitio en el crecimiento. Este estudio pretende evaluar el efecto del sitio en la variación en el incremento diamétrico de *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea*, en un bosque tropical de la tercera fase de la sucesión secundaria, ubicado en Florencia de San Carlos, Costa Rica.

Se contó con información de 41 parcelas de medición temporal (PMT) de 400 m², y de 105 árboles de un estudio intensivo. En estos se midió el diámetro_{1,30m}, altura total, calidad de fuste, iluminación y forma de la copa, de todos los árboles ≥ 10 cm. A la vez se estimó el incremento diamétrico, área basal y altura dominante. Para estas parcelas se utilizó el análisis de suelos (0-12 cm de profundidad) realizado por Herrera (1996). Así mismo, en el bosque se determinó el porcentaje de pendiente, posición de la parcela en la pendiente y la forma del terreno (Zech, 1994).

En 26 de 41 parcelas evaluadas estuvo presente (al menos con un individuo) la especie *C. alliodora*, y en 32 de ellas *V. ferruginea*. A los datos de incremento diamétrico se les realizó estadísticas simples y pruebas de normalidad, matrices de correlación para conocer las relaciones entre este y las variables del árbol y del sitio, para luego generar modelos de crecimiento.

Se encontraron 44 individuos de *C. alliodora* y 61 de *V. ferruginea*, correspondientes a árboles del estudio intensivo de crecimiento. Estos se agruparon en tres categorías de clases diamétricas: los individuos con diámetro 10-19.9 cm, 20-29.9 cm y $\text{dap} \geq 30$ cm, a lo largo de tres períodos de incremento (94-95, 95-96 y 96-97).

Los individuos de *C. alliodora* comprendidos en la categoría diamétrica mayor, presentaron el mayor incremento diamétrico en el primer período de mediciones pero fueron sustituidos por los árboles de la menor categoría al final del último período. Los árboles de la categoría diamétrica intermedia para los tres períodos, presentaron el menor incremento. Para *V. ferruginea*, los individuos comprendidos en la categoría diamétrica mayor presentan el mayor incremento para los tres períodos, seguidos por la segunda categoría.

Con respecto a la evaluación de la asociación entre el incremento diamétrico y los parámetros del árbol, se encontró correlación lineal con la forma de la copa (-0.38) y la altura (0.18) de *C. alliodora*. Por otro lado, el incremento diamétrico de *V. ferruginea* correlacionó con el iluminación y forma de la copa (-0.60 y -0.58), diámetro (0.56), altura (0.45) y calidad de fuste (-0.33). Tanto el área basal como la altura dominante no presentaron ningún tipo de correlación con el incremento diamétrico para ambas especies. Para la evaluación de la asociación entre el incremento diamétrico y los parámetros del árbol de estudio intensivo se encontró correlación lineal con la altura (0.52), forma de la copa (-0.27) y el dap (0.26) de *C. alliodora*. Por su lado, el incremento diamétrico de *V. ferruginea* correlacionó con la forma de copa (-0.38), altura (0.36), diámetro (0.35) y calidad de fuste (-0.27).

El modelo de regresión múltiple ajustado [5] para predecir el incremento diamétrico de *C. alliodora* en función de las variables del árbol, presentó un $R^2 = 23\%$ en función del diámetro y la altura. El modelo ajustado para predecir el incremento diamétrico de *C. alliodora* en función de las variables

del árbol de estudio intensivo, explicó un 27% de la variación en incremento diamétrico, en función de la altura, lo cual hace al modelo de poco valor práctico por los errores de medición que conlleva esta variable. Mientras que para *V. ferruginea*, el modelo [6] explicó un 37% de la variación del incremento diamétrico, en función del diámetro y la forma de copa. Y el modelo ajustado para predecir el incremento diamétrico de *V. ferruginea*, en función de las variables del árbol de estudio intensivo, únicamente presentó un R^2 de 12% en función del diámetro y la forma de copa, el cual no se considera aceptable.

Con respecto a la evaluación de la asociación entre el incremento diamétrico del árbol individual por parcela y las variables del sitio, se encontró correlación lineal entre el porcentaje de acidez (-0.26), potasio (-0.21), forma de terreno (0.20), zinc (0.19) y la posición de la parcela en la pendiente (0.18), con el incremento diamétrico de *C. alliodora*. *V. ferruginea* correlacionó con el porcentaje de arcilla y pendiente (-0.28, -0.25), calcio (0.18), forma de terreno (0.17), zinc (0.17), CICE (0.16), arena (0.15), magnesio (0.13), potasio (0.13). El modelo de regresión ajustado [7] para predecir el incremento diamétrico del árbol individual de *C. alliodora* por parcela, en función de las variables del sitio, explicó un 24% en función de la posición de la parcela en la pendiente, fósforo y zinc, mientras que para *V. ferruginea*, presentó únicamente un R^2 de 16% en función del porcentaje de pendiente, posición de la parcela en la pendiente, potasio y CICE.

El modelo [8], se construyó a partir de la combinación del incremento diamétrico de *C. alliodora* por parcela y las variables del sitio, presentó un R^2 de 86% en función del potasio, porcentaje de acidez, CICE, manganeso y zinc. El modelo de *V. ferruginea* [9] se construyó con la finalidad de compararlo con el generado por Herrera (1996), quién determinó la altura dominante en función de variables del sitio ($R^2 = 79.5\%$); este modelo explicó un 58.2% de la variación del incremento diamétrico en función del porcentaje de pendiente, fósforo, potasio y porcentaje de acidez.

Finalmente se evaluó la asociación entre el incremento diamétrico, en función de variables del árbol, adicionando las variables del sitio, esto con el fin de evaluar la ganancia en la variación explicada del incremento diamétrico al incorporar en los modelos las variables del sitio. El modelo [10] para la especie *C. alliodora* presentó un R^2 de 27%, en función de el diámetro, altura, forma de copa y zinc. Por su parte el modelo [11] para la especie *V. ferruginea*, explicó un 47% de la variación en incremento diamétrico, en función del diámetro, forma de copa, posición de la parcela en la pendiente, forma del terreno, calcio y zinc. Existe únicamente una ganancia de 4.3% y 9.5% en la variación explicada, respecto a los modelos [5] y [6], a pesar de estar formados por el doble y triple de variables, respectivamente. Considerando la poca ganancia en la variación explicada y los problemas de construir modelos con variables del sitio, no se considera necesario la utilización de estas variables en los modelos de predicción del incremento diamétrico.

REYES R., C. 1997. Diameter growth valuation on *Cordia alliodora* and *Vochysia ferruginea* as of tree and site factors in a secondary forest from Costa Rica. Thesis M. Sc. Turrialba, C. R., CATIE.

Key words: Tropical humid forest, secondary forest, *Cordia alliodora*, *Vochysia ferruginea*, succession, diameter growth, site quality, growth model.

SUMMARY

There has been great interest, during the past years, in developing growth prediction models for tropical forests. As prediction variables, these models have used stand and tree parameters, but never have included parameters indicating site productive capacity. Unlike on forestry plantations, on these forests, very little is known on the effect of site on growth. This study intends to evaluate site effect in diameter growth variation on *C. alliodora* and *V. ferruginea*, in a tropical forest during its third phase of secondary succession, located in Florencia of San Carlos, Costa Rica.

The study relies on the information of 41 temporary measurement plots (PMT) of 400 m² and 105 trees intensively studied. Diameter _{1.30 m}, total height, stem quality, illumination and crown shape of all the trees ≥ 10 cm. were measured. At the same time diameter growth, basal area and dominant height was evaluated. The soil analysis (0-12 cm. depth) carried out by Herrera (1996) were used. Slope percent, plot position on the slope and land shape were determined (Zech, 1994).

In 26 of the 41 plots evaluated, at least one individual of *C. alliodora* was present and in 32 of them *V. ferruginea*. Simple statistics and normality tests were carried out based on diameter growth information and correlation matrix, to know the relation between it and tree and site variables, for generating growth models afterwards.

44 *C. alliodora* individuals and 61 *V. ferruginea* were found, corresponding to the trees in the growth study. These were grouped in three diameter categories: individuals with diameter between 10-19.9 cm., 20-29.9 cm. and ≥ 30 cm. dap, during three growing periods (94-95, 95-96 and 96-97).

C. alliodora individuals included in the largest diameter category, presented the highest diameter growth during the first measurement period, but at the end of the last period were substituted with the trees from the smallest category. The trees in the middle diameter category for the three periods presented the lowest growth. For *V. ferruginea* the individuals included in the largest diameter category presented the biggest growth during the three periods, followed by the second category.

Regarding the highest association between the diameter growth and tree parameters, a lineal correlation was found with crown shape (-0.38) and height (0.18) in *C. alliodora*. On the other hand, the diameter growth of *V. ferruginea* correlated with illumination and crown shape (-0.60 and -0.58), diameter (0.56), height (0.45) and stem quality (-0.53). Neither basal area, nor dominant height presented any type of correlation with diameter growth for any of the two species. With respect to association between diameter growth and the parameters of the tree in study, a lineal correlation was found with height (0.52), crown shape (-0.27) and dbh (0.26) of *C. alliodora*. Diameter growth for *V. ferruginea* correlated with crown shape (-0.38), height (0.36), diameter (0.35) and stem quality (-0.27).

The adjusted multiple regression model [5] to predict diameter growth for *C. alliodora* in function of tree variables, explains 23% of the total variation on diameter increment including diameter and height in the model. The adjusted model to predict diameter growth for *C. alliodora* in function of variables of the tree in study, explains 27% of the total variation on diameter increment relating height, which doesn't make the model very practical, due to measurement mistakes. For *V. ferruginea*, model [6] explains 37% of the total variation on diameter increment in function to diameter and crown shape. The adjusted model to predict diameter growth of *V. ferruginea* in function of the variables of the tree in

study, only explains 12% of the total variation on diameter increment in function of diameter and crown shape, which isn't considered acceptable.

With respect to the evaluation of the association between diameter growth of individual trees by plot and site variables, a lineal correlation was found between acidity (-0.26), potassium (-0.21), land shape (0.20), zinc (0.19) and plot position on the slope (0.18) with diameter growth of *C. alliodora*. *V. ferruginea* correlated with clay percent and slope (-0.28, -0.25), calcium (0.18), land shape (-0.17), zinc (0.17), CICE (0.16), sand (0.15), magnesium (0.13), potassium (0.13). The adjusted regression model [7] to predict diameter growth of an individual tree of *C. alliodora* by plot, in function of site variables, explains 24% of the total variation on diameter increment in function to plot position on the slope, phosphorus and zinc. While for *V. ferruginea*, a only 16% of the total variation on diameter increment was obtained, in function of slope percent, plot position on the slope, potassium and CICE.

Model [8] was built based on the combination of *C. alliodora* diameter growth by plot and site variables, obtaining 86% of the total variation on diameter increment in function of potassium, acid percent, CICE, magnesium and zinc. Model [9] for *V. ferruginea* was built with the purpose to compare it with the one generated by Herrera (1996), who determined dominant height in function to site variables ($R^2 = 79.5\%$); this model explains 58.2% of the total variation on diameter increment in function to slope percent, phosphorus, potassium and acid percent.

Finally, the association between diameter growth in function to tree variables was evaluated, adding site variable with the purpose to evaluate the gain in the explained variation of diameter growth, while including in the models site variables. Model [10] for *C. alliodora* explains 27% of the total variation on diameter increment in function of diameter, height, crown shape and zinc. On the other side, model [11] for *V. ferruginea* specie, explains 47% in function of diameter, crown shape, plot position on the slope, land shape, calcium and zinc. A gain of only 4.3% and 9.5% exists in the explained variation with respect to Models [5] and [6], in spite of being formed by the double and triple of variables, respectively. Considering the little gain in the explained variation and the problems of building models with site variables, the utilization of these variables are not considered necessary for diameter growth prediction models.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vii
CONTENIDO.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE ANEXOS.....	xvii
1. INTRODUCCION.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
3. HIPOTESIS.....	3
4. REVISION DE LITERATURA.....	4
4.1. SUCESION SECUNDARIA.....	4
4.1.1. <i>Definiciones básicas</i>	4
4.1.2. <i>Importancia de la sucesión secundaria</i>	5
4.1.3. <i>Factores en común en las sucesiones forestales secundarias</i>	5
4.1.4. <i>Dinámica de la sucesión secundaria</i>	6
4.2. CRECIMIENTO EN BOSQUE HUMEDOS TROPICALES.....	8
4.2.1. <i>Factores que afectan el crecimiento</i>	9
4.2.2. <i>Razones para medir el crecimiento</i>	10
4.2.3. <i>Metodología de la predicción del crecimiento</i>	11
4.2.4. <i>Modelos de crecimiento y rendimiento</i>	14
4.3. CALIDAD DE SITIO.....	17
4.3.1. <i>Importancia de la calidad de sitio en el manejo forestal</i>	18
4.3.2. <i>Métodos para evaluar la calidad de sitio</i>	20
5. METODOLOGIA.....	30
5.1. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....	30
5.1.1. <i>Ubicación</i>	30
5.1.2. <i>Clima</i>	30
5.1.3. <i>Geología</i>	30
5.1.4. <i>Suelos</i>	31
5.1.5. <i>Hidrografía</i>	33
5.1.6. <i>Vegetación</i>	33
5.2. RECOLECCION Y ANALISIS DE LA INFORMACION.....	34
5.2.1. <i>Incremento en diámetro de las especies <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> según las variables intrínsecas de los árboles</i>	37
5.2.2. <i>Incremento en diámetro de las especies <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> según variables del sitio</i>	38
5.2.3. <i>Estimación del incremento diamétrico</i>	40
5.2.4. <i>Predicción del incremento diamétrico</i>	41

6. RESULTADOS Y DISCUSION.....	43
6.1. CARACTERIZACION ESTRUCTURAL Y SILVICULTURAL DE LAS POBLACIONES DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS	43
6.2. RELACION ENTRE EL INCREMENTO DIAMETRICO Y LAS VARIABLES DEL ARBOL	48
6.2.1. <i>Incrementos diamétricos de las especies estudiadas</i>	48
6.2.2. <i>Incremento diamétrico de los árboles de estudio intensivo</i>	50
6.2.3. <i>Asociación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol</i>	52
6.2.4. <i>Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico en función de las variables del árbol</i>	55
6.3. RELACION ENTRE EL INCREMENTO DIAMETRICO Y LAS VARIABLES DEL SITIO	62
6.3.1. <i>Asociación entre el incremento diamétrico del árbol individual por parcela y variables del sitio</i>	63
6.3.2. <i>Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico del árbol individual por parcela en función de las variables del sitio</i>	65
6.3.3. <i>Asociación entre el incremento diamétrico por parcela y las variables del sitio</i>	70
6.3.4. <i>Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico por parcela en función de las variables del sitio</i>	71
6.4. PREDICCIÓN DEL INCREMENTO DIAMETRICO A PARTIR DE VARIABLES DEL ARBOL Y DEL SITIO	80
6.4.1. <i>Asociación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol y del sitio</i>	81
6.4.2. <i>Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico en función de las variables del árbol y del sitio</i>	81
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
8. BIBLIOGRAFIA	91
9. ANEXOS	101
9.1. ANEXO 1	102
9.2. ANEXO 2	103
9.3. ANEXO 3	104
9.4. ANEXO 4	105
9.5. ANEXO 5	117

LISTA DE CUADROS

1.	Diagrama de pasos metodológicos y productos esperados	36
2.	Calidad de fuste, iluminación y forma de la copa ($N\ ha^{-1}$) de los árboles de <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> , presentes en las 41 parcelas de medición temporal. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.	46
3.	Calidad de fuste, iluminación y forma de la copa de los árboles de estudio intensivo de las especies <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> . Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.	47
4.	Matriz de correlación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol de las especies <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> . Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.	53
5.	Matriz de correlación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol de estudio intensivo las especies <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> . Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.	54
6.	Distribución de frecuencias de las unidades de muestreo en relación a las variables topográficas evaluadas. <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> . Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.	63
7.	Matriz de correlación entre la asociación del incremento diamétrico de las especies <i>C. alliodora</i> y <i>V. ferruginea</i> , y las variables del sitio por árbol individual por parcela. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica	64
8.	Comparación del incremento diamétrico en función de las variables del árbol (modelos [5]) y del sitio y [7] para la especie <i>C. alliodora</i> . Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.	70
9.	Comparación entre el modelo generado por Herrera (1996) y el modelo [9] para la especie <i>V. ferruginea</i> , obtenido en el presente estudio	79
10.	Comparación entre el modelo [5] y el modelo [10] para la especie <i>C. alliodora</i>	85
11.	Comparación entre el modelo [6] y el modelo [11] para la especie <i>V. ferruginea</i>	86

LISTA DE FIGURAS

1. Número de individuos (%) por clase diamétrica para la especie *C. alliodora* y *V. ferruginea*, presentes en las parcelas de medición temporal. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. 44
2. Numero de individuos (%) por clase diamétrica para los árboles de estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Costa Rica 44
3. Area basal por clase diamétrica ($m^2 ha^{-1}$) para las especies *C alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. 45
4. Incremento diamétrico por parcela de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. 50
5. Incremento medio anual de los árboles de estudio intensivo de la especie *C. alliodora*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. 51
6. Incremento medio anual de los árboles de estudio intensivo de la especie *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. 52
7. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables en el modelo, para la estimación del incremento diamétrico de la especie *C. alliodora*, según variables del árbol 56
8. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables en el modelo, para la estimación del incremento diamétrico de la especie *V. ferruginea*, según variables del árbol 60
9. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) error estándar (mm) con el número de variables en el modelo, para la estimación del incremento diamétrico del árbol individual por parcela de la especie *C. alliodora*. 67
10. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) error estándar (mm) con el número de variables en el modelo para la estimación del incremento diamétrico por parcela de la especie *C. alliodora*, según variables del sitio 72

11. Valores predichos a partir del modelo [8] y valores observados del incremento diamétrico de la especie *C. alliodora*. Finca el Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. (Adaptado de Herrera, 1996). 75
12. Relación entre el número de variables y el coeficiente de determinación (R^2) y su error estándar (mm) en la estimación del incremento diamétrico por parcela de la especie *V. ferruginea*, utilizando variables del sitio 76
13. Valores predichos a partir del modelo [9] y valores observados el incremento diamétrico de la especie *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. (Adaptado de Herrera, 1996). 78
14. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables del árbol y del sitio, para la estimación del incremento diamétrico por parcela, de la especie *C. alliodora* 82
15. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número variables del árbol y del sitio, para la estimación del incremento diamétrico por parcela, de la especie *V. ferruginea* 84

1. INTRODUCCION

En Centroamérica el aumento de la población ha incrementado la presión sobre los recursos forestales. Esto ha ocasionado la expansión de la frontera agrícola, un aumento considerable de incendios forestales y una mayor demanda de productos del bosque (madera, leña y productos no maderables). Por otro parte, el aprovechamiento controlado y la implementación de tratamientos silviculturales, son actividades que marchan a paso lento. Lo anterior ha hecho que los recursos forestales en la región sean objeto de un aprovechamiento irracional, que ha conllevado una disminución de la masa forestal en las últimas décadas. Ante este panorama se vuelve imperativo realizar investigaciones que permitan contar con herramientas propias, acordes a las condiciones de sitio, crecimiento, composición y aprovechamiento de las masas forestales.

A nivel regional se han desarrollado experiencias en rodales de *Pinus spp.* en México, Guatemala y Honduras, sobre calidad de sitio. En Costa Rica se ha realizado solo una investigación en bosques secundarios tropicales relacionada con este tema (Herrera, 1996), la cual arrojó resultados satisfactorios que justifican su seguimiento y ampliación.

La clasificación de sitios de acuerdo a su potencial productivo permite planificar investigaciones, faenas de mantenimiento, estimar con mayor precisión el crecimiento y rendimiento de los rodales, identificar y, eventualmente, modificar aquellas condiciones que lo perjudiquen, lo cual contribuye a proveer información que apoye las decisiones en torno a la política forestal nacional (Herrera, 1996).

El Proyecto Silvicultura de Bosques Naturales (PROSIBONA), trabaja en función de generar modelos de crecimiento para bosques tropicales secundarios. Estos estudios y otros modelos de crecimiento, tales como SIRENA, desarrollado por la Administración para el Desarrollo en Ultramar (ODA) en Costa Rica, CAFOGRAM por CPATU/EMBRAPA en Brasil, han incluido variables del rodal para la predicción

del crecimiento (Herrera, 1996). Sin embargo, no se han desarrollado aun modelos que incluyan variables relacionadas con el potencial del sitio. Por esta razón la presente investigación pretende conocer la variación adicional explicada del incremento diamétrico de las especies *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea*, incorporando en los modelos como variables predictivas, las variables intrínsecas del árbol y las variables del sitio, que sirvan como indicadores del potencial productivo del mismo.

El presente estudio se realizó en un bosque secundario en su tercera fase de sucesión en la zona Huetar Norte de Costa Rica, a partir del mes de abril de 1997, el cual pretende lograr los siguientes objetivos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Generar conocimiento científico sobre el efecto del sitio en la variación del incremento diamétrico de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* en un bosque tropical de la tercera fase de la sucesión secundaria.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Contribuir al entendimiento de la relación entre algunas variables intrínsecas del árbol con el incremento diamétrico de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*.
- Contribuir al entendimiento de la relación entre algunas variables del sitio con el incremento diamétrico de estas especies.

- Conocer la variación adicional explicada del incremento diamétrico, al incorporar las variables intrínsecas del árbol y las variables del sitio que sirvan como indicadores del potencial productivo.

3. HIPOTESIS

Es posible mejorar el ajuste de un modelo de crecimiento del incremento diamétrico construido a partir de parámetros intrínsecos del árbol, incluyendo alguna variable indicadora del sitio.

4. REVISION DE LITERATURA

4.1. SUCESION SECUNDARIA

4.1.1. Definiciones básicas

La "sucesión forestal" puede ser definida como un proceso que involucra el reemplazo ordenado de una comunidad por otra en un tiempo variable. Este usualmente implica un cambio en la composición florística, la fisonomía y la estructura de las comunidades (Budowski, 1965). Estos cambios son producto de la intervención humana o fenómenos naturales, lo cual conlleva a modificaciones en el suelo y en el microclima (Budowski, 1963; Spurr, 1964; Gómez-Pompa y Vásquez-Yáñez, 1981).

Finegan (1996d) en base a varias definiciones, describe la sucesión forestal como un proceso de cambio en la estructura y composición de la vegetación de un determinado sitio, de manera que a lo largo del tiempo, se encuentra en dicho sitio una serie de comunidades vegetales diferentes. A menudo cada comunidad es de mayor estatura y biomasa, y contiene más especies que la anterior.

Finegan (1992; 1996d) indica que las sucesiones se desarrollan sobre sitios que son abandonados después de que la vegetación natural es completamente destruida; se inician más comúnmente en tierras que son cultivadas (o ganadería) durante un tiempo y luego se abandonan. Cualquier fenómeno natural (e.g. los huracanes) que destruya un bosque, también da origen a una sucesión secundaria, porque se desarrolla sobre un suelo ya formado.

El "bosque tropical secundario" se define como la vegetación leñosa que se desarrolla en tierras que son abandonadas después de que su vegetación original es destruida por la actividad humana o por acciones naturales (Finegan, 1992)

4.1.2. Importancia de la sucesión secundaria

El recurso forestal principal de las regiones tropicales del mundo lo han constituido principalmente los bosques primarios que cubrían casi totalmente las zonas húmedas. Pero estas han sufrido un proceso importante de deforestación y han sido cultivadas durante algún tiempo y luego son abandonadas, por lo que en la actualidad existen millones de hectáreas de vegetación secundaria a nivel mundial. Según proyecciones de la FAO (1981), citado por Finegan (1992), para 1985 existían 23 y 83 millones de hectáreas de bosque secundario creciendo en tierras bajas abandonadas en México, Centroamérica, Islas del Caribe; y Sudamérica, respectivamente. Aunque las cifras ya están desactualizadas, no cabe duda que la superficie cubierta por bosques secundarios, sigue creciendo. A nivel regional las cifras pueden ser aún más impresionantes. El censo agrícola de Costa Rica para 1984 reportó 480,000 ha (9.4% del territorio) de vegetación secundaria creciendo en tierras agrícolas abandonadas (Costa Rica EPSA-FAO, 1986, citado por Finegan, 1992).

4.1.3. Factores en común en las sucesiones forestales secundarias

De acuerdo con Clements (1916), citado por Finegan (1996d) las características de una sucesión serán determinadas por los siguientes factores:

- El tipo de perturbación que crea el sitio en que se desarrolla la sucesión. La intensidad de la perturbación, duración y tamaño, determinan las condiciones del sitio, (Jordán, 1985, citado por Finegan, 1996d).
- Los propágulos que existían en el suelo en el momento de iniciarse la sucesión y los que son diseminados de fuentes aledañas.
- Las especies que logran establecerse, crecer y desarrollarse en el sitio, básicamente determinadas por la interacción entre los dos factores anteriores.
- El efecto de, o modificación producida, por la vegetación establecida y desarrollándose sobre las condiciones de sitio.

- La competencia, tanto intra como interespecifica, y otras interacciones bióticas tales como la herbivoría en el rodal.

4.1.4. Dinámica de la sucesión secundaria

El proceso de la sucesión secundaria, después de la tala del bosque original o en tierras agrícolas abandonadas no degradadas y con una fuente de semilla adecuada, puede describirse en tres etapas (Finegan y Sabogal 1988; Finegan 1992; Finegan 1996d).

- **Primera fase:** Durante los primeros meses después del abandono, el sitio es colonizado por especies pioneras herbáceas y arbustivas (e.g. familia Euphorbiaceae), (Budowski 1965) que forman una comunidad baja que puede ocupar el sitio hasta dos o tres años (Finegan 1992; Finegan 1996d). Las especies heliófitas efímeras se establecen rápidamente durante esta fase, la altura del dosel puede alcanzar 8 m y el diámetro promedio de 5 cm (Budowski, 1965).
- **Segunda fase:** Las heliófitas efímeras forman una comunidad de baja riqueza florística y dominada por una o pocas especies como los géneros *Ochroma*, *Cecropia*, *Inga* y *Trema* (Budowski, 1965; Finegan y Sabogal 1988). Estas especies son consideradas como especies sin valor comercial, crecen muy rápidamente (dos o tres años después del abandono del sitio) formando un dosel cerrado, eliminan las especies de la primera fase por su sombra y en menos de diez años la altura del dosel puede alcanzar 20 m o más.

La duración de esta fase puede oscilar entre unos diez años como ocurre en Costa Rica (Finegan y Sabogal, 1988) o veinte años o más. La fase termina con la decadencia de la población de heliófitas efímeras. Durante esta fase se establecen las heliófitas durables.

- **Tercera fase:** Las heliófitas durables crecen rápidamente después de la desaparición de las heliófitas efímeras, alcanzando de 25-30 cm de dap a los 10-15 años y 50 cm de dap a los 25 años en sitios en la zona atlántica de Costa Rica (Finegan y Sabogal, 1988). Al igual que las heliófitas efímeras, las heliófitas durables probablemente dominan el bosque secundario hasta la decadencia de sus poblaciones, lo que puede significar una fase entre tal vez 30 y más de 100 años de duración (Finegan 1992).

La regeneración cíclica en claros naturales probablemente no se inicia hasta un punto bastante avanzado de la tercera fase de la sucesión secundaria. La riqueza florística aumenta durante esta fase y el número de especies leñosas puede acercarse al número encontrado en bosques primarios (Finegan, 1992).

Según Finegan (1996d), los factores que afectan el proceso de sucesión secundaria son:

- La fertilidad del sustrato.
- El uso anterior del sitio.
- La distribución de fuentes de semilla y las estrategias de diseminación de las mismas.
- Las características intrínsecas de las especies.
- El uso durante el proceso de sucesión.

4.2. CRECIMIENTO EN BOSQUE HUMEDOS TROPICALES

El crecimiento está definido como el aumento en tamaño y/o unidad de peso (biomasa) de un organismo o comunidad viviente sobre un período de tiempo dado (Vincent, 1980) y su cuantificación se denomina incremento (Finegan, 1996d). En la producción de madera el crecimiento se considera en relación al fuste o parte utilizable del árbol (Vincent, 1980). Generalmente se expresa en diámetro, altura, área basal, o en algunos casos, pulpa en peso de árboles individuales, rodales, etc (Society of American Foresters, 1958; Vincent, 1980; Alder, 1980; Vanclay, 1994).

El crecimiento y edad de los bosques tropicales es un tema poco estudiado por los investigadores forestales, debido a la complejidad de los mismos. Sin embargo, todos coinciden en destacar la importancia de estos estudios con el fin de establecer los períodos de rotación y turnos de corta para los planes de manejo (Dance y Malleux, 1975).

A la cantidad de crecimiento en un período de tiempo determinado se le llama incremento. Por analogía se habla del incremento de una masa o bosque, diferenciándose tres tipos de incremento (Klepak, 1983; Alder, 1980; Finegan, 1996d):

- **Incremento medio anual (IMA):** Es el promedio anual del incremento total. Se obtiene dividiendo el rendimiento de un árbol o de un rodal entre su edad.
- **Incremento corriente anual (ICA):** Es el crecimiento alcanzado por un árbol o un rodal en un año. También puede entenderse como incremento periódico anual (IPA).
- **Incremento total (IT):** Es el crecimiento de un árbol o un rodal a lo largo de toda su vida.

En general el crecimiento de los árboles puede separarse en tres etapas (Vincent, 1980):

- Período de formación (crecimiento lento, pero aumentado).
- Período de incremento rápido (crecimiento rápido).
- Período de maduración (el crecimiento es lento y va disminuyendo).

4.2.1. Factores que afectan el crecimiento

Según Donoso (1981) existe una amplitud de factores que interaccionan afectando el crecimiento de los árboles, determinando incrementos o disminuciones en la productividad de los sistemas. Lojan (1965) y Reed (1980) mencionan que los principales factores que pueden ser escasos y por los cuales las plantas compiten los niveles de temperatura, luz (brillo solar), humedad y nutrientes del suelo. Los patrones de disponibilidad de estos recursos son la razón por la cual los incrementos tienen una distribución sesgada y coeficientes de variación grandes (Finegan, 1996d).

La competencia intra e interespecífica afecta el crecimiento de una manera denso-dependiente (Finegan, 1996b). El crecimiento diametral del árbol individual es afectado marcadamente por la densidad, y es muy sensible a los cambios que esta sufra (e.g. el aclareo). En las especies heliófitas aparentemente este es afectado en menor grado que el crecimiento longitudinal, mientras que en las esciófitas se da lo contrario (Baker, 1950). Las etapas de crecimiento del rodal son determinantes pues al inicio no habrá competencia y sesgo, mientras que en la etapa de competencia y raleo, las variaciones serán mayores.

Según Baker (1950) los individuos en una masa forestal representan diferentes ritmos de crecimiento. Muchos son eliminados a través del proceso de selección natural, por consiguiente el desarrollo e incremento de una masa es diferente al de un árbol. Hay dos elementos importantes que hacen que el

crecimiento de una masa forestal sea diferente al crecimiento de árboles individuales: Se requiere volumen y valor máximo por unidad de superficie y no por árbol de mayor crecimiento. El incremento anual es contrarrestado en parte por la mortalidad.

En un rodal coetáneo el criterio principal de agrupación de los árboles en clases de incremento es el tamaño del árbol al inicio del período de mediciones, donde el incremento aumenta conforme aumenta el tamaño del árbol. A veces la relación es tan fuerte que el tamaño inicial explica la mayor parte de la varianza del incremento (Finegan, 1996d).

4.2.2. Razones para medir el crecimiento

Según FAO (1981) y Hughell (1991) las predicciones de crecimiento y rendimiento son necesarias para:

- **Planificación de la producción:** Se podrán tomar decisiones racionales sobre intensidad y época de aclareos y explotaciones forestales si la respuesta de los bosques a estas operaciones puede cuantificarse.
- **Investigación silvicultural:** Existe una marcada relación entre estos estudios y prácticas cualitativas de investigaciones silviculturales por dos razones. La silvicultura de una especie puede determinar el tipo de modelo para apreciar su crecimiento y puede suministrar una base lógica para agrupar especies en bosques complejos. También un modelo cuantitativo puede ser usado para probar hipótesis silviculturales y para sugerir diseños experimentales y tratamientos que probablemente suministren resultados útiles.
- **Investigación ecológica y manejo ambiental:** Un modelo de crecimiento o rendimiento forestal puede indicar la cantidad de luz que llega al suelo en las diferentes épocas del ciclo de crecimiento; puede adaptarse rápidamente para

mostrar la biomasa y la tasa de producción de una cosecha de árboles. Así mismo la duración del ciclo de crecimiento es una información importante para el manejo de la fauna silvestre.

4.2.3. Metodología de la predicción del crecimiento

Según Alder (1980) la metodología de la predicción del crecimiento y rendimiento abarca las fases siguientes:

4.2.3.1. Estimación del crecimiento

La dificultad mayor en las mediciones son de índole práctico, tal como accesibilidad al bosque, delimitación y medición de las parcelas y el mantenimiento de parcelas permanentes durante largos períodos de tiempo (Alder, 1980).

El promedio del incremento no representa adecuadamente el crecimiento de la población estudiada, por sobrestimar el crecimiento de la mayoría de los árboles y a la vez subestima el crecimiento de los mejores árboles del rodal. Por lo anterior se debe tratar de agrupar árboles de incrementos parecidos e identificar sus características comunes dentro de cada grupo y si los datos no son normales se debe utilizar la mediana, moda y los cuartiles (Finegan, 1996d).

Cuando se establecen estudios intensivos de crecimiento la unidad básica de muestreo es el árbol individual (Dawkins, 1956). Sin embargo, por conveniencia se establecen parcelas y se miden todos los árboles dentro de ellas (Alder, 1980).

Arboles individuales

La medición del crecimiento en árboles individuales generalmente se realiza para las variables diámetro, altura y volumen (Baker, 1950). Dawkins (1956) realizó esta técnica únicamente para determinar el crecimiento del incremento diamétrico en árboles de estudio intensivo. El procedimiento consiste en pintar 10 anillos paralelos

a cada árbol, el espacio entre ellos no tiene importancia con tal de que estén a una pulgada de diferencia de circunferencia entre el mayor y el menor anillo. El proceso de medición consiste en obtener la mejor de tres lecturas de cada anillo y el promedio de las diez correspondientes a cada árbol es expresado en centésimos de pulgada.

Dawkins (1956) en un estudio realizado en Africa midió el crecimiento semanal de las especies *Lovoa brownii* y *Entandrophragma angolense* y encontró correlación significativa entre el crecimiento diamétrico y la lluvia en el período lluvioso (exceptuando el período de floración y de follaje). En *Lovoa brownii* la correlación se dividió en dos partes bien definidas: la del período inerte y la del activo, pero no encontró correlación entre horas sol y el crecimiento.

Lojan (1965) en un estudio llevado a cabo en Turrialba, Costa Rica, seleccionó seis especies, en cada una tomó un número variable de árboles sobre los cuales marcó cuatro anillos a 1.30, 1.40, 1.50 y 1.60 m del suelo. Sobre estas marcas midió el diámetro cada catorce días. Encontró una correlación positiva entre el crecimiento y la cantidad de lluvia y número de días con lluvia y una correlación negativa con el brillo de sol.

Parcela de medición temporal (PMT)

Son parcelas circulares, rectangulares, lineales o fajas que no serán identificadas permanentemente en ninguna forma y serán medidas solo una vez al momento de su establecimiento (John & Tschinkel, 1971).

Las parcelas temporales se usan primordialmente para la estimación de las relaciones independientes del tiempo. Sin embargo esta distinción no es tan clara pues existe la posibilidad de determinar relaciones dependientes del tiempo con la información de los anillos de crecimiento, en situaciones donde éstos existen (Alder, 1980).

Parcela de medición permanente (PMP)

Parcelas que son permanentemente marcadas al momento de establecerse y al iniciar la medición para que pueda ser ubicada a intervalos periódicos, para nuevas mediciones (mínimas de 5 años). Generalmente todos los árboles en estas parcelas son identificados y marcados individualmente (John & Tschinkel, 1971). Muchos forestales consideran que los datos obtenidos de parcelas permanentes de muestreo son la contribución más importante para los modelos de crecimiento y rendimiento (Alder, 1980).

Synnott (1991) indica que una red de PMP es un inventario forestal continuo, si se ubican correctamente de manera que sea una muestra representativa del bosque y se evalúan regularmente, suministrarán información confiable para estimar:

- Cambios en el número, tamaño y especies del bosque a lo largo del tiempo.
- Variación en la composición y producción respecto al sitio (vegetación inicial, altura, diámetro, y volumen de la masa).
- Las relaciones entre las variables de árboles individuales (altura, diámetro y posición de la copa), del rodal (área basal local y volumen) e incrementos (altura, diámetro, área basal y volumen por árbol o por parcela), que pueden usarse para predecir futuros incrementos de marca y producción.
- Cambios a largo plazo (mejoramiento o degradación) en el sitio y su capacidad productiva.

Según John & Tschinkel (1971); Alder (1980) y Synnott (1991) los aspectos generales a considerar para el establecimiento de una red de PMP, son

- **Cantidad de PMP:** Se determinan en función de la variación del sitio.
- **Ubicación de las PMP:** Se hace en función de calidad de sitio, densidad y turno de corta.
- **Tamaño de las PMP:** Está en función del tipo de bosque, la homogeneidad de la masa forestal y la distribución de las especies. Herrera (1996) determinó que el

tamaño ideal de parcela para el sitio de estudio (bosque secundario) fue de 0.4 ha; Mientras que Alder y Sinnott (1992) recomiendan 1 ha para bosque primario.

- **Forma de las PMP:** Se determina en función de la topografía y tamaño del bosque. Generalmente pueden ser cuadradas, rectangulares o circulares.
- **Frecuencia y época de mediciones:** Está en función de la tasa de crecimiento y efectos estacionales (Campos, 1989b).

4.2.4. Modelos de crecimiento y rendimiento

Un modelo para la predicción del crecimiento y rendimiento de árboles y masas forestales, es una expresión matemática desarrollada con base en datos de parcelas de crecimiento (información empírica) y conocimientos biológicos del crecimiento de las especies que estima el valor de un parámetro de la masa arbórea, como la altura, diámetro, la biomasa o un conjunto de parámetros (Hughell, 1991). Consiste en un conjunto de ecuaciones o gráficos que muestran las relaciones cuantitativas entre estas variables.

El modelo ideal es aquel en que la salida (variables de importancia silvicultural, financiera y económica) depende de todos los niveles de entradas (variables disponibles para los técnicos y/o profesionales forestales) y que permite al usuario considerar la aplicación de entradas a diferentes tiempos durante la vida del bosque (Chan, 1989; Nautiyal y Belli, 1989; citados por Hughell, 1991).

Los modelos de crecimiento son herramientas eficientes para transformar los datos empíricos y los conocimientos silviculturales en información clave para realizar análisis financieros y programar el manejo de los bosques (Hughell, 1990; Vanclay, 1994). El procedimiento de ajuste de un modelo puede ser estadístico o subjetivo (Hughell, 1990).

Según Hughell (1991) los modelos de crecimiento son elaborados con varios propósitos:

- Estimar la producción futura para determinar el turno óptimo y realizar análisis financieros y económicos.
- Estimar el crecimiento bajo condiciones donde no existen datos.
- Comparar alternativas de manejo para analizar el uso de la tierra.
- Simular prácticas silviculturales.
- Sintetizar hipótesis conocimientos y datos experimentales en una expresión inteligente del comportamiento de los bosques (modelos ecológicos).
- Formular políticas forestales.

Este autor menciona también que existen varios criterios para clasificarlo, siendo los más importantes:

- **Modelos empíricos vs. biológicos:** El modelo empírico está basado principalmente en datos de campo manipulados mediante procedimientos estadísticos. Contrariamente el biológico se basa en principios biológicos (fisiológicos).
- **Modelos determinísticos vs. estocásticos:** Un modelo determinístico es aquel que da como resultado una sola respuesta. El estocástico da una respuesta diferente cada vez que se aplica.
- **Modelo de iteración (simulación) vs. integración:** El primero empieza con las condiciones iniciales y va agregando los incrementos anuales, año por año, hasta llegar a la edad que se desea predecir. Al contrario, el modelo de integración es el que determina directamente las condiciones de la masa arbórea sin tener que pasar por las condiciones de los años anteriores.

Hughell (1991); Camacho (1996) y Vanclay (1994) indican que dependiendo del nivel de información manejada por el modelo, éstos se pueden clasificar en:

- modelos del rodal.
- modelos por distribución diamétrica.
- modelos para árboles individuales (distancia dependiente e independiente).

4.2.4.1. Origen de los datos

El origen de los datos para la determinación del crecimiento puede ser obtenida a través de árboles individuales (Dawkins, 1956), parcelas temporales y parcelas permanentes de muestreo establecidas especialmente a través de inventarios forestales continuos (Alder, 1980).

4.2.4.2. Prueba del modelo para su validación

Una vez construido el modelo debe ser probado para determinar su validez y precisión (Alder, 1980). Esta operación es preferible hacerla con un segundo conjunto de datos que no hayan sido utilizados para ajustar ninguna de las funciones del modelo (Hughell, 1990 y 1991). El modelo se usa para predecir el comportamiento de los rodales que han suministrado los datos de la comprobación y los resultados se comparan con observaciones reales. Es necesario repetir el proceso de validación varias veces, haciendo ajustes o correcciones al modelo, para corregir las anomalías presentadas (Alder, 1980) las cuales se pueden deber a:

- Los datos originales pueden presentar un patrón diferente de comportamiento del crecimiento, que los datos con los cuales se prueba.
- Utilización de métodos inapropiados de ajuste de las ecuaciones.
- Extrapolación de las funciones durante la comprobación del modelo.
- El modelo puede volverse inestable cuando abarca un sistema de ecuaciones en conjunto.

- Errores humanos durante la transcripción o aplicación de las ecuaciones o gráficos.

4.2.4.3. La aplicación del modelo para el uso final requerido

Esencialmente los modelos pueden ser aplicados en una de las tres formas siguientes

- Como una simple tabla o gráfico.
- Como un programa de computación en forma de subrutina contenido en un programa general de planificación forestal (Alder, 1980).
- Conjunto de esto; como un programa para un ordenador o computador que pueda producir una tabla o gráfico de crecimiento para un conjunto particular de tratamientos.

4.3. CALIDAD DE SITIO

Un "sitio" puede ser definido como un lugar en la superficie de la tierra y los factores climáticos, del suelo y bióticos que constituyen su medio ambiente, y que en conjunto, determinan la capacidad del área para desarrollar árboles u otro tipo de vegetación (Society of American Foresters, 1958; Vincent, 1980; Carmean, 1975; Donoso, 1981; FAO, 1985).

Los "factores de sitio" son los factores del medio ambiente que determinan la calidad del sitio y, por lo tanto, el potencial de crecimiento o productividad de los árboles del rodal (Donoso, 1981).

El "índice de sitio" se define como la altura promedio de los árboles dominantes de un rodal coetáneo en un área y a una determinada edad (edad típica, edad base o edad índice). Se considera la medida más comúnmente

aceptada y conocida para evaluar el potencial productivo de una especie en un ámbito variado de sitios y condiciones experimentales (De las Salas, 1974; Alder, 1980; Ortega y Montero, 1988; Campos, 1989a; Hughell, 1990).

En el campo del manejo forestal la "calidad de sitio" puede ser definida como la capacidad potencial de producción de madera de un sitio para una especie forestal particular (FAO, 1985), u otro tipo de vegetación como producto de la interacción de los factores bióticos, climáticos y edáficos de un área (Society of American Foresters, 1958 Spurr, 1964). El hecho de que esta capacidad sea muy variable hace que los sitios sean muy diferentes en cuanto al potencial de crecimiento de la vegetación; habrá entonces sitios buenos, medianos y pobres en términos relativos (De las Salas, 1974; Donoso, 1981).

4.3.1. Importancia de la calidad de sitio en el manejo forestal

En la actualidad muchas de las operaciones de manejo forestal no consideran la calidad de sitio y la productividad, por lo que varias inversiones han resultado en fracasos y pérdidas de dinero por ser realizadas en sitios cuyas características no ofrecen las condiciones ideales para el desarrollo óptimo del bosque, tanto desde el punto de vista ecológico como productivo.

La estimación de la productividad forestal es de gran importancia en ecología y manejo forestal (Spurr y Barnes, 1980; citados por Campos, 1989a). Desde el siglo pasado se han desarrollado estudios con la intención de clasificar la capacidad productiva de un sitio desde el punto de vista forestal. Por lo que Jadán (1972), Alder (1980), Ortega (1986) y Escobedo (1995), consideran que la determinación de la calidad de sitio en el manejo forestal es útil para planificar la producción e investigación forestal, selección de la especie adecuada y predicción del rendimiento (Philip, 1983; citado por Campos, 1989a). Es una información indispensable para lograr el objetivo de asegurar el aprovechamiento racional y sostenido del bosque.

En plantaciones a nivel comercial para hacer una planificación efectiva se requiere información sobre el rendimiento de las especies en diferentes condiciones de sitio (John y Tschinkel, 1971), porque el tamaño de los productos forestales y sus valores a diferentes edades está controlado por la capacidad de producción del sitio, la densidad del rodal, y los sistemas de manejo silvicultural. Buenos sitios responden y usualmente justifican manejo intensivo para producción de madera, mientras que sitios pobres pueden justificar solamente manejo extensivo (Auten, 1945).

El objetivo de la evaluación de la calidad de sitio se puede definir como: la clasificación de sitios con el propósito de asignar a cada uno su capacidad de producir madera o celulosa Spurr (1952), citado por Vincent (1980), o para cualquier producto proveniente del vuelo del rodal (Alder, 1980). Mader (1963) citado por Vincent (1980) señala al crecimiento como el factor clave en el manejo forestal y la calidad de sitio el factor clave en el crecimiento.

Vincent (1980) define los principales objetivos de la evaluación de la calidad de sitio de la manera siguiente:

- Estimación del rendimiento global de las plantaciones forestales.
- Planificación y ejecución de trabajos de investigación.
- Programación y ejecución de trabajos de mantenimiento de las plantaciones.
- Extrapolación o extensión de la clasificación de calidad de sitio a áreas aún sin plantar para la selección de sitios a plantar.
- Selección de los mejores genotipos (especies y procedencias) para uno o más sitios en particular (Herrera, 1996).

Además se considera que contribuye en la planificación a nivel sectorial para tomar decisiones en cuanto a la autorización de actividades de manejo y repoblación forestal.

Carmean (1975) considera que la ventaja de concentrar el manejo intensivo sobre los sitios más productivos se traduce en:

- Los sitios buenos producen una mayor y mejor calidad de los productos (Carmean and Boyce, 1974 citado por Carmean, 1975).
- En estos sitios los árboles crecen rápidamente, las inversiones de producción son más cortas, por lo que se minimizan los intereses de inversión forestal.
- Las especies de árboles de mayor valor muchas veces requieren mejores sitios.
- Los mejores sitios pueden responder mejor a los tratamientos silviculturales intensivos, tales como raleos, fertilización y drenaje.

4.3.2. Métodos para evaluar la calidad de sitio

Según Herrera (1993) citado por Herrera (1996) existen diferentes formas de clasificar los métodos de evaluación de la calidad de sitio, dependiendo del criterio utilizado para su estimación. En general los investigadores tienden a seguir tres criterios básicos siempre dependientes:

- **Ecológicos:** Incluyen elementos del clima y del suelo, especialmente los correlacionados con el crecimiento de los árboles.
- **Dasométricos:** Incluyen la producción de las masas forestales, relacionándolas con el desarrollo y evolución de las características métricas estrechamente ligadas con el volumen maderable.
- **Florísticos:** Tiene como punto de partida el estudio fitosociológico del medio donde se estableció el rodal.

En base a los criterios mencionados anteriormente, la calidad de sitio se puede medir, evaluar y/o estimar mediante métodos directos y métodos indirectos (Carmean, 1975; Daniel *et al.*, 1979; Clutter, *et al.* 1983).

4.3.2.1. Métodos Directos

Según Carmean (1975); Donoso (1981); Clutter *et al.* (1983), estos métodos son los procedimientos con los cuales es posible conocer (estimar) la cuantía de las existencias volumétricas máximas que un sitio puede sostener, los cuales se basan en:

Estimación de la calidad de sitio a partir de datos históricos de rendimiento

Este método se basa en el principio de evaluación de calidad de tierras en la agricultura, o sea en el promedio de los rendimientos previos de la cosecha obtenidos en un área determinada, durante un período de tiempo. Existen pocas áreas en el mundo donde estas estimaciones pueden ser aplicadas, debido al aprovechamiento intensivo de los bosques, siendo sus rendimientos afectados por las variaciones del rodal, densidad del rodal y por la composición de especies, que por diferencias en la calidad de sitio. (Clutter *et al.* 1983).

Estimación basada en datos de volumen del rodal

Clutter *et al.* (1983) indican que es posible obtener información de la calidad de las tierras a partir de la relación volumen-edad. Por lo tanto la medida de la calidad se expresa como el volumen a una edad determinada. El uso de la variable volumen obedece que es la característica dasométrica que mejor representa la calidad de sitio de un lugar determinado. Sin embargo, varía en función de la densidad, principalmente. El crecimiento en volumen ha sido la variable principal para la clasificación de sitios en Europa (Tesch, 1981).

Los dos métodos descritos están basados en los datos de volumen para la estimación de la calidad de sitio. Esto implica la evaluación de la capacidad de producir volumen de madera, por lo tanto, este debería ser el parámetro a usar para la evaluación. Sin embargo Donoso (1981) y Vincent (1980) indican que tiene el inconveniente de ser afectado por los siguientes factores:

- Edad y turno.
- La composición de especies (bosques naturales).
- Aspectos patológicos y del bosque.
- El tipo de intervenciones silvícolas o cortas aplicadas al bosque.
- Los factores genéticos (variedades, razas, ecotipos, etc).
- La capacidad productiva innata de los terrenos.
- La densidad del rodal, principalmente.

Estimación basada en datos de la altura del rodal

Según Alder (1980) la altura de un rodal uniforme a una edad dada es un buen indicador del potencial productivo de este tipo de bosque en ese sitio particular. Por eso la construcción de curvas altura/edad para diferentes clases de sitio, es el primer paso en la construcción de modelos de rendimiento y crecimiento. La altura es una de las herramientas en la clasificación de sitios a la cual se le atribuyen las siguientes ventajas en su utilización (Alder, 1980; Tesch, 1981; Vincent, 1980):

- Es una medida sensitiva de diferencias en sitios porque a diferencia de los otros parámetros dasométricos (dap y área basal), casi no es influenciada por tratamientos de manejo y por lo tanto expresa mejor la condición del sitio.
- La altura es hasta cierto grado independiente de la densidad y la mezcla de especies.
- La relación altura/edad es fácil de determinar.

Vincent (1980) menciona que existen tres criterios principales respecto a la altura como estimador de la calidad de sitio.

- **Altura máxima (top height).** Promedio de los cien árboles de mayor diámetro por hectárea (Alder, 1980). Tiene el inconveniente de que a veces los árboles más gruesos, no son los más altos, ya que el mayor grosor puede ser el resultado de

un mayor espacio de crecimiento debido a factores casuales. El diámetro es más influenciado por la densidad que la altura (Vincent, 1980).

- **Altura promedio:** Altura del árbol de área basal promedio. La altura también puede ser definida como la altura de los árboles dominantes y co-dominantes; sin embargo esta forma no es empleada frecuentemente ya que algunas veces se dificulta su medición (Keogh, 1982; citado por Ortega, 1986). Esta tiene el inconveniente de que puede estar influenciada en cierto grado por la densidad, ya que son más afectados por la competencia que los árboles más altos, aunque se ha señalado que la densidad no afecta el crecimiento longitudinal en forma significativa (Vincent, 1980).
- **Altura mayor (dominante).** Se define como la altura promedio de los cien árboles más altos por hectárea. Se le llama a veces altura tope (Alder, 1980). Esta es una manifestación de la productividad del sitio relativamente independiente de densidad, ya que los árboles más altos son los más desarrollados y por consiguiente los que sufren relativamente menos competencia de sus vecinos (Vincent, 1980). Voorhoeve y Schulz (1968); citados por Ortega (1986) comparten este criterio, pues expresan que en plantaciones coetáneas las diferencias evidentes en altura mayor deben explicarse por diferencias de sitio, los árboles más altos ocupan los mejores sitios y los de menor altura los sitios más pobres.

Alder (1980), Clutter *et al.* (1983) y Hägglund (1981) manifiestan que en rodales coetáneos, la altura dominante, es la mejor medida de la productividad del sitio, ya que para muchas especies forestales, dentro de ciertos límites de edad, es poco afectada por la densidad del rodal y está estrechamente relacionada con la producción en volumen. Ortega y Montero (1988) indican que la altura dominante es menos sensible a las claras y, en general a cualquier tratamiento silvícola.

4.3.2.2. Métodos indirectos

Según Carmean (1975), Donoso (1981) y Clutter *et al.* (1983) estos métodos consisten en los procedimientos con los que es posible expresar a través de algunas características indicadoras, la capacidad productiva de un lugar, los cuales no necesitan la existencia de bosque en el terreno a evaluar. Dentro de estos métodos podemos mencionar:

Estimaciones de calidad de sitio a partir de relaciones entre especies del dosel superior

Estos métodos se deben aplicar cuando la especie (tipo de bosque) de interés no está presente en el área bajo evaluación. En situaciones donde otro tipo de árboles está presente en el sitio de interés, se hacen medidas de esta vegetación y estos datos se pueden usar para evaluar la calidad de sitio de la especie deseada (Clutter *et al.*, 1983).

En una aplicación de este procedimiento, Colie (1948) citado por Clutter *et al.* (1983), midió la dominancia y codominancia de muestras de pinos de acículas y de hoja corta en parcelas de pie de monte en Carolina del Norte, Estados Unidos, donde ambas especies estaban presentes. Para cada parcela fue calculado por regresión el índice de sitio del pino de acículas como variable independiente y el índice de sitio del pino de hoja corta como la variable dependiente.

Por su parte Carmean (1975) menciona que el crecimiento en altura de los árboles dominantes y codominantes, son indicadores de la calidad de sitio, la cual se puede considerar como un integrador de los rasgos del bosque, importante para el crecimiento de los árboles. Igualmente la presencia, constancia, ocurrencia y tamaño de las plantas, pueden ser indicadoras útiles de calidad de sitio del bosque. Se han usado plantas indicadoras extensamente en Finlandia, Suecia, Latia (Jones, 1969, citado por Carmean, 1975), así como en Canadá, donde se han hecho estudios importantes sobre árboles de abeto, pino etc.

Sin embargo, Donoso (1980) menciona que los árboles como indicadores de sitio, tienen el inconveniente de tener amplias distribuciones ecológicas debidas a una gran tolerancia a diferentes condiciones de sitio por esta razón su sola presencia no sirve normalmente como indicador de la calidad de sitio.

Estimación de calidad de sitio a partir de las características de la vegetación menor

Existen evidencias de que ciertos tipos de vegetación están asociados con condiciones de suelos forestales relativamente fértiles, mientras que otros tipos de vegetación están asociados con condiciones infértiles o con el índice de sitio de especies forestales (Taylor, 1932).

Según Donoso (1981) la vegetación de un área determinada (indicadores forestales) es el reflejo de las condiciones del sitio, por lo que el uso de ciertos parámetros ecológicos como la presencia, frecuencia y abundancia relativa, puede ser útil para determinar la calidad del sitio. Normalmente se emplean como indicadoras algunas plantas características del sotobosque. Especialmente aquellas de vida más corta son mejores indicadoras del sitio que los árboles y especies de vida larga porque:

- Estas plantas son más sensibles que los árboles en el sentido de que después de que un bosque sufre algún tipo de alteración estas especies alcanzan un equilibrio con las condiciones del sitio en forma más rápida que los árboles y especies de larga vida (Husch, 1963; citado por Donoso, 1981).
- Generalmente el área de distribución ecológica de estas especies, es más restringida que en el caso de los árboles, esto las transforma en indicadoras relativamente fieles de un tipo de sitio específico.

Clutter *et al.* (1983) indica que muchos factores ambientales afectan la vegetación del sotobosque, por lo tanto es razonable esperar que las características de estas especies, puedan proporcionar información sobre la calidad de sitio. La composición de estas especies es muchas veces un excelente indicador del suelo

húmedo superficial y el grado de abundancia de las mismas comúnmente refleja su fertilidad.

Donoso (1981) menciona que existen limitaciones de las especies del sotobosque como indicadores del sitio aduciendo que este tipo de vegetación es muy afectado por la composición del bosque, por la densidad del rodal y por el manejo o historia que haya experimentado el rodal. Así mismo indica que estas plantas poseen raíces superficiales y por consiguiente no dan una indicación de las condiciones del suelo en los horizontes más profundos. Sin embargo, Finegan (1996b), indica que en los primeros 0 a 30 cm de profundidad del suelo se da el mayor desarrollo de raíces y es donde ocurre la mayor concentración de nutrientes y por lo tanto, el desarrollo de las plantas depende más de las capas superficiales del suelo y no de los horizontes más profundos.

Carmean (1975) indica que algunos estudios basados en los métodos europeos y canadienses han mostrado relaciones entre el índice de sitio y varias especies indicadoras del sotobosque. Otros estudios consistieron en identificar varias comunidades de plantas del sotobosque que fueron listadas a lo largo de una gradiente ambiental o de calidad de sitio (espectro de plantas indicadoras). El índice de sitio es entonces estimado por notar la frecuencia y abundancia de estas especies clave (Hodgkins, 1960 y 1968; Spurr y Barnes, 1963, citados por Carmean, 1975). Sin embargo, no existen este tipo de estudios para bosques tropicales, donde su gran diversidad de plantas podría hacer más difícil encontrar plantas indicadoras.

Estimación de la calidad de sitio a partir de factores climáticos, edáficos y topográficos

“Existen algunas situaciones en las cuales la vegetación no puede ser usada como indicador de la calidad de sitio o de la productividad forestal como es el caso de las áreas deforestadas, intervenciones por faenas agrícolas, forestales o ganaderas u otro tipo de alteraciones. En estos casos se puede efectuar un análisis

de los factores del medio ambiente que influyen en el área con el objeto de estimar la calidad de sitio" (Donoso, 1981).

Vincent (1980) indica que en relación a la calidad de sitio no es posible estudiar los factores del medio ambiente en forma individual porque estos actúan en conjunto con interacciones y relaciones complejas sobre el crecimiento de los árboles. La calidad de sitio no depende de un factor ni de todos los factores del medio ambiente, sino de los factores efectivos y las interacciones entre ellos.

Según Spurr y Barnes (1973) citados por Donoso (1981) indican que la precipitación y la temperatura son los factores del clima que tienen mayor influencia sobre la distribución y el crecimiento de los bosques y pueden usarse como índice de productividad forestal a nivel regional. Donoso (1981) señala que aunque se han establecido correlaciones entre la lluvia caída y el crecimiento, este factor está fuertemente afectado por las características del suelo y de la topografía e interactúa con la temperatura, de tal modo que no resulta práctico y su uso es de poco valor como indicador del sitio. Por lo tanto, un índice de sitio basado solo en los factores climáticos, no es lo suficientemente preciso como para determinar la calidad de los sitios forestales (Myssonen, 1971; citado por Donoso, 1981). En general la calidad de sitio mejora en la medida que aumenta la temperatura y la precipitación, pero hasta ciertos límites, ya que por encima de estos se pueden producir efectos negativos, que hacen más baja la calidad del sitio (Donoso, 1981).

La calidad de sitio está determinada en gran medida por las propiedades del suelo que influyen en la calidad y cantidad del espacio de crecimiento para las raíces de los árboles (Coile, 1952). Parte de los estudios realizados en suelos en relación con el índice de sitio ha puesto especial importancia en aquellos factores topográficos o del suelo que reflejan o influyen en la disponibilidad de humedad del suelo.

Otro elemento relacionado con el suelo que afecta el crecimiento de los árboles y por consiguiente al sitio, es la disponibilidad de nutrientes por las raíces (Jones, 1969; citado por Donoso, 1981). La exposición y la pendiente tienen un notable efecto sobre la distribución de la vegetación en las regiones montañosas (Donoso, 1981).

La topografía no ejerce influencia directa sobre el crecimiento vegetal pero condiciona una serie de factores que si pueden influir sobre los procesos fisiológicos de los árboles ya que influye sobre el desplazamiento del agua dentro y sobre el suelo, lo que a su vez determina el desarrollo del suelo mismo, aumento de la posibilidad de lixiviación de nutrimentos (John y Tschinkel, 1971) y mayor acumulación de materia orgánica (Vincent, 1980), así como mayor grado de erosión de los suelos.

La topografía se relaciona estrechamente a diferencias en microclima, y a través de sus tres elementos aspecto, exposición y posición, modifican el contenido de humedad del suelo, el régimen de nutrición, temperatura del suelo y la luminosidad que este recibe, por lo que tiene una marcada influencia sobre la calidad de sitio (Auten, 1945). Las diferencias entre las mejores y peores clases de drenaje del suelo, así como la profundidad del mismo, determinan su productividad (Isolán, 1972; Ortega, 1986).

En un estudio realizado en Costa Rica para evaluar el efecto del sitio sobre las especies *V. ferruginea* y *C. alliodora*, (Herrera, 1996), determinó que estas especies se distribuyen en el bosque de acuerdo a una gradiente edáfica y topográfica. En los sitios donde dominó *C. alliodora*, la acidez intercambiable en los primeros 12 cm fue con mayor frecuencia baja, mientras que en los sitios asociados con *V. ferruginea* esta fue mayor. *V. ferruginea* prefiere sitios con mayor pendiente que *C. alliodora* (32 y 20%, respectivamente), muestra menos exigencia en cuanto a fertilidad, desarrollándose en suelos más pobres, con menores concentraciones de Ca, Mg, K,

Cu y S. En cuanto a las condiciones físicas la especie se estableció en suelos más pesados, con un contenido mayor de arcilla.

La altura dominante en *C. alliodora* no presentó correlación con ninguno de los factores edáficos estudiados, mientras que para *V. ferruginea*, las mayores alturas dominantes se asociaron con sitios de bajos contenidos de arcilla hasta los 12 cm de profundidad, menos contenidos de P, Fe, M0 y mayor contenido de Cu.

Ortega (1986) encontró en Turrialba, Costa Rica, que el Cu mostró correlación con la calidad de sitio para *Pinus caribaea var. hondurensis*, lo que podría indicar algún tipo de relación directa entre los contenidos de Cu y el crecimiento de la especie. Sin embargo, en ensayos de fertilización en Queensland (Lamb, s.f.; citado por Ortega, 1986), no obtuvo respuestas a las aplicaciones de Cu. Este autor encontró que el drenaje de los suelos son los principales factores limitantes de orden físico lo cual fue corroborado por Isolán (1972) en plantaciones de ocho años para las mismas condiciones de sitio.

5. METODOLOGIA

5.1. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

5.1.1. Ubicación

La presente investigación se realizó en la finca "El Cerro", ubicada en el Distrito Segundo Florencia, Cantón Décimo San Carlos, Provincia de Alajuela, Costa Rica (Anexo 1). Geográficamente, se ubica en las coordenadas 10°21' de latitud norte y 84°28' de longitud oeste (Instituto Geográfico Nacional 1988, citado por Colán 1995). El área total de la finca es de 197 ha (Vásquez, 1994); el estudio se ejecutó en un área de 32.5 ha (Herrera, 1996). La elevación varía entre 280-360 msnm.

5.1.2. Clima

Según la clasificación de Holdridge (1978) la finca se encuentra dentro de la zona de vida bosque muy húmedo tropical, transición a basal (bhm-T). Las estaciones meteorológicas Ciudad Quesada (ubicada 5 km al este de la finca y 600 msnm) y Quebrada Azul (7 km al norte de la finca y 83 msnm). reporta 4574 mm y 3375 mm de precipitación promedio anual y 27.1 °C y 28.1 °C de temperatura promedio anual respectivamente. Para ambas estaciones marzo y abril son los meses menos lluviosos, los que a la vez son los más calientes y la humedad relativa media anual es de 89% (Vásquez 1994, Colán 1995, Herrera 1996).

5.1.3. Geología

Según Vásquez (1994), en la zona de estudio predominan depósitos laháricos extensos (lavina), dispuestos en forma heterogénea, en un relieve ondulado a fuertemente ondulado. El área se encuentra dentro de la zona de influencia del macizo del Poás, en donde ocurren todo tipo de rocas volcánicas, pero

principalmente de composición andesítica (Madrigal y Rojas, 1980 citados por Vásquez, 1994).

5.1.4. Suelos

Variaciones físicas

Los valores mínimos, máximos, medianos y el coeficiente de variación de las diferentes variables físicas del suelo presentes en los sitios muestreados (0 - 12 cm de profundidad) se presentan en el Cuadro 1 del Anexo 4. Se reportan valores medianos por ser la medida de tendencia central (en el presente caso) que mejor representa los valores cuando la distribución de las variables no se ajustan a la normalidad (Gujarati, 1993).

En los sitios dominados por *C. alliodora* el porcentaje de arcilla presenta un valor mínimo de 44%, máximo de 60% y un valor mediano de 52%; es la variable física que presenta los mayores valores y a la vez el menor coeficiente de variación (8%), lo que indica que los suelos del área de estudio son en su mayoría de textura arcillosa. Estos resultados se confirman al observar los valores reportados para la especie *V. ferruginea* los cuales son aún mayores (44, 66 y 56%, respectivamente). También con un bajo coeficiente de variación (9%) (Cuadro 1 del Anexo 4).

Así mismo, para ambas especies el porcentaje de limo presenta la mayor variación (C.V. = 23 y 29%, respectivamente), indicativo que los contenidos de esta variable textural, son muy variables en los suelos del área de estudio en comparación con los valores reportados para arena y arcilla.

Variables químicas del suelo

Herrera (1996) evaluó el efecto de la variación del sitio en la productividad de las poblaciones de *V. ferruginea* y *C. alliodora* en el área de estudio. Realizó una

descripción detallada sobre la fertilidad de los suelos y las relaciones de sus variables con la planta.

A continuación se hace un resumen de esta descripción haciendo énfasis en las variables que arrojaron probabilidades significativas en los modelos generados para determinar el incremento diamétrico del árbol individual y por parcela, en función de las variables del sitio (0- 12 cm de profundidad).

En relación al contenido de bases solubles del suelo, se encontró que el contenido de calcio (Ca) en los primeros 12 cm se encuentra en niveles medios, disminuyendo considerablemente al aumentar la profundidad. El magnesio (Mg) se encuentra en niveles aceptables en el total de sitios muestreados. El potasio (K) se encuentra bajo, pues debido a su movilidad en el suelo puede perderse como ion disuelto en las aguas de escorrentía, percolación y el arrastre de sedimentos a través de la erosión (De las Salas, 1987) y la cantidad de aluminio (Al) disponible posiblemente ocupe las posiciones intercambiables, desplazando al mismo. Esta deficiencia es comprobada por las relaciones catiónicas (Ca:K, Ca+Mg:K y Mg:K) que en la mayoría de los sitios se encuentran por encima de los niveles óptimos.

En cuanto a la acidez todos los sitios presentan un pH bajo (4.9 - 5.4). La acidez intercambiable (Ac) se encuentra en niveles medios y bajos, lo cual puede estar provocando las deficiencias de Ca y Mg. El manganeso (Mn) se encuentra en un 60% a niveles considerados altos para cultivos agrícolas; su solubilidad aumenta cuando los valores de pH son menores a 5.5. El problema de la acidez puede deberse a la combinación de diferentes fenómenos: un elevado lavado de bases (Ca, Mg y K) induce a que el pH sea menor de 5.5, generando una deficiencia de Ca, moderada solubilidad de Al y alta de Mn.

El fósforo (P) en la mayoría de las muestras presenta deficiencias debido también al problema de la acidez. Fenómeno atribuido a la formación de

precipitados de fósforo con el aluminio, hierro (Fe) y a la pérdida de materia orgánica (MO) durante el uso anterior del sitio.

En relación a los elementos menores el cobre (Cu) y el hierro, en todos los sitios presentan niveles muy elevados, se presentan concentraciones adecuadas de azufre (S) y boro (B) y en cantidades adecuadas el zinc (Zn) en el 75% y muy altas en 25% de los sitios muestreados.

El contenido de materia orgánica es alto en todos los sitios, fenómeno asociado con la acidez que contribuye a una lenta descomposición de la misma, y a que el pH bajo disminuye la población bacteriana del suelo. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), se encuentra a niveles medios en todos los sitios, producto del efecto de la influencia de la materia orgánica que es particularmente importante en suelos de origen volcánico y a los elevados niveles de aluminio del sitio (Fassbender y Bornemisza, 1994).

5.1.5. Hidrografía

El bosque bajo estudio está rodeado al norte por el río Ron Ron. La finca es atravesada por una gran cantidad de quebradas intermitentes (Guillén, 1993), que convergen en su mayoría en una quebrada mayor llamada "Quebrada Honda", que atraviesa la finca por su parte central con orientación este-oeste. Todas estas quebradas vierten sus aguas en el río Ron Ron (Vásquez, 1994). Estas quebradas ocupan un área de 2.6 ha (8% del área total del bosque).

5.1.6. Vegetación

El área de estudio corresponde a un bosque secundario tropical de la tercera fase de la sucesión secundaria según la clasificación de Finegan (1996b). Tiene aproximadamente 30 años de edad según se deduce del estudio llevado a cabo por Herrera (1996).

El bosque presenta una estructura y composición heterogénea. Guillén (1993) delimitó seis estratos ($dap \geq 100$ mm) cuya composición florística es dominada por las especies heliófitas durables *V. ferruginea* (ocupa un 47% del área total) y *C. alliodora*. Según esta autora en el bosque se encuentran algunos árboles remanentes del bosque primario distribuidos por toda el área mayormente de *V. ferruginea* con densidades de 4 a 10 árboles ha^{-1} .

En 1994 se aplicó un raleo en 19.4 ha, con el fin de favorecer los fustales de futura cosecha y obtener productos con valor comercial de las especies *V. ferruginea*, *Vochysia guatemalensis*, *C. alliodora* y *Xylopia sericophylla* (Guillén y Gordon, 1994; citados por Herrera, 1996). Este último autor realizó en 1995 un estudio para evaluar el efecto del sitio sobre la productividad de *V. ferruginea* y *C. alliodora*.

5.2. RECOLECCION Y ANALISIS DE LA INFORMACION

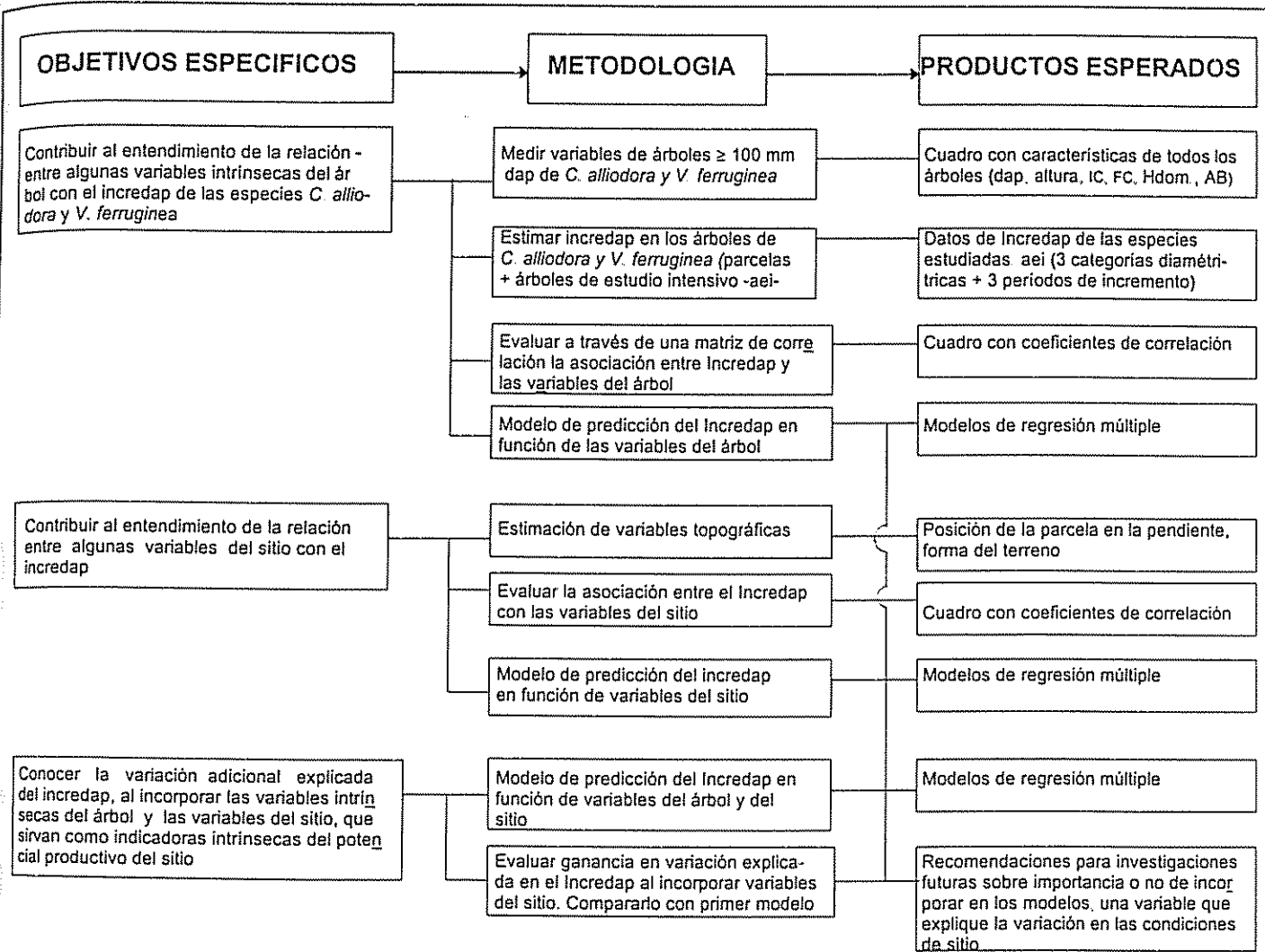
Como se mencionó anteriormente la presente investigación está basada en el estudio realizado por Herrera (1996) y en el estudio intensivo de crecimiento Guillén y Gordon citados por Herrera. A continuación se hace un resumen de la metodología de campo empleada.

En el Cuadro 1 se encuentra el diagrama que resume los pasos metodológicos necesarios y productos esperados de la presente investigación, los cuales se describen a continuación.

Como punto de partida se procedió a reubicar a través de recorridos minuciosos por toda el área, las parcelas de medición temporal establecidas por Herrera (1996) (Anexo 2) y posteriormente los árboles de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* ubicados dentro de estas parcelas. En total se tienen 41 parcelas con

una dimensión de 20 x 20 m (400 m²). Así mismo, se ubicaron los 44 individuos de *C. alliodora* y 61 *V. ferruginea* del estudio intensivo de crecimiento, los cuales se marcaron en el mapa de campo (Anexo 3), con relación a los carriles establecidos en el área a cada 50 m sobre una línea madre, con orientación norte-sur (Guillén y Gordon, 1994; citados por Herrera, 1996). Esta labor se realizó con la ayuda de un mapa topográfico escala 1:4000 (Vásquez, 1994) y con apoyo de personal de campo del CATIE.

Cuadro 1 Diagrama de pasos metodológicos y productos esperados



Incredap=incremento diamétrico, Dap=diametro_{1.30m}, CF=Calidad de fuste, IC=Iluminación de copa, FC=forma de copa, Hdom=Altura dominante, AB=Area basal
aei = árboles de estudio intensivo

Una vez reubicadas las parcelas, estas se delimitaron e identificaron con balizas de madera y cintas de color. Los árboles se identificaron con una placa de aluminio colocada 20 cm por arriba del punto de medición del diámetro. A cada árbol se le asignó un número formado por el número de la parcela a la cual pertenece y el número correlativo del árbol dentro de ella.

Según los objetivos propuestos en la presente investigación se realizaron dos estudios específicos:

5.2.1. Incremento en diámetro de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* según las variables intrínsecas de los árboles

Para realizar este estudio se efectuaron las siguientes mediciones:

- **Diámetro:** Se consideraron los árboles con $dap \geq 100$ mm. Se realizó con cinta diamétrica a una altura de 1.30 m sobre el nivel del suelo.
- **Altura total:** Se midió con una vara telescópica y/o clinómetro Sunnto. A partir de estos datos se estimó la altura dominante de los árboles de las especies estudiadas.
- **Calidad de fuste:** Se determinó según la clasificación de Hutchinson (1993).

<u>Calidad</u>	<u>Código</u>
Comercial actualmente	1
Comercial futuro	2
Deformado	3
Dañado	4
Podrido	5

- **Forma de la copa:** (Dawkins 1958, citado por Synnot 1991)

<u>Forma</u>	<u>Código</u>
Perfecta	1
Buena	2
Tolerante	3
Pobre	4
Muy pobre	5
Descopado	6

- **Iluminación de la copa:** (Dawkins 1958, adaptado por Hutchinson 1993)

<u>Grado de iluminación</u>	<u>Código</u>
Iluminación vertical plena, además de lateral (emergente)	1
Iluminación vertical plena	2
Iluminación vertical parcial	3
Iluminación oblicua únicamente	4
Sin ninguna iluminación directa	5

5.2.2. Incremento en diámetro de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* según variables del sitio

Para determinar el crecimiento de los árboles en relación a los factores del sitio se consideraron los siguientes aspectos:

- **Porcentaje de pendiente:** Se midió con clinómetro Sunnto en ambos extremos y el centro de cada parcela (promedio por parcela de medición temporal de 20 x 20 m).
- **Posición:** se consideraron básicamente cinco posiciones (Zech, 1994):

<u>Posición</u>	<u>Código</u>
Cima	1
Parte alta	2
Parte media	3
Parte baja	4
Depresión	5

- **Forma del terreno:** Se consideró el contorno de la pendiente según Zech (1994):

<u>Clase</u>	<u>Código</u>
Convexo	1
Lineal	2
Cóncavo	3

Las parcelas de medición temporal instaladas por Herrera (1996) se consideran representativas del bosque estudiado. Por tal razón y con el fin de economizar recursos se utilizaron los análisis edáficos y se tomó la caracterización de la fertilidad de los suelos de 0 a 12 cm de profundidad realizada por este autor.

Con los datos obtenidos en el campo, se procedió a calcular el incremento diamétrico e incremento en altura. Se comprobó que existían marcadas diferencias de incremento en altura, por lo que se hizo una remediación de los individuos que presentaban este problema y tratar de corregirlo, pero no fue posible; se optó entonces por excluir este incremento y considerar únicamente los valores de incremento diamétrico en el análisis y discusión de resultados de las especies en estudio.

5.3 ANALISIS DE LOS DATOS

5.3.1 Caracterización estructural y silvicultural del bosque

Con base a estas variables se procedió a realizar la caracterización del bosque de la finca "El Cerro", según la siguiente metodología, la cual consistió en determinar:

- **Número de árboles:** Se calculó el número de árboles con $dap \geq 100$ mm por parcela y por hectárea. Se calculó además la mortalidad y los ingresos.
- **Area basal:** Se estimó por parcela y por hectárea a través de la fórmula general:

$$G = \sum dap^2 * 0.7854 * N$$

[1]

Donde:

G = área basal (m^2 /parcela o m^2 /ha)

dap = diámetro a la altura del pecho

N = número de árboles por parcela o hectárea

- **Altura media:** Se calculó por parcela y por hectárea a través de la siguiente expresión:

$$\text{Altura media} = \frac{\sum \text{alturas de la especie}}{\text{No. de individuos}} \quad [2]$$

- **Altura dominante:** Se define como la altura promedio de los 100 árboles más altos por hectárea (Alder, 1980; Vincent, 1980). En el presente estudio se consideró como el promedio de los 4 árboles más altos por parcela y que tuvieran un coeficiente de variación $\leq 20\%$.
- **Condiciones silviculturales:** Se refiere a la distribución de los individuos de ambas especies respecto a la forma del fuste, condiciones de iluminación y forma de copa.

5.2.3. Estimación del incremento diamétrico

Con los datos de la medición de diámetros realizada por Herrera (1996) y los obtenidos en la presente investigación, se calculó el incremento diamétrico del período 95-97 por árbol individual, por parcela y por hectárea mediante la siguiente expresión [3]:

$$\text{IMA} = \frac{\text{dap 97} - \text{dap 95}}{2 \text{ años}} \quad [3]$$

A estos datos se les realizó estadísticas simples y pruebas de normalidad para determinar en base a las mismas el tipo de distribución.

5.2.4. Predicción del incremento diamétrico

Este análisis se efectuó para los estudios sobre incremento diamétrico versus variables del árbol y del sitio, lo mismo se hizo para el incremento diamétrico del estudio intensivo.

Para determinar las tendencias de la relación entre las variables del árbol, del sitio, o la combinación de ambas y el incremento diamétrico, se realizaron análisis gráficos sencillos. Definidas las tendencias se hizo una matriz de correlación para evaluar el grado de relación entre estas, por separado y combinadas, y el incremento diamétrico.

Una vez seleccionadas las variables del árbol que presentaron coeficientes de correlación estadísticamente significativos ($P \leq 0.05$) con el incremento diamétrico, se construyeron y seleccionaron los modelos de regresión múltiple que explicaron mejor el incremento diamétrico a partir de las variables del árbol. Estos modelos se ajustaron a través del Prog Reg y Stepwise del Sas/Stat (1993), a través de la opción Forward, con el fin de determinar los modelos.

El mismo procedimiento se utilizó para desarrollar los modelos de predicción del incremento diamétrico en función de las variables del sitio y los modelos de predicción del incremento diamétrico combinando tanto las variables del árbol como las del sitio. Estos últimos modelos servirán para evaluar la ganancia en la predicción de los modelos, al incluir, además de las variables del árbol, las variables del sitio.

Los modelos seleccionados tiene la siguiente forma:

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + \varepsilon_i \quad [4]$$

Donde:

Y_i = incremento diamétrico

b_0 = intercepto

b_n = coeficientes de las variables

X_n = variables independientes (del árbol o del sitio)

ε_i = desvío aleatorio (error)

La validez de los modelos seleccionados se verificó mediante el análisis de los residuos para ver si cumplían con los supuestos de la normalidad y homocedasticidad (Gujarati, 1993). Al no cumplirse los supuestos del modelo en su totalidad, se evaluaron otros modelos que se acercaron lo mas posible al cumplimiento de los supuestos.

Los productos esperados en cada caso corresponden a:

- Caracterización estructural y silvicultural de las poblaciones de las especies estudiadas
- Incrementos diamétricos de las especies estudiadas.
- Matriz de correlaciones entre el incremento diamétrico y las variables del árbol y del sitio
- Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico en función de las variables del árbol, del sitio o la combinación de ambas.

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1. CARACTERIZACION ESTRUCTURAL Y SILVICULTURAL DE LAS POBLACIONES DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS

En total se encontraron 402 individuos de los cuales 115 corresponden a *C. alliodora* y 287 a *V. ferruginea*. Según los resultados anteriores hubo entre 1995 y 1997 veintiún muertos (2 y 19) y siete reclutas (3 y 4).

En el Figura 1, se presenta el número de árboles por clase diamétrica (%) de la población de las especies estudiadas. Se puede observar que *C. alliodora* alcanza un total de 69 individuos ha^{-1} , mientras que *V. ferruginea* supera esta abundancia en más de 100% (Cuadro 2 del Anexo 4). La primera especie concentra 87% de sus individuos en la clase diamétrica 10-30 cm, mientras que *V. ferruginea* un 73%. Los pocos árboles de *V. ferruginea* presentes en las clases diamétricas superiores (40 a 60 cm) son árboles remanentes que desempeñan la función de árboles semilleros (Colán, 1995). El 75% y 61% de los individuos del estudio intensivo de crecimiento de ambas especies se concentra en las clases diamétricas 20-29.9 y 30-39.9 tal como se observa en la Figura 2 y en el Cuadro 3 del Anexo 4.

Se observa que la forma de la distribución del número de árboles en la clases diamétricas inferiores (10-30 cm) corresponde a una recta, donde el número de árboles se mantiene prácticamente constante hasta alcanzar las clases diamétricas mayores cuando disminuye (Figura 1). Esta es una característica común de bosques secundarios dominados por especies heliófitas (Finegan, 1996c).

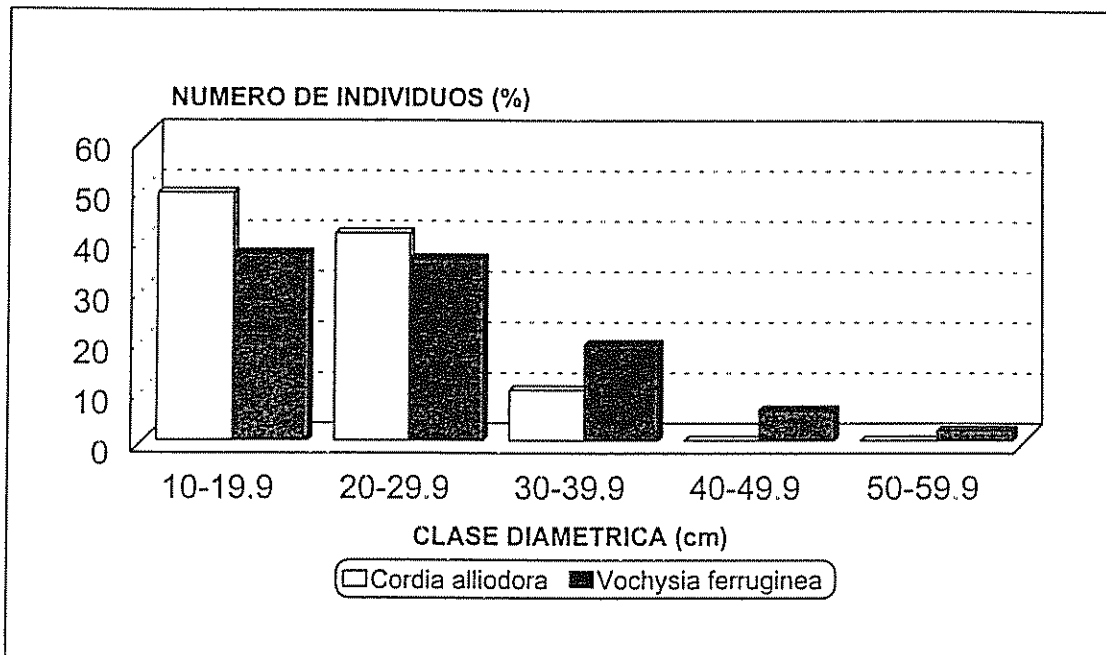


Figura 1 Número de individuos (%) por clases diamétricas para de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*, presentes en las parcelas de medición temporal. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

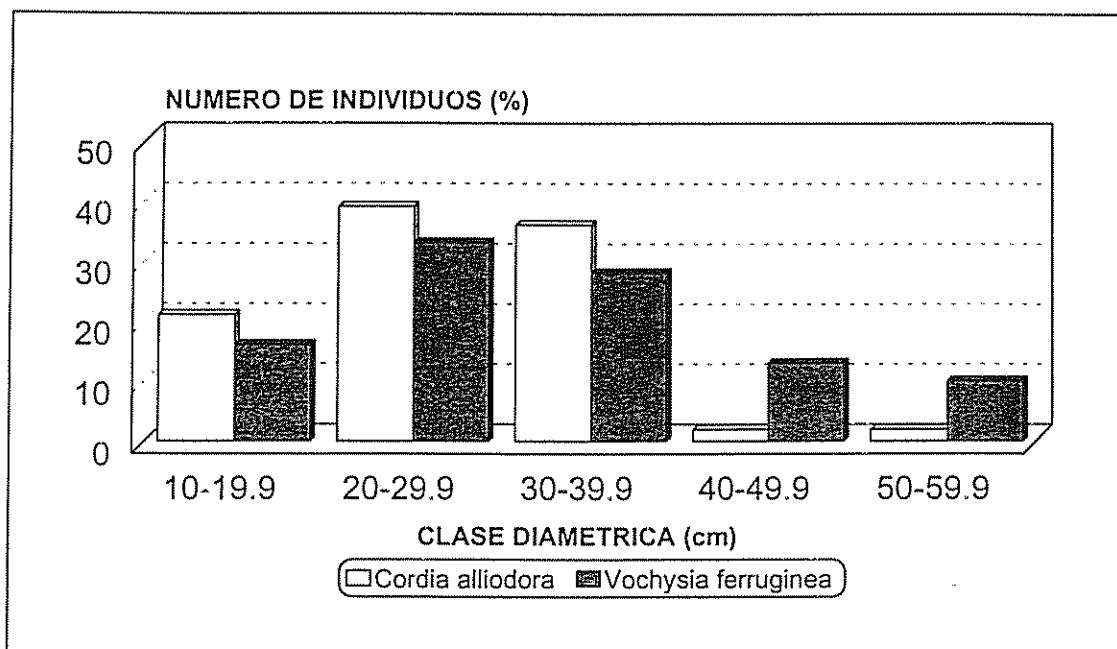


Figura 2. Número de individuos (%) por clases diamétricas de los árboles del estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

La distribución del área basal por clases diamétricas se muestra en la Figura 3. La especie *C. alliodora* alcanza $2.6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, mientras que *V. ferruginea* $9.2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Ambas especies presentan una distribución normal, donde *C. alliodora* concentra el 78% en la clase diamétrica 10-29.9 cm y *V. ferruginea* apenas el 43%. Según las descripción anterior estas especies presentan una estructura poblacional muy diferente.

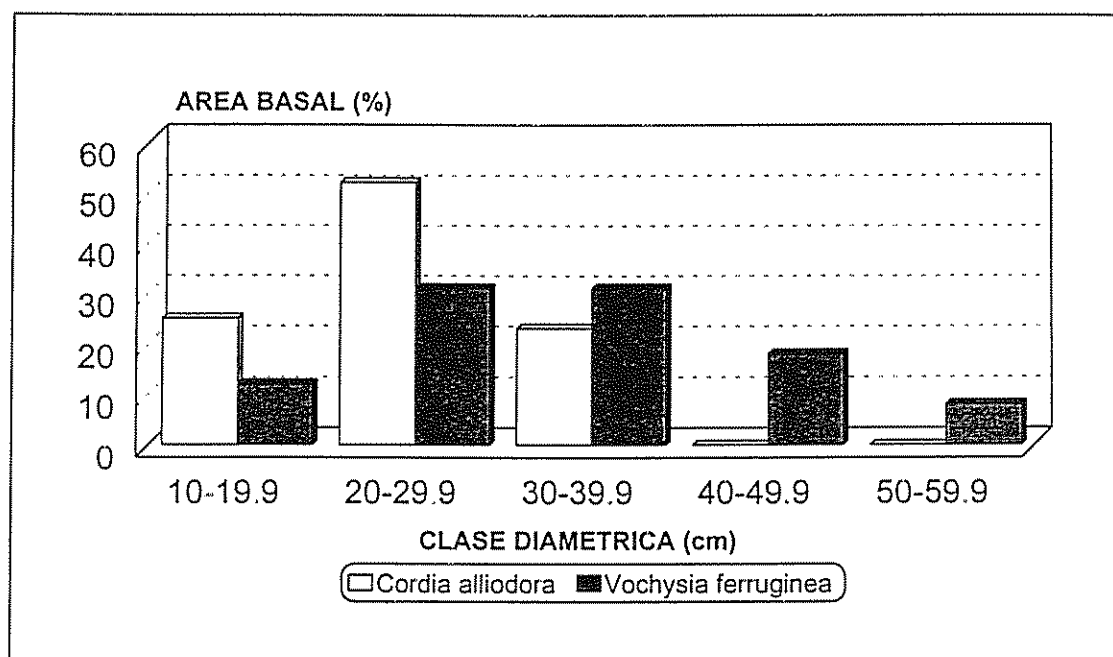


Figura 3. Área basal por clase diamétrica ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

En el Cuadro 2 se presenta la caracterización de las variables calidad de fuste, iluminación y forma de la copa de las especies bajo estudio (véase también las Figuras 1 a 3 del Anexo 5). El 34% de los individuos de *C. alliodora* se encuentran dentro de la calidad de fuste comercial futuro, cuyos individuos no han alcanzado el diámetro mínimo comercial que en Costa Rica es 40 cm. Los individuos deformados representan un 61% del total (Figura 3). Según Somarriba y Beer (1987), la deformidad del fuste se debe a la naturaleza de esta especie de desarrollar fustes irregulares en condiciones no óptimas como lo son suelos ácidos (pH abajo de 4.5) y concentraciones altas de aluminio (CATIE, 1995). Por su lado los árboles de estudio

intensivo -aei- reportan el 45% dentro de la calidad de fuste comercial futuro y también 45% para los deformados (Cuadro 3, y Figura 4 del Anexo 5).

Por el contrario *V. ferruginea* presenta mejores características de fuste, con el 57% de sus individuos potencialmente comerciales (Cuadro 2, Figura 1 del Anexo 5). En los aei se encontró un 69% en la clase comercial futura (Cuadro 3 y Figura 4 del Anexo 5). Lo anterior se explica debido a que esta especie bajo condiciones adecuadas, presenta fustes rectos o ligeramente torcidos y cilíndricos con buenas características (CATIE, 1995).

Cuadro 2. Calidad de fuste, iluminación y forma de la copa ($N\ ha^{-1}$) de los árboles de *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea*, presentes en las 41 parcelas de medición temporal. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

VARIABLE	CATEGORÍA	<i>Cordia alliodora</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
		N	%	N	%
Calidad de fuste	Comercial actual (1)	0	0	15	9
	Comercial futuro (2)	24	34	92	57
	Deformado (3)	42	61	49	31
	Dañado (4)	4	5	5	3
	Podrido (5)	0	0	1	0
Iluminación de la copa	Vertical plena + lateral (1)	14	20	21	13
	Vertical plena (2)	28	40	66	41
	Vertical parcial (3)	14	20	32	20
	Oblicua únicamente (4)	14	20	39	24
	Sin iluminación (5)	0	0	4	2
Forma de la copa	Perfecta (1)	1	1	11	7
	Buena (2)	28	40	61	38
	Tolerante (3)	33	47	67	41
	Pobre (4)	6	9	15	9
	Muy pobre (5)	0	0	4	2
	Descopado (6)	2	3	4	2

En cuanto a la iluminación de la copa (Cuadro 2 y Figura 2 del anexo 5) 60% de los individuos de *C. alliodora* presentan condiciones buenas de iluminación (vertical plena + lateral y vertical plena) y el 40% restante condiciones de iluminación deficiente. Estos últimos corresponde a individuos de porte pequeño que no logran alcanzar el dosel superior. Por otro lado *V. ferruginea* presenta un 54% de sus individuos con condiciones de iluminación adecuadas y el 46% restante en condiciones deficientes. Más del 75% de los aei de ambas especies presentan condiciones de iluminación óptimas (categorías 1 y 2) (Cuadro 3 y Figura 5 del anexo 5).

Cuadro 3. Calidad de fuste, iluminación y forma de la copa de los árboles del estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

VARIABLE	CATEGORÍA	<i>Cordia alliodora</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
		N	%	N	%
Calidad de fuste	Comercial actual (1)	2	4	10	16
	Comercial futuro (2)	20	46	42	69
	Deformado (3)	20	46	8	13
	Dañado (4)	2	4	1	2
Iluminación de la copa	Vertical plena + lateral (1)	9	20	7	12
	Vertical plena (2)	25	57	41	67
	Vertical parcial (3)	9	21	13	21
	Oblicua únicamente (4)	1	2	0	0
Forma de la copa	Perfecta (1)	1	2	9	15
	Buena (2)	25	57	42	69
	Tolerante (3)	14	32	10	16
	Pobre (4)	4	9	0	0

En lo que a forma de copa se refiere (Cuadro 2 y Figura 3 del anexo 5) se observa que el 34% de los árboles de *C. alliodora* están dentro de las categorías de forma de copa perfecta y buena y el 48% tolerable. Mientras tanto *V. ferruginea* presentó 44% de individuos con condiciones de copa buenas, 42% tolerables y el 14% restante deficientes. Casi el 60% de los aei se ubican en las categorías perfecta

y buena, para la especie *C. alliodora* y más del 80% para *V. ferruginea*.(Cuadro 3 y Figura 6 del anexo 5).

Los árboles descopados de ambas especies se excluyeron del análisis, pues se cree morirán a corto plazo, y además conllevan un efecto en el crecimiento que contribuirá a aumentar la variación no explicada.

6.2. RELACION ENTRE EL INCREMENTO DIAMETRICO Y LAS VARIABLES DEL ARBOL

6.2.1. Incrementos diamétricos de las especies estudiadas

La especie *C. alliodora* estuvo presente en 26 parcelas y *V. ferruginea* en 32 parcelas. En los Cuadros 4 y 5 del anexo 4 se presentan los resultados de los incrementos medios anuales, número de individuos y sus respectivos coeficientes de variación.

C. alliodora presenta un diámetro promedio de 21.3 cm y *V. ferruginea* 25.1 cm (Cuadro 6 del Anexo 4). Herrera (1996) encontró en 1995, para estas mismas especies valores de 20.8 cm y 24.0 cm respectivamente. La distribución del incremento diamétrico de las especies mostró un comportamiento normal, por lo que se utilizaron los valores de la media.

Considerando los muertos y reclutas, los resultados obtenidos para *C. alliodora* indican un incremento diamétrico con valor de 1.7 mm año^{-1} (Cuadro 6 del Anexo 4) con un rango entre 0 y 4 mm año^{-1} , cifra inferior a la reportada por Herrera (1996) de 7 mm año^{-1} para el mismo sitio. Los aei por su lado reportan un valor de 4.6 mm año^{-1} (Cuadro 7 del Anexo 4).. Las diferencias se deben a que los resultados obtenidos por Herrera (1996) corresponden a un incremento medio anual para un

período de 28 años, mientras que en el presente caso la estimación del incremento diámetro corresponde a un período de dos y cuatro años, respectivamente.

La especie *V. ferruginea* experimentó un incremento diámetro medio anual de 6 mm año⁻¹ (Cuadro 6 del Anexo 4) con un valor mínimo de 1 mm año⁻¹ y un máximo de 21.3 mm año⁻¹, lo cual indica que la variación entre las variables intrínsecas del árbol. Por su lado los individuos de estudio intensivo de crecimiento reportan un valor de 8 mm año⁻¹ (Cuadro 7 del Anexo 4). Finegan y Guillén (1992) citan un incremento medio anual para *V. ferruginea* de 10 mm año⁻¹ en bosques secundarios de 25 años de edad en Sarapiquí, Herrera (1996) de 8 mm año⁻¹ para el mismo sitio y Finegan y Camacho (1997) que reportan un valor mediano anual de 15 mm año⁻¹ para esta especie, en el bosque primario de Finca La Tirimbina.

Las diferencias en el primer caso pueden deberse a diferentes condiciones de sitio. En el segundo caso los valores son similares e iguales, las diferencias pueden ser debidas al redondeo de los datos, errores de estimación de la edad, etc., y en el tercer caso probablemente se deban a que en el bosque primario los suelos puedan tener mejor fertilidad.

Los valores tan bajos de incremento diámetro junto a las diferencias tan grandes entre mínimos (-2) y máximos (10 y 26), podría traer problemas para ajustar modelos debido a la alta variación.

Los árboles de estudio intensivo presentan mayores incrementos diámetros que los individuos de las parcelas, lo cual puede deberse a que para este estudio fueron seleccionados los individuos con mejores características dasométricas.

La heterogeneidad presentada en el incremento promedio anual por parcela (Figura 4) indica que los diferentes individuos que las integran tienen tasas de crecimiento muy variadas debido a la interacción de los factores que conforman la variación ambiental (Campos, 1989c), a saber el aprovechamiento de luz, edad,

estado fitosanitario, microclima, error estadístico, errores de medición, fluctuaciones periódicas en la tasa de crecimiento, etc. La alta variación dentro de parcelas también traerá problemas para ajustar los modelos.

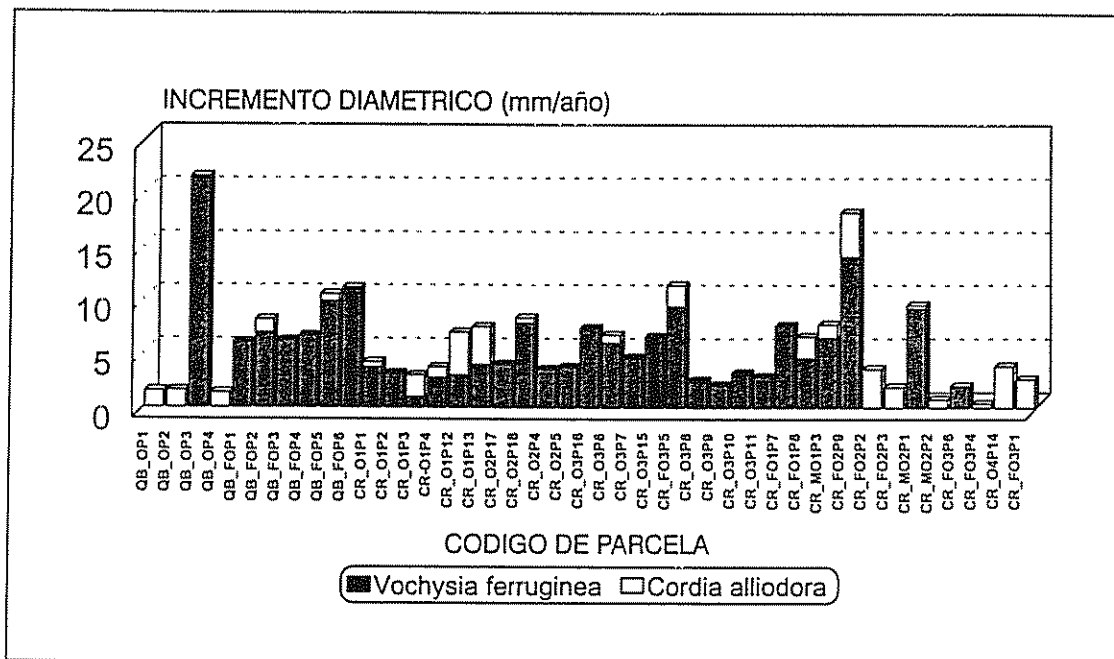


Figura 4. Incremento diamétrico por parcela de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

6.2.2. Incremento diamétrico de los árboles de estudio intensivo

En las Figuras 5 y 6 se muestran los incrementos diamétricos (mm) de la especie en estudio en tres categorías diamétricas: individuos con diámetros entre 10.0-19.9 cm, 20.0-29.9 cm y mayores de 30.0 cm (Cuadro 8 y 9 del Anexo 4).

Incremento diamétrico de *C. alliodora*

Se puede observar (Cuadro 8, del Anexo 4) que los individuos se encuentran uniformemente distribuidos en las tres categorías diamétricas (14, 14 y 16 respectivamente). En la Figura 5 se muestra la manera como se distribuye el incremento diamétrico en cada una de las tres categorías diamétricas y para cada período de incremento. Los individuos comprendidos en la categoría diamétrica

mayor presentaron el mayor incremento diamétrico en el primer y tercer período de incremento. Los incrementos que siguen en importancia se dan en la categoría diamétrica 10.0-19.9 cm y los menores en la categoría diamétrica intermedia.

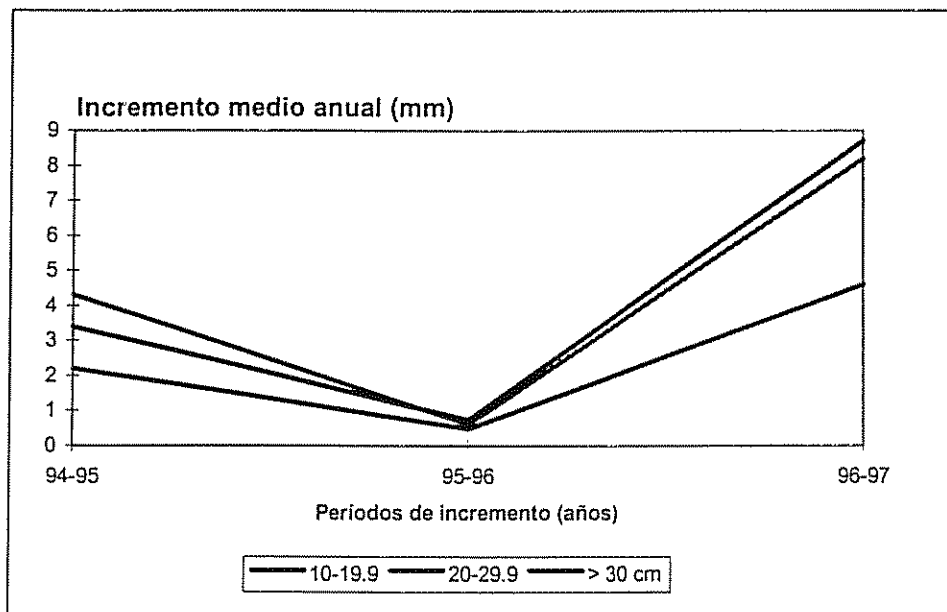


Figura 5. Incremento medio anual de los árboles de estudio intensivo de la especie *C. alliodora*. Finca el Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica

Incremento diamétrico de *V. ferruginea*

Los incrementos diamétricos de esta especie se presentan en la Figura 5, donde podemos observar que los individuos comprendidos en la categoría diamétrica mayor (> 30.0 cm) son los que mostraron el mayor incremento diamétrico durante los tres periodos y los de la categoría diamétrica inferior los que presentan los incrementos menores.

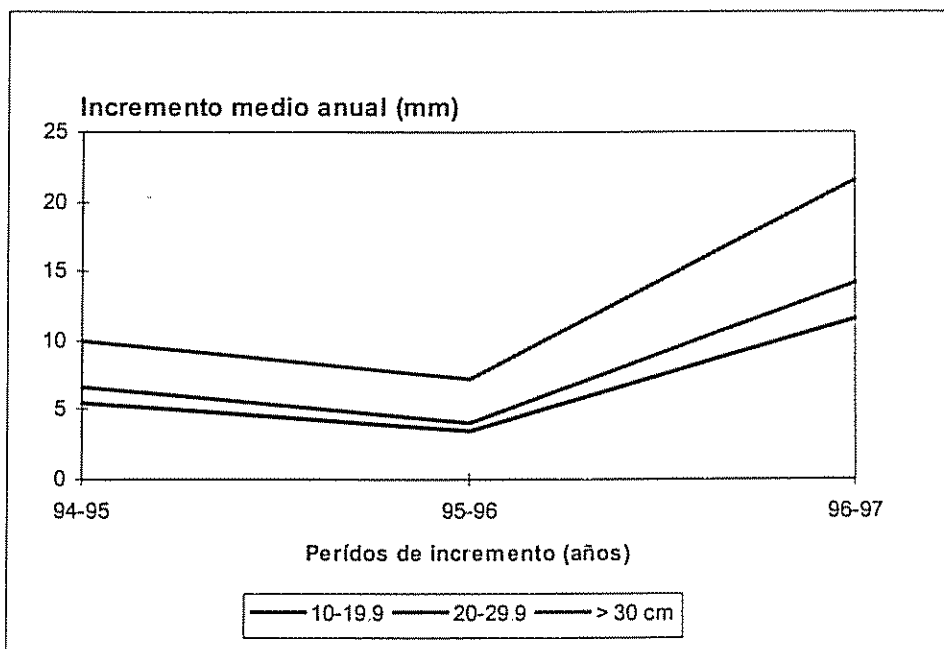


Figura 6. Incremento medio anual de los árboles de estudio intensivo de la especie *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica

El descenso en el segundo período de incremento (95-96) para ambas especies se debe probablemente al estrés sufrido por la especie después del tratamiento silvicultural a que fue sometido el bosque a finales del año 1994 (Guillén y Gordon, 1994, citados por Herrera, 1996). Al final del tercer período (96-97), los incrementos aumentaron debido a que posiblemente ya los árboles se habían recuperado de los efectos del tratamiento silvicultural, y están respondiendo positivamente. Resultados similares encontró Camacho y Finegan (1997) en un bosque primario aprovechado y tratado silviculturalmente en la zona de Sarapiquí, Costa Rica.

6.2.3. Asociación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol

Con el propósito de determinar si las variables intrínsecas del árbol (presentes en las 41 parcelas de medición temporal) son buenas predictoras del incremento diamétrico de las especies en estudio, se evaluó el grado de correlación de esta variable con las demás variables del árbol. Para las variables numéricas se tomaron

los valores del análisis de correlación de Pearson y para las categóricas el de Spearman, a través de la opción Proc corr del Sas/Stat (1993). Los resultados se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Matriz de correlación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol de las especies *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

VARIABLE	<i>Cordia alliodora</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
	r	Prob.	r	Prob.
Iluminación de la copa	-0.07	n.s.	-0.60	0.0001
Forma de la copa	-0.38	0.0001	-0.58	0.0001
Diámetro	-0.08	n.s.*	0.56	0.0001
Altura	0.18	0.0644	0.45	0.0001
Calidad de fuste	-0.06	n.s.	-0.33	0.0001
Area Basal	0.10	n.s.	-0.10	n.s.
Altura dominante	-0.03	n.s.	0.01	n.s.

* n.s. = no significativa

Para *C. alliodora* (Cuadro 4) se encontró una correlación lineal baja, pero altamente significativa entre la forma de copa ($r=-0.38$; $p=0.0001$) y el incremento diamétrico. También se encontró correlación lineal baja y casi significativa con la altura del árbol ($r=0.18$; $p=0.0644$). Las demás variables del árbol no mostraron ninguna correlación significativa. En relación a *V. ferruginea* se encontró una correlación lineal alta positiva entre la iluminación y forma de copa, diámetro inicial y altura ($r=-0.60$, -0.58 , 0.56 y 0.45 , respectivamente) y altamente significativa ($p = 0.0001$) con el incremento diamétrico. Así mismo se encontró una correlación lineal baja, pero significativa entre la calidad de fuste (-0.33 ; $p=0.0001$) y el incremento diamétrico.

Es común encontrar correlación entre el diámetro inicial y el incremento diamétrico. El diámetro es la variable más fácilmente medible y constituye el principal objeto de modelación (Vanclay, 1989 y 1991). Varios autores han

encontrado correlación entre la iluminación de la copa y el incremento diamétrico (Dawkins, 1956; Alder, 1980 y 1983; Synnott, 1991; Finegan, 1996d, Siteo, 1992, Camacho y Finegan, 1997).

El área basal inicial como un índice de la estimación de la competencia por el espacio horizontal en un área determinada y la altura dominante como indicadora del potencial productivo del sitio (Alder, 1980), no presentaron ningún tipo de relación con el incremento diamétrico para las especies en estudio. Este resultado no es de esperar, se debe quizá al poco tiempo de observaciones y a la gran variación.

En el Cuadro 5 se presentan las variables del árbol de estudio intensivo que mostraron correlación lineal significativa con el incremento diamétrico de las especies en estudio. Para *C. alliodora* la variable que presentó el mayor coeficiente de correlación con el incremento diamétrico fue la altura ($r=0.52$, $p=0.0003$), seguida de una correlación baja y casi significativa de la forma de copa ($r=-0.27$, $p=0.0775$) y el diámetro ($r=0.26$, $p=0.0840$). *V. ferruginea* presentó correlación lineal baja y significativa con la forma de copa ($r=-0.38$, $p=0.0023$), la altura ($r=0.36$, $p=0.0048$), el diámetro ($r=0.35$, $p=0.0059$) y la calidad del fuste ($r=-0.27$, $p=0.0350$). Lo anterior puede ser debido a que los individuos con mayor diámetro, más altos y con las mejores formas de copa y de fuste presentan las condiciones óptimas para tener el mayor incremento diamétrico.

Cuadro 5. Matriz de correlación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol de estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca el Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

VARIABLE	<i>Cordia alliodora</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
	r	Prob.	r	Prob.
Altura	0.52	0.0003	0.36	0.0048
Forma de la copa*	-0.27	0.0775	-0.38	0.0023
Diámetro	0.26	0.0840	0.35	0.0059
Calidad de fuste			-0.27	0.0350

6.2.4. Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico en función de las variables del árbol

El análisis del grado de correlación entre el IMA y las variables intrínsecas del árbol (variables independientes) nos permite definir, en primera instancia, que variables explican el mayor porcentaje de la variación encontrada con el incremento diamétrico (variable dependiente) de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Para el ajuste de modelos se utilizaron las variables descritas en el Cuadro 4 con coeficientes de correlación significativo al 10 por ciento ($p < 0.1$).

En la elaboración de los modelos se utilizó el método de regresión Prpc reg y Stepwise del Sas/stat (1993) con la opción Forward (hacia adelante), el cual selecciona las variables con un nivel de significancia dado ($p \leq 0.05$) (Herrera, 1996, Revolorio, 1996).

Modelo de crecimiento para *C. alliodora*

En la Figura 7 se muestra el número de variables que explican la mayor variación del incremento diamétrico de *C. alliodora*. El tamaño del modelo más eficiente es con dos variables que explican 23.1% de la variación, ya que al aumentar a 3 o 4 variables en el modelo no se logra un mejor ajuste. Lo anterior sirve de base para escoger el número de variables a incluir en el modelo. Por lo tanto, esos análisis indican que la variación encontrada puede ser explicada con pocas variables (Revolorio, 1996).

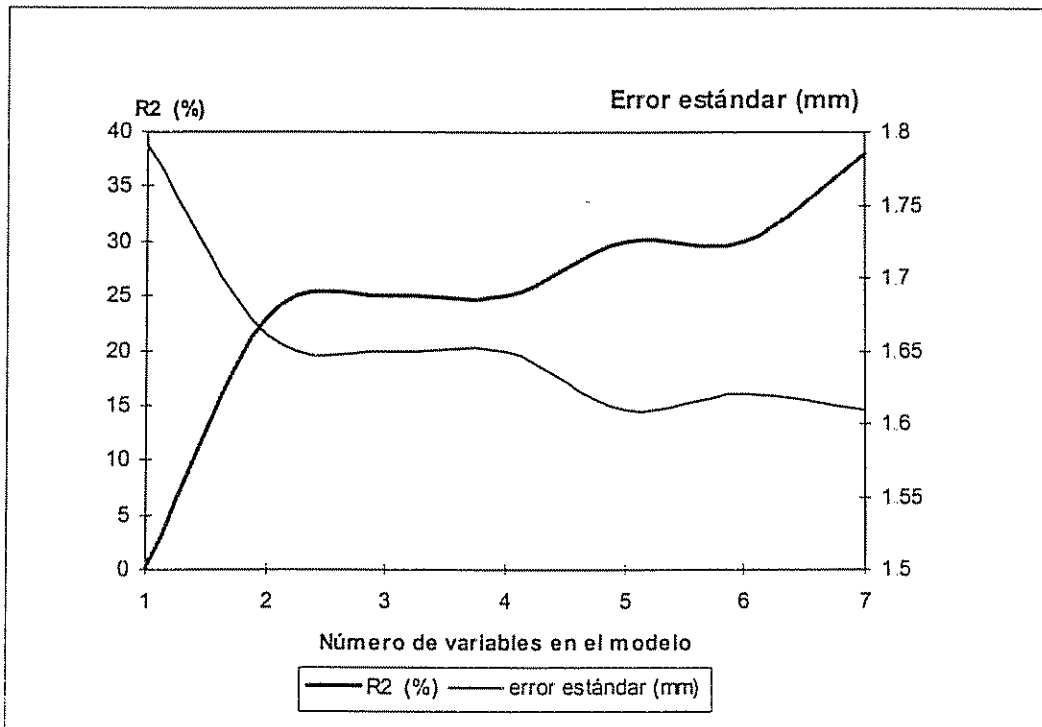


Figura 7. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables en el modelo, para la estimación del incremento diamétrico de la especie *C. alliodora*, según variables del árbol.

El coeficiente de determinación aumenta conforme se incluyen más variables al modelo y se reduce el error estándar (Drapper y Smith, 1981). Sin embargo, no se llega a una estabilización del mismo, o sea, el punto donde se alcanza la máxima variabilidad explicable con las variables que entraron en el modelo (Revolorio, 1996).

El comportamiento del coeficiente de determinación, puede deberse a la variación entre parcelas o error puro, el cual solo puede estimarse si se cuenta con repeticiones. Esta variación puede deberse a errores de medición del incremento diamétrico, errores de muestreo y a variaciones locales de sitio y microclima. La consideración de las fuentes de variación no explicada por el modelo (falta de ajuste), es de gran ayuda en la interpretación de los resultados, el entendimiento biológico y las limitaciones estadísticas de esta clase de estudio. Las posibles fuentes de variación que influyen en la variación no explicada pueden ser (Revolorio, 1996; adaptado de Campos, 1989c).

- Actividades antropogénicas. Relacionadas con el uso anterior del sitio como la edad exacta del bosque luego del abandono, pastoreo, aprovechamientos forestales, etc.
- Variación ambiental: Representada por las variaciones climáticas que no se consideraron en el presente estudio.
- Variación genética: Algunos árboles sobresalientes pueden representar cualidades de origen genético y no producto de los factores ambientales.
- Época de medición: La época en que se realizaron las mediciones de las variables del árbol y del sitio, puede contribuir a la variación no explicada.
- Estado fitosanitario: Individuos sanos y vigorosos tendrán mayores incrementos diamétricos.

Teniendo en cuenta las limitaciones derivadas de las fuentes de variación se utilizó el incremento diamétrico como variable dependiente y las variables del árbol como variables independientes, para ajustar un modelo de regresión que permita predecir el incremento diamétrico de *C. alliodora*.

El modelo seleccionado para la predicción del incremento diamétrico en función de las variables intrínsecas del árbol individual de *C. alliodora* es el siguiente:

$$I_{ma} \text{ (mm)} = - 2.456 - 0.017 \text{ Diámetro} + 0.362 \text{ Altura} \quad [5]$$

$$R^2 = 23.1\%$$

$$\text{Desviación estándar} = 1.65 \text{ mm}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 20.7\%$$

$$\text{Coeficiente de Variación} = 98.2\%$$

Tanto el diámetro como la altura son variables significativas, a un nivel de probabilidad del 5%, de este modelo y son las que más contribuyeron a explicar la variación en el incremento diamétrico (Cuadro 10 del Anexo 4). No obstante esto no significa que sean las responsables del incremento, ya que las variables que no se incluyeron en el modelo pueden tener un efecto importante sobre el crecimiento, por lo tanto el modelo presentado es uno de los posibles modelos que se pudieron

ajustar. El valor tan bajo del incremento diamétrico reportado esta la especie, probablemente sea la causa del signo negativo de la variable diámetro en el modelo, lo cual lo hace de poco valor práctico, pero fue el mejor modelo que se pudo ajustar.

A pesar de que la forma de copa dio una correlación altamente significativa con el incremento diamétrico (Cuadro 4), al actuar en conjunto con las demás variables para determinar el modelo de predicción, esta no mostró ninguna significancia, y la altura pasó a ocupar su lugar. Cabe mencionar que la altura raras veces se modela ya que no es muy frecuente la estimación de esta variable en bosques naturales por los errores de medición que conlleva, haciendo que los modelos sean de poco valor práctico. También los modelos de volumen que necesitan información de la altura de los árboles son muy pocos (Vanclay, 1989 y 1991).

Todos los valores del Factor de Inflación de la Varianza (FIV) están comprendidos entre 0 y 1.6 (Cuadro 10 del Anexo 4), lo cual indica que no se tienen problemas de colinearidad entre variables (Drapper y Smith, 1981). El valor obtenido de la prueba de F resultó altamente significativo, indicativo que el cuadrado medio del error puede considerarse un estimador insesgado del valor esperado de la varianza poblacional.

El modelo presentó ciertas limitaciones: los residuos aunque presentan una distribución muy cercana a la normalidad, esta es afectada por algunos valores extremos que la sesgan hacia la derecha. Se probaron algunas interacciones entre las variables para tratar de mejorar los modelos, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios; lo mismo sucedió con algunas transformaciones logarítmicas y semilogarítmicas. Así mismo se detectaron problemas de heterogeneidad de varianzas a través de la prueba de Bruesch-Pagan del Sas/Stat (1993).

Para el caso de los aei de *C. alliodora* aunque en el análisis de correlación lineal resultaron significativas ($p < 0.1$) el diámetro, altura y forma de copa (Cuadro 5),

en el modelo de predicción únicamente la altura reportó alta significancia ($p=0.0003$), arrojando un coeficiente de determinación del 26.7%. Sin embargo, la inclusión de la altura hace el modelo de poco valor práctico, debido a las dificultades que conlleva la medición de esta variable.

Modelo de crecimiento para *V. ferruginea*

Según se observa en la Figura 8 se necesitan dos variables para explicar el 37.7% de la variación existente en el incremento diamétrico de la especie *V. ferruginea*, pues al aumentar a 6 o 7 variables (total de variables que entraron en el modelo) no se logra un mejor ajuste. Lo anterior sirve de base para escoger el número de variables a incluir en el modelo. Por lo tanto, esos análisis indican que la variación encontrada puede ser explicada con pocas variables (Revolorio, 1996).

Como es de esperar el coeficiente de determinación aumenta conforme se incluyen más variables en el modelo (Draper y Smith, 1981), pero llega a un punto de estabilización (6 variables) donde, por más variables que agreguemos (el aumento es cada vez más reducido debido a que el aporte de las variables a la suma de cuadrados es cada vez menor) por lo tanto al iniciarse la estabilización también se logra la máxima variabilidad explicable (40%) con el juego de variables utilizadas para construir el modelo. Cuando se alcanza el máximo coeficiente de regresión, éste casi coincide con el mínimo error estandar asociado con la variable dependiente, en el presente saco (Herrera, 1996).

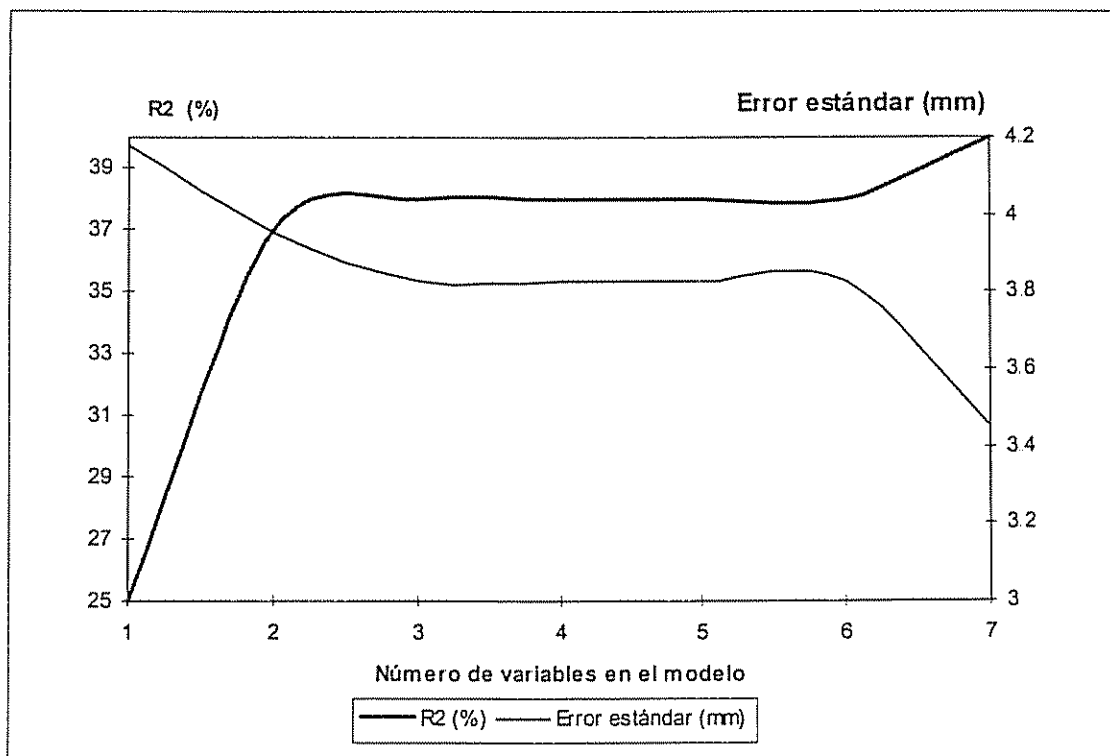


Figura 8. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables en el modelo, para la estimación del incremento diamétrico de la especie *V. ferruginea*, según variables del árbol.

Teniendo en cuenta las limitaciones derivadas de las fuentes de variación, el modelo finalmente ajustado para la predicción del incremento diamétrico en función de las variables intrínsecas del árbol para la especie *V. ferruginea* es el siguiente :

$$I_{ma} \text{ (mm)} = 4.454 + 0.021 \text{ Diámetro} - 1.690 \text{ Forma de la copa} \quad [6]$$

$$R^2 = 37.7\%, \quad \text{Desviación estándar} = 3.8 \text{ mm}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 37.2\%, \quad \text{Coeficiente de variación} = 74.9\%$$

A pesar de que se encontró una correlación lineal altamente significativa entre el incremento diamétrico y las demás variables del árbol (a excepción del área basal y la altura dominante) al actuar en forma conjunta para la estimación de los modelos de predicción solamente el diámetro y la forma de la copa, dieron una probabilidad altamente significativa de ($p=0.0001$). Sin embargo, esto no significa que sean estas

variables las que determinan el incremento y mucho menos que las variables que no entraron en el modelo, no tengan un efecto importante sobre el crecimiento. Por lo tanto, el modelo presentado únicamente constituye uno de los posibles modelos que se pudieron ajustar, pues contribuyó a explicar mejor el incremento en el presente caso.

Los resultados del análisis de varianza del modelo (Cuadro 11 del Anexo 4), muestran que todos los Factores de Inflación de la Varianza (FIV) son inferiores a 1.4, por lo que el modelo no presenta problemas de multicolinealidad entre las variables (Draper y Smith, 1981; Campos, 1989).

Al igual que en el modelo [5], los residuos aunque presentan una distribución muy cercana a la normalidad, esta es afectada por algunos valores extremos que la sesgan hacia la derecha. Se probaron algunas interacciones entre las variables para tratar de mejorar los modelos, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios; lo mismo sucedió con algunas transformaciones logarítmicas y semilogarítmicas. También se detectaron problemas de heterocedasticidad.

En relación a los aei de *V. ferruginea*, el análisis de correlación entre las variables del árbol y el incremento diamétrico mostró significancia ($p < 0.05$) con las variables diámetro, altura, calidad de fuste y forma de copa (Cuadro 7). Sin embargo, en el modelo de predicción solamente el diámetro fue significativo ($p = 0.0059$), pero lamentablemente, a pesar de tener significado biológico únicamente logró explicar el 12.2% de la variabilidad del incremento diamétrico. Lo anterior puede deberse a variables no medidas y/o no incluidas y que tienen un efecto en la variable de respuesta, errores de construcción del modelo, etc.

6.3. RELACION ENTRE EL INCREMENTO DIAMETRICO Y LAS VARIABLES DEL SITIO

En el presente análisis se consideraron 26 parcelas donde se encuentra presente *C. alliodora* y 32 con dominio de *V. ferruginea*. Hubo 16 parcelas en común donde se encontró al menos un individuo de cada especie (Cuadros 4 y 5 del anexo 4).

Variación topográfica

En el Cuadro 6 se puede observar la distribución de frecuencias y el respectivo coeficiente de variación de las variables topográficas de los 41 sitios de muestreo. Para los sitios dominados por *C. alliodora*, el porcentaje mínimo de pendiente fue del 3% y el máximo de 34%, con un valor medio de 15% y un coeficiente de variación del 55%. El rango de pendiente es relativamente bajo, pues el 69% de los sitios se encuentran con pendientes menores del 30%, ubicados casi en forma uniforme en las partes alta, media y baja de la pendiente (31, 39 y 31%) y la forma de terreno en la mayoría de los sitios es lineal (62%) y cóncavo(39%).

En el caso de *V. ferruginea* (Cuadro 6) el porcentaje mínimo de pendiente fue de 20% y el máximo de 47%, con un valor medio de 34% y un coeficiente de variación de 26%. Al contrario de *C. alliodora*, el rango de pendiente para esta especie es relativamente alto, pues el 42% del total de sitios se encuentran en pendientes comprendidas entre 30 a 40% y el 25% se encuentran en áreas con pendientes mayores de 40%, ubicados en las partes media y baja de la pendiente (33 y 50%) y la forma de terreno en la mayoría de los sitios es de lineal a cóncavo (46% y 42%).

Cuadro 6. Distribución de frecuencias de las unidades de muestreo en relación a las variables topográficas evaluadas. Finca El Cerro Florencia de San Carlos, Costa Rica.

VARIABLE	CATEGORIA	<i>Cordia alliodora</i>			<i>Vochysia ferruginea</i>		
		%	N	%	C.V.	N	%
PENDIENTE	< 30	9	69	55	8	33	26
	30 - 40	4	31		10	42	
	> 40	0	0		6	25	
POSICION	Alta	4	30	41	4	17	33
	Media	5	39		8	33	
	Baja	4	31		12	50	
FORMA	Convexo	0	0	21	3	14	30
	Lineal	8	62		11	46	
	Cóncavo	5	38		10	42	

6.3.1. Asociación entre el incremento diamétrico del árbol individual por parcela y variables del sitio

Con el objeto de determinar si el efecto del sitio es mejor que los parámetros intrínsecos del árbol para predecir el incremento diamétrico se correlacionaron las variables del sitio (topográficas y de suelo) con el incremento diamétrico del árbol individual a nivel de la parcela. En el Cuadro 7 se presentan los coeficientes de correlación lineal resultantes y que reportaron significancia en los modelos.

Como se puede observar para *C. alliodora* se encontró una correlación lineal baja negativa y poco significativa entre el porcentaje de acidez y el contenido de potasio ($r = -0.26$, $p=0.0276$ y -0.21 , $p=0.0276$, respectivamente) y el incremento diamétrico. Lo anterior indica que el crecimiento de esta especie es afectado negativamente por mayores contenidos de estos factores en los primeros 12 cm de profundidad del suelo.

Se encontró una correlación lineal baja positiva y poco significativa entre el incremento diamétrico y la forma del terreno ($r=0.20$, $p=0.0335$). y la posición de la

parcela en la pendiente ($r=0.18$, $p=0.0636$) Esto indica que la especie probablemente se desarrolla mejor en aquellos sitios ubicados en las partes bajas con pendientes cóncavas, o en las partes altas con posiciones lineales, pero con pendientes menores del 15%, como en el presente caso. Lo anterior se explica por el hecho que en las partes bajas (o altas con pendientes inferiores) se da una mayor acumulación de sedimentos ricos en nutrientes, lo cual no sucede en las posiciones altas y convexas con pendientes pronunciadas (Coile, 1952).

Cuadro 7. Matriz de correlación entre el incremento diamétrico y las variables del sitio de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* por árbol individual por parcela. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

VARIABLE	<i>Cordia alliodora</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
	r	Prob.	r	Prob.
Arcilla (%)			-0.28	0.0001
Acidez (%)	-0.26	0.0276		
Porcentaje de pendiente (%)			-0.25	0.0001
Potasio	-0.21	0.0276	0.13	0.0382
Forma del terreno	0.20	0.0335	-0.17	0.0075
Zinc*	0.19	0.0487	0.17	0.0073
Posición de la parcela en la pendiente*	0.18	0.0636		
CICE			0.16	0.0114
Fósforo*	0.02	n.s.	0.11	0.0819

La correlación baja positiva y poco significativa encontrada entre el incremento diamétrico y el zinc ($r=0.19$; $p=0.0487$) indica que el crecimiento de la especie se ve favorecido por la presencia de este elemento en el suelo. El contenido de fósforo del suelo no presentó correlación, sin embargo fue significativo en el modelo.

Para el caso de *V. ferruginea* (Cuadro 7) la variable del sitio que arrojó el coeficiente de correlación lineal bajo negativo pero altamente significativo con el incremento diamétrico del árbol individual por parcela, fue el porcentaje de arcilla ($r=-0.28$, $p=0.0001$). Esto indica que el incremento diamétrico de la especie es afectado

negativamente por altos contenidos de arcilla en los primeros 12 cm de profundidad. Lo cual podría estar asociado al drenaje, especialmente si vemos que tampoco le gustan los sitios cóncavos. El porcentaje de pendiente y forma del terreno presentaron correlaciones bajas negativas, pero altamente significativas ($r=-0.25$, $p=0.0001$ y $r=-0.17$, $p=0.0075$) con el incremento diamétrico. Lo anterior indica que el incremento diamétrico de la especie se ve afectado negativamente en sitios de pendientes altas y formas de terreno cóncavas.

Las variables, zinc, la capacidad de intercambio catiónica efectiva, potasio y fósforo, presentaron una correlación lineal baja positiva ($r=0.17$, $p=0.0073$; 0.16 , $p=0.0114$; 0.13 , $p=0.0382$ y 0.11 , $p=0.0819$, respectivamente) con el incremento diamétrico, aunque el grado de asociación es bajo. Esto indica que el crecimiento de la especie se ve favorecido por la presencia de estos elementos en el suelo.

Cabe mencionar que las correlaciones lineales encontradas entre las diferentes variables del sitio relacionadas significativamente con el incremento diamétrico de las especies en estudio indican que el efecto sobre el incremento diamétrico de especies es el resultado de la acción conjunta de estos elementos y los demás factores de sitio. La poca fuerza de asociación, además de la alta variabilidad en el incremento hacen que estos resultados sean muy preliminares.

6.3.2. Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico del árbol individual por parcela en función de las variables del sitio

Generación de los modelos de crecimiento

Se generan modelos de predicción del incremento diamétrico en función de las variables del sitio, cuando se toma en cuenta el incremento diamétrico del árbol individual por parcela [7] con el fin de lograr un mejor ajuste (mayor R^2) en relación al modelo [5].

Las variables que entraron en los modelos son las que contribuyeron a explicar mejor la variación en el incremento diamétrico. No obstante, esto no significa que sean los únicos factores que determinan la variación, ni mucho menos que las variables que no fueron incluidas en los modelos, no tengan relación con el crecimiento de las especies.

Modelo de crecimiento para *C. alliodora*

En la Figura 9 se puede observar el número de variables necesarias para explicar la mayor variación (43%) del incremento diamétrico de la especie *C. alliodora* en función de las variables del sitio. Diez variables explican aproximadamente el 29% de la variación posible, de las cuales, tres explican el 24.4% de esta variación.

El coeficiente de determinación aumenta conforme se incluyen más variables al modelo y se reduce el error estándar (Drapper y Smith, 1981). Sin embargo, no se llega a una estabilización del mismo, o sea que es el punto donde se alcanza la máxima variabilidad explicable con las variables que entraron en el modelo (Revolorio, 1996).

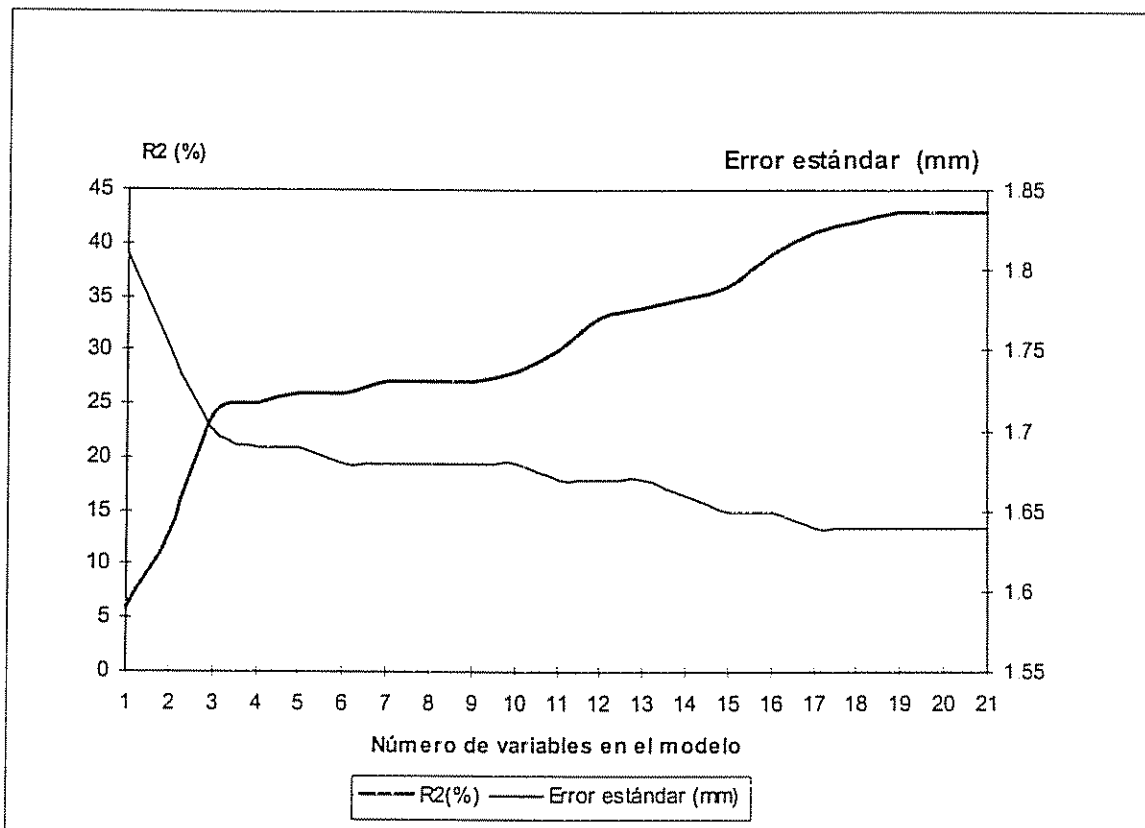


Figura 9. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables en el modelo, para la estimación del incremento diamétrico del árbol individual por parcela de la especie *C. alliodora*.

Por lo tanto considerando las limitaciones derivadas de estas fuentes de variación, se ajustó el siguiente modelo para predecir el incremento diamétrico por árbol individual por parcela, en función de las variables del sitio para la especie *C. alliodora*:

$$I_{ma} \text{ (mm)} = - 0.403 + 0.856 \text{ Posición} - 0.127 \text{ Fósforo} + 0.135 \text{ Zinc} \quad [7]$$

$$R^2 = 24.4\%$$

$$\text{Desviación estándar} = 1.65 \text{ mm}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 20.7\%$$

$$\text{Coeficiente de variación} = 98.1\%$$

La posición de la parcela en la pendiente, fósforo y zinc son las variables que reportaron significancia a un nivel de probabilidad establecido ($p < 0.05$), siendo las que más aportaron para explicar la variación del incremento diamétrico de *C.*

alliodora. Sin embargo, esto no significa precisamente que sean la causa principal de la variación, y mucho menos que las variables no incluidas en el modelo no tengan un efecto significativo sobre el incremento diamétrico, por lo tanto el modelo presentado es uno de los posibles modelos que se pudieron ajustar.

La posición de la parcela en la pendiente y el contenido de zinc fueron significativos en la correlación lineal y también en el modelo. No sucedió lo mismo con la forma del terreno, ya que ésta fue significativa en la correlación pero no en el modelo. En el caso del fósforo sucedió lo contrario, pues no mostró correlación en forma lineal con el incremento diamétrico; sin embargo, cuando actuó en conjunto con las demás variables en el modelo, presentó una probabilidad significativa ($p=0.0469$).

Las variables incluidas en el modelo presentaron correlación significativa entre ellas, lo cual indica que tienen algún grado de colinearidad. Sin embargo, los resultados del análisis de varianza muestran que todos los Factores de Inflación de la Varianza (FIV) están por debajo del valor de 1.3 (Cuadro 12 del Anexo 4) y el Índice de condición tiene un valor de 10.9, lo cual significa que la colinearidad se encuentra en un valor leve, que puede considerarse como aceptable (Gujarati, 1993).

Los residuos presentan una distribución muy cercana a la normalidad, El modelo presentó problemas de heterogeneidad de varianzas Se probaron varias interacciones y transformaciones (logarítmicas y semilogarítmicas) con el fin de obtener mejores ajustes y corregir estas limitaciones en los modelos, pero fueron infructuosas.

Modelo de crecimiento para *V. ferruginea*

El análisis de las correlaciones entre las variables del sitio y entre éstas y el incremento diamétrico de la especie *V. ferruginea*, permiten en primera instancia determinar que variables pueden explicar el mayor porcentaje de la variabilidad en

términos del coeficiente de determinación (R^2). Sin embargo, aunque en el análisis de correlación lineal varias variables resultaron significativas ($p < 0.1$) con el incremento diamétrico, únicamente el porcentaje de pendiente, la posición de la parcela en la pendiente, el contenido de potasio y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), arrojaron significancia en el modelo. No obstante, explican un porcentaje muy bajo de la variabilidad encontrada, pues a pesar de haberse probado varios modelos, interacciones y transformaciones, únicamente se logró obtener un coeficiente de determinación de 16.2%. Además se encontró correlación entre estas variables que provocó colinearidad moderada en el modelo.

Comparación de modelos

En el Cuadro 8 se hace una comparación del incremento diamétrico en función de las variables del árbol (modelo [5]) y las variables del sitio (modelo [7]), con el objeto de determinar si hubo ganancia (mejor ajuste) en la variación explicada del incremento diamétrico.

El modelo [7] no presenta ninguna ventaja con respecto al modelo [5], pues únicamente se obtiene una ganancia de $R^2=1.27\%$, el cual se considera no significativo tomando en cuenta que incluye una variable más. Por lo tanto es necesario tener un período de mediciones mayor (posiblemente un mínimo de 5 años), un número mayor de parcelas y reducir todo lo posible los errores de medición.

Cuadro 8. Comparación del incremento diamétrico en función de las variables del árbol (modelos [5]) y del sitio y [7] para la especie *C. alliodora*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

CONCEPTO	MODELO [5]	MODELO [7]	DIFERENCIA
VARIABLES	2	3	1
R ²	23.1	24.4	1.27
R ² ajustado	20.7	20.7	0
Desviación estándar	1.7	1.7	0
Coefficiente de Variación	98.2	98.1	-0.1

6.3.3. Asociación entre el incremento diamétrico por parcela y las variables del sitio

En este acápite también se correlacionó el incremento diamétrico por parcela en función de las variables del sitio, con el propósito de lograr un mejor ajuste de los modelos. Para efectos de comparación con el modelo generado por Herrera (1996), quien correlacionó y generó modelos de altura dominante para la especie *V. ferruginea* en función de las variables del sitio, se tomaron datos de las mismas parcelas (13 de *C. alliodora* y 24 de *V. ferruginea*).

Para ambas especies únicamente el zinc presentó correlación lineal alta y significativa al 10 por ciento ($p < 0.1$) con el incremento diamétrico por parcela ($r=0.48$, $p=0.0998$ y $r=0.51$ $p=0.0106$, respectivamente). Lo anterior indica que posiblemente el crecimiento de la especie se vea favorecido por la presencia de este nutriente, el cual según Vásquez (1994) se encuentra en cantidades de adecuadas a altas en los suelos del área de estudio.

V. ferruginea presentó correlación alta negativa y significativa entre el incremento diamétrico por parcela y el porcentaje de arcilla y pendiente ($r=-0.50$, $p=0.0120$ y $r=-0.43$, $p=0.0360$, respectivamente). Por lo tanto el incremento diamétrico de la especie se ve afectado en forma negativa por altos contenidos de arcilla en presencia de pendientes pronunciadas.

6.3.4. Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico por parcela en función de las variables del sitio

Para el ajuste de estos modelos se utilizaron las variables del sitio que presentaron correlación significativa al 10 % ($p < 0.1$) con el incremento diamétrico. Más sin embargo, estas variables no fueron las únicas, pues se utilizaron otras variables que en la correlación no reportaron significancia pero que al actuar en conjunto con las demás variables del sitio, presentaron probabilidades significativas en el ajuste de los modelos.

Modelo de crecimiento para *C. alliodora*

La Figura 10 muestra el número de variables que explican la mayor variación en el incremento diamétrico para *C. alliodora*. Se puede observar que diez variables explican aproximadamente el 92% de la variación y de estas, cinco explican cerca del 87% de la misma. Lo anterior sirve de base para escoger las variables a incluir en el modelo. Estos análisis indican que la variación encontrada puede ser explicada con pocas variables (Revolorio, 1996).

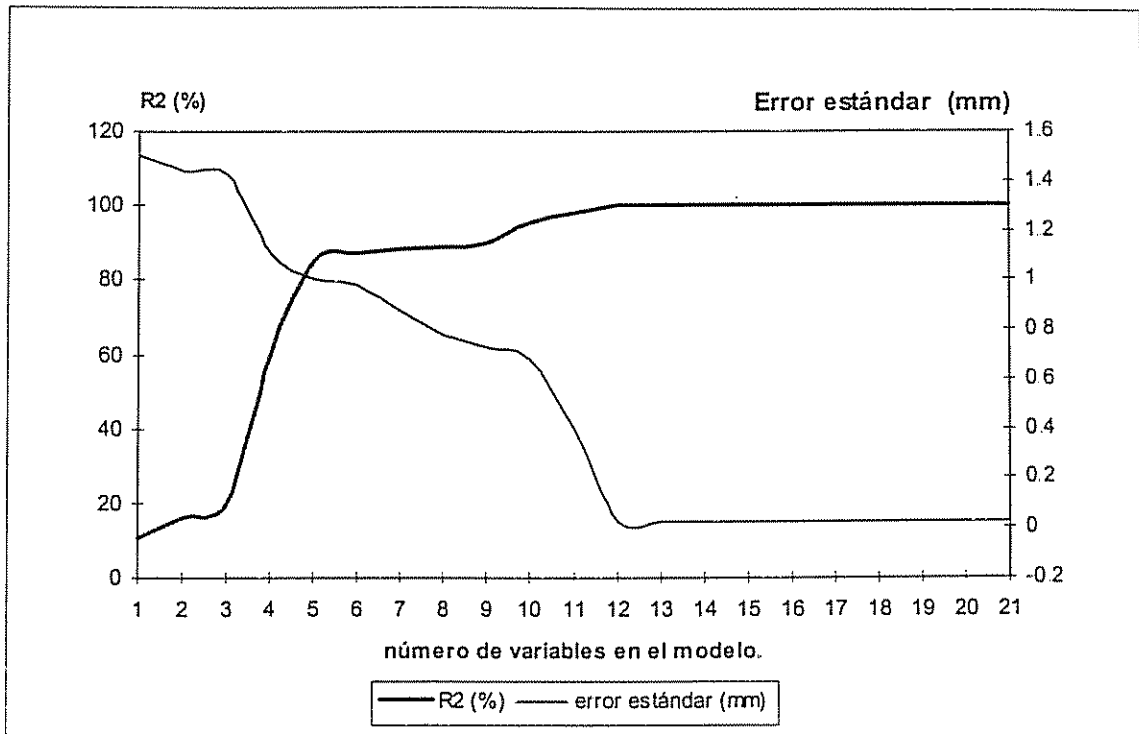


Figura 10. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables en el modelo, para la estimación del incremento diamétrico por parcela de la especie *C. alliodora*, según variables del sitio.

Considerando las limitaciones derivadas de las fuentes de variación el modelo ajustado para la predicción del incremento diamétrico en función de las variables del sitio por parcela de la especie *C. alliodora* es el siguiente:

$$I_{ma} \text{ (mm)} = - 2.985 - 12.381 K - 3.693 Ac + 0.389 CICE + 0.033 Mn + 0.126 Zn \quad [8]$$

$$R^2 = 86.5\%,$$

$$\text{Desviación estándar} = 0.7 \text{ mm}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 76.8\%,$$

$$\text{Coeficiente de variación} = 40\%$$

En el modelo [8] podemos ver que el potasio, porcentaje de acidez, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), manganeso y zinc, presentaron significancia en el modelo a un nivel de probabilidad de 5% (Cuadro 13 del Anexo 4) a pesar de haber sido solo en zinc el que reportó significancia en el análisis de correlación lineal. Lo anterior puede explicarse debido a que en la correlación las

variables se comparan en forma individual con el incremento diamétrico, mientras que en el modelo estas actuaron en forma conjunta, arrojando probabilidades significativas ($p \geq 0.05$).

Para el porcentaje de acidez se reportan valores negativos, lo cual indica que los altos niveles de esta variable en el suelo afecta negativamente el incremento diamétrico de la especie. El potasio se encuentra deficiente debido a que por su movilidad se lixivia rápidamente (De las Salas, 1987). Niveles más altos de este elemento en el suelo favorecería el crecimiento de la planta pues la especie prefiere suelos con adecuadas cantidades de potasio. Bergmann *et al.* (1994), en un estudio en plantaciones de 2.5 años de *C. alliodora* en el Atlántico de Costa Rica, encontraron que la especie requiere (entre otros) niveles altos de este elemento para su crecimiento.

Zech (1994) comprobó en un estudio llevado a cabo en plantaciones forestales de *C. alliodora* y *Gmelina arborea* de 2 años de edad, en la región Huetar Norte de Costa Rica, que *C. alliodora* prefiere las partes bajas y cóncavas o altas (lineales) con bajos niveles de pendiente, que por lo regular son ricos en materia orgánica. Como producto de la influencia de la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), presenta niveles adecuados en estos suelos, lo cual se traduce en ganancia en el crecimiento de la especie. Giraldo *et al* (1980) en plantaciones de *C. alliodora*, en Antioquia, Colombia, obtuvieron un coeficiente de determinación de 75% para un modelo de predicción de índice de sitio en función de la CICE y el pH del suelo. Por su parte el manganeso y el zinc, presentan niveles altos, lo cual favorece el crecimiento de la planta, a pesar de que no tolera suelos ácidos (CATIE, 1994).

Las variables incluidas en el modelo no presentaron correlación significativa entre ellas, esto indica que no se dan problemas de colinearidad entre variables. El análisis de varianza confirma lo anterior al observar que todos los valores del factor de Inflación de la varianza (FIV) son inferiores a 3.6 (Cuadro 13 del Anexo 4);

además el análisis de residuos presentó una distribución normal. El modelo presentó como única limitante, heterogeneidad de varianzas, la cual trató de corregirse a través de interacciones y transformaciones, pero no fue posible.

Como en el presente caso se tienen dos repeticiones en los datos, es posible estimar la variación no explicada por el modelo debido a la falta de ajuste del modelo y la debida al error puro (efecto de las repeticiones o variación entre sitios) (Drapper y Smith, 1981). Como se cuenta con repeticiones es posible estimar el máximo coeficiente de determinación que se alcanzó con las cinco variables que entraron al modelo [8], En el presente caso el máximo coeficiente de regresión alcanzado fue de 97%, por lo que si el R^2 estimado por el modelo es 86.4%; este equivale a un 88% de la variación que es posible explicar (Drapper y Smith, 1981).

La variación debida al error puro (variación entre repeticiones) alcanzó un 2.5%, y la debida a la falta de ajuste (variación no explicada) fue 11.1% cuya interpretación se señaló en el acápite 6.2.3. La prueba de F para la falta de ajuste resultó no significativa, lo cual indica que el cuadrado medio del error puede considerarse un estimador no sesgado del valor esperado de la varianza (Drapper y Smith, 1981).

Una manera apropiada de autovalidar las ecuaciones de predicción del incremento diamétrico es comparando los valores predichos por el modelo con los valores de incremento diamétrico observados en el campo. La Figura 11 muestra estos valores y se puede observar que los valores estimados por el modelo se mantienen bastante uniformes y no muestran tendencia a sobrestimaciones o subestimaciones (Revolorio, 1996).

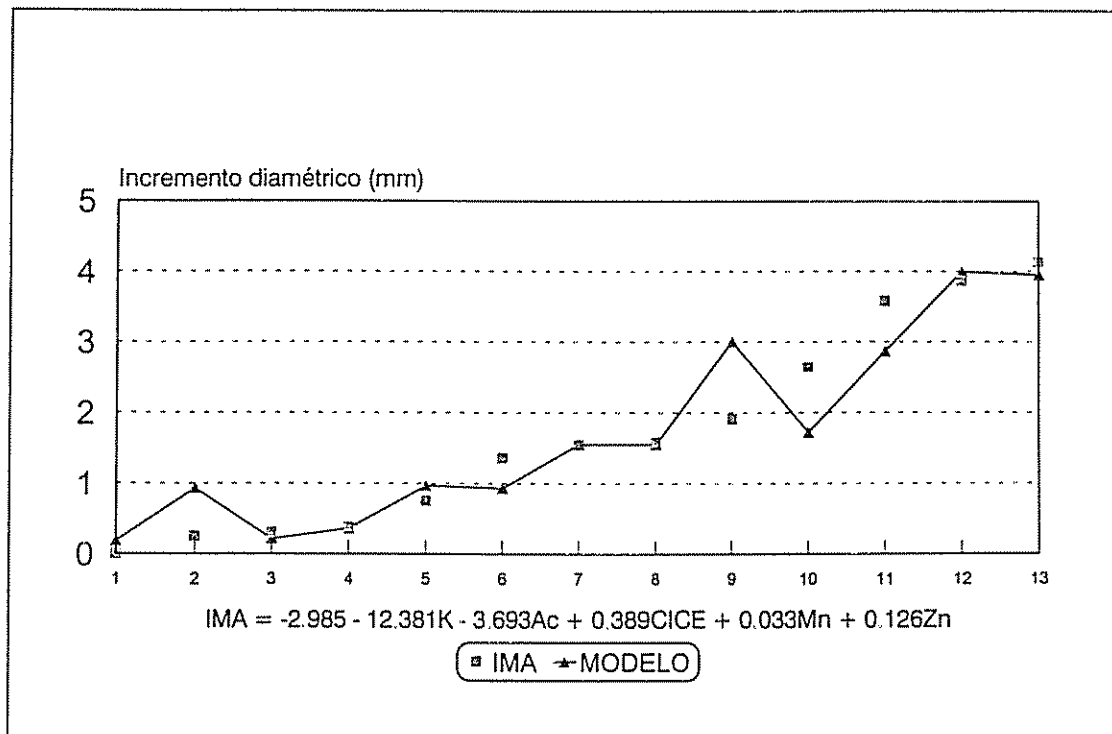


Figura 11. Valores predichos a partir del modelo [8] y valores observados del incremento diamétrico de la especie *C. alliodora*. Finca el Cerro Florencia de San Carlos, Costa Rica. (Adaptado de Herrera, 1996).

Modelo de crecimiento para *V. ferruginea*

En la Figura 12 se observa el número de variables necesarias para explicar la mayor variación del incremento diamétrico de esta especie. Como se puede ver se necesitan cuatro variables para explicar aproximadamente el 58.2% de la variación del incremento diamétrico por parcela.

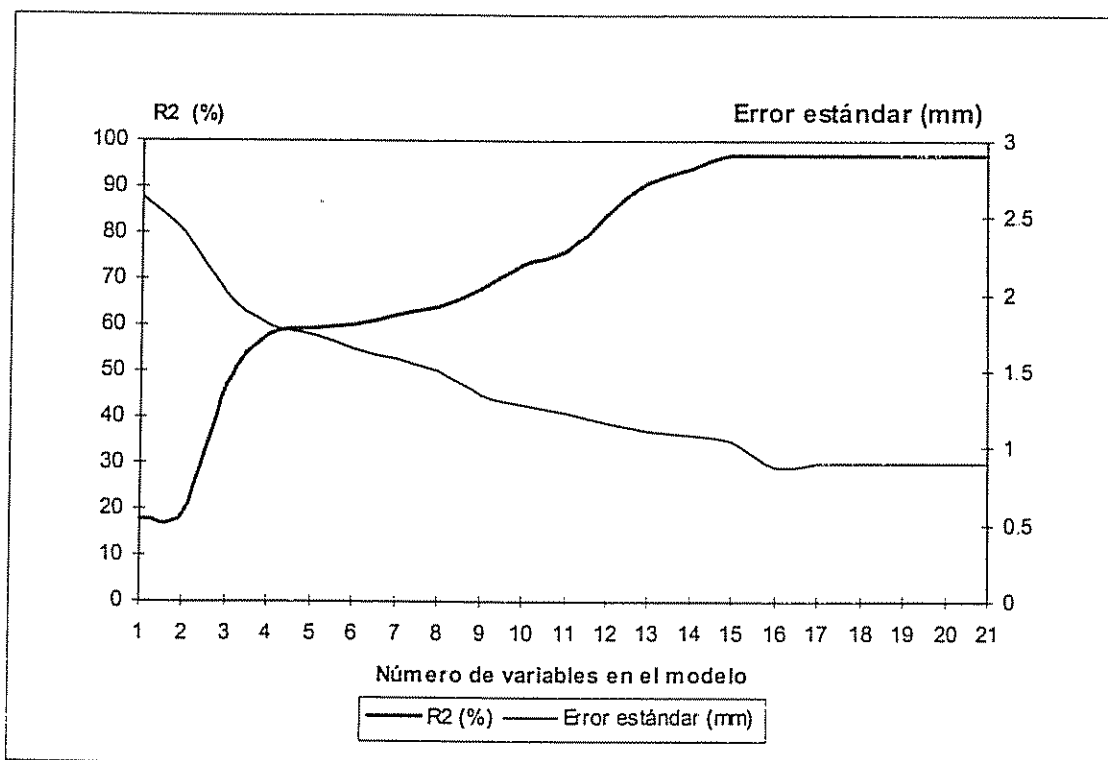


Figura 12. Relación entre el número de variables y el coeficiente de determinación (R^2) y su error estándar (mm) en la estimación del incremento diamétrico por parcela de la especie *V. ferruginea*, utilizando variables del sitio.

Teniendo en cuenta las limitaciones debidas a la variación no explicada por el modelo, se utilizó el incremento diamétrico como variable dependiente y las variables del sitio como variables independientes, para ajustar un modelo de regresión que permita predecir el incremento diamétrico por parcela de la especie *V. ferruginea*, en función de las variables del sitio seleccionadas.

El modelo seleccionado para la predicción del incremento diamétrico de *V. ferruginea* por parcela en función de las variables del sitio, es el siguiente:

$$I_{ma} \text{ (mm)} = 12.824 - 0.309 \text{ Pendiente} + 0.340 P + 18.785 K - 5.242 AC \quad [9]$$

$$R^2 = 58.2\%,$$

$$\text{Desviación estándar} = 2.0 \text{ mm}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 49.4\%,$$

$$\text{Coeficiente de variación} = 38.2\%$$

Todas las variables incluidas en el modelo [9] son significativas a un nivel de probabilidad menor al 5% a pesar de haber sido solo el porcentaje de pendiente el que presentó correlación lineal significativa con el incremento. En el análisis de varianza todos los Factores de Inflación de la Varianza (FIV) asociados con las variables predictivas son inferiores a 2 (Cuadro 14 del Anexo 4); por lo que podemos decir que el modelo no presenta problemas de multicolinealidad. Sin embargo el índice de condición ($ic=17.5$) indica que existen problemas de colinearidad moderados entre variables.

Los residuos se distribuyen de una manera normal, pues su análisis presentó una distribución apegada a la normalidad. El modelo presentó problemas de heterogeneidad de varianzas, las cuales trataron de corregirse a través de transformaciones, pero no fue posible.

La Figura 13 muestra las diferencias entre los valores observados y los predichos por el modelo. Se puede observar que los valores estimados por el modelo se mantienen uniformes y no muestran tendencia a sobrestimaciones o subestimaciones.

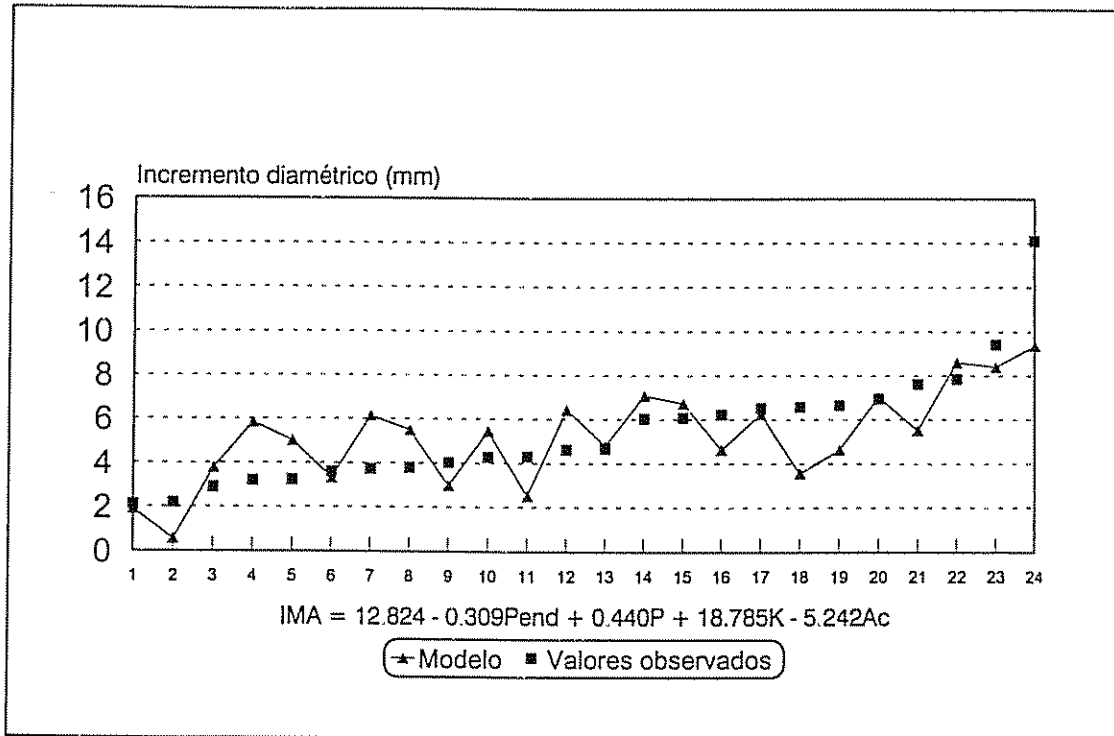


Figura 13. Valores predichos a partir del modelo [9] y valores observados del incremento diamétrico de la especie *V. ferruginea*. Finca el Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica. (Adaptado de Herrera, 1996).

Comparación de los modelos de crecimiento

Herrera (1996) indica que debido al bajo número de observaciones y a la homogeneidad de la altura dominante que mostraron los sitios dominados por *C. alliodora* no encontró correlaciones significativas entre la altura dominante y las variables del sitio, por lo que no fue posible construir modelos. Mientras que para la predicción del incremento diamétrico a pesar de no haberse encontrado correlaciones estadísticamente significativas entre este y las variables del sitio, si fue posible generar el modelo [8] con un buen grado de ajuste, pero el valor del R^2 tan alto, puede ser una limitante sobre el significado o valor biológico del modelo.

En el Cuadro 9 se hace una comparación entre el modelo generado por Herrera (1996) y el modelo [9] para la especie *V. ferruginea*, con el fin de determinar si hubo ganancia (mejor ajuste) en la variación explicada del incremento diamétrico.

Cuadro 9. Comparación entre el modelo generado por Herrera (1996) y el modelo [9] para la especie *V. ferruginea*, obtenido en el presente estudio

CONCEPTO	HERRERA	MODELO [9]	DIFERENCIA
VARIABLES	4	4	0
R ² (%)	79.5	58.2	-21.3
R ² ajustado (%)	75.1	49.4	-25.7
Desviación estandar	1.8 m	2 mm	
Coefficiente de Variación (%)		38.2	

El modelo ajustado por Herrera (1996) para la predicción de la altura dominante, es el siguiente:

$$\text{Alt dom}_{(m)} = 53.93 - 1.25 P + 0.0388 \%Mn - 2.02 \% MO - 0.299 \%Ar$$

$$R^2 = 79.5\%$$

$$\text{Desviación estándar} = 1.8 \text{ m}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 75.1\%$$

Ambos modelos son explicados en función de cuatro variables del suelo, teniendo en común el fósforo. En el modelo generado por Herrera (1996), las variables incluidas presentan una correlación lineal significativa ($p < 0.01$) con la altura dominante, un coeficiente de determinación mayor en 21.3% y el coeficiente de determinación ajustado presenta una ganancia de 25.7% en relación al modelo [9], no presenta problemas de colinearidad y sus residuos se distribuyen uniformemente. Mientras que el modelo [9] la mayoría de sus variables no presentaron correlación con el incremento diamétrico, tiene problemas de colinearidad moderada y heterocedasticidad, así mismo sus residuos se distribuyen también uniformemente.

Con base en la literatura y los resultados mostrados anteriormente se puede decir lo siguiente:

- El contenido de fósforo del suelo es la variable que se asocia con la altura dominante y el incremento diamétrico de la especie.
- El modelo generado por Herrera (1996) presenta un mejor ajuste.
- La altura dominante mostró un mejor ajuste que el incremento diamétrico, por lo que se considera que las variables del sitio se asocian mejor con la altura dominante que con el incremento diamétrico, lo cual confirma lo que dice la literatura (Alder, 1980; Hägglund, 1981; Clutter et al 1983).
- El incremento diamétrico logra explicar un alto porcentaje de la variación a pesar de estar influenciado por la competencia y las intervenciones silvícolas que tienden a disminuir el área basal.
- Debido a períodos cortos de mediciones, alta variación (entre árboles y entre años en el incremento en diámetro de un mismo árbol y dentro de parcelas) y a intervenciones silviculturales, el incremento diamétrico de la especie obtuvo un menor ajuste en el modelo [9]
- Se recomienda tener períodos más largos de observación (mediciones por lo menos de cinco años), mayor cantidad de parcelas y reducir todo lo posible los errores de medición.

6.4. PREDICCIÓN DEL INCREMENTO DIAMÉTRICO A PARTIR DE VARIABLES DEL ÁRBOL Y DEL SITIO

En el presente acápite se pretende evaluar si al incorporar variables del sitio en el modelo conjuntamente con las variables del árbol, ocurre una ganancia en la variación explicada del incremento diamétrico (mejor ajuste), mediante la comparación de los modelos obtenidos aquí y los modelos [5] y [6] generados en el acápite 6.2.3.

6.4.1. Asociación entre el incremento diamétrico y las variables del árbol y del sitio

Las variables que presentan correlación baja con el incremento diamétrico de la especie *C. alliodora* y que fueron significativas en el modelo son la forma de copa ($r = -0.33$; $p = 0.0004$), seguida de la altura ($r = 0.22$; $p = 0.0230$) y el zinc ($r = 0.19$; $p = 0.0487$). Únicamente el diámetro inicial no presentó correlación alguna. Lo anterior indica que los árboles más altos y con buena forma de copa tendrán una mejor actividad fotosintética y en suelos con niveles adecuados de zinc, se traduce en un mayor incremento diamétrico para la especie.

En relación a *V. ferruginea* se encontró correlación lineal alta positiva y altamente significativa ($p < 0.05$) entre el incremento diamétrico y el diámetro inicial, calcio, y zinc (0.57, 0.18, y 0.17). Así mismo se encontró correlación alta negativa y casi significativa con la forma de la copa (-0.61) y correlación baja con la forma del terreno (-0.17). La explicación estriba en que individuos con diámetros mayores y buena forma de copa (característica de la especie), ubicados en las partes altas del terreno con formas cóncavas o lineales y con niveles adecuados de calcio y zinc, tendrán los mayores incrementos diamétricos.

6.4.2. Modelos de regresión múltiple del incremento diamétrico en función de las variables del árbol y del sitio

Modelo de crecimiento para *C. alliodora*

En la Figura 14 se muestra el número de variables que explican la mayor variación en el incremento diamétrico de *C. alliodora*. Observamos que cuatro variables explican el 27.4% de la variación. Esto sirve de base para escoger el número de variables a incluir en el modelo.

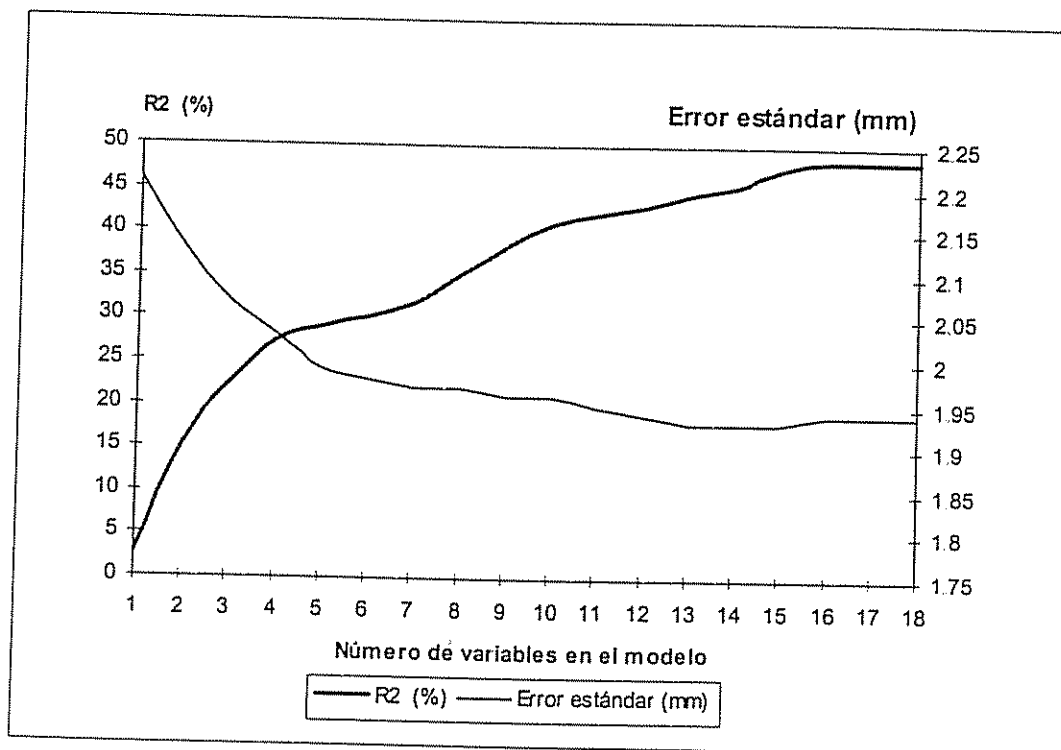


Figura 14. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables del árbol y del sitio para la estimación del incremento diamétrico de la especie *C. alliodora*.

El modelo ajustado para predecir el incremento diamétrico de la especie *C. alliodora*, en función de las variables del árbol y del sitio es el siguiente:

$$\text{Ima (mm)} = 2.653 - 0.021 \text{ Diámetro} + 0.271 \text{ Altura} - 0.018 \text{ Forma de copa} + 0.083 \text{ Zn} \quad [10]$$

$$R^2 = 27.4\%$$

$$\text{Desviación estándar} = 1.9 \text{ mm}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 24.6\%$$

$$\text{Coeficiente de variación} = 107.9\%$$

De las variables incluidas en el modelo únicamente el diámetro no presentó correlación lineal significativa con el incremento diamétrico, pero al actuar en forma conjunta con las demás variables, aportó significancia al modelo. El valor negativo reportado por el diámetro puede deberse a los valores tan bajos encontrados para el incremento diamétrico de la especie. Estas variables presentaron correlación significativa entre ellas lo cual sugiere que hay problemas de colinearidad, sin

embargo, los resultados del análisis de varianza muestran que todos los Factores de Inflación de la Varianza (FIV), son inferiores a 2.6 (Cuadro 15 del Anexo 4), lo cual indica que no hay problemas de colinealidad en el modelo; por otro lado el Índice de condición ($ic=24.4$) indica que esta es moderada.

El modelo presenta algunas limitaciones: los residuos aunque presentan distribución muy cercana a la normalidad, está afectada por algunos valores extremos que la sesgan hacia la derecha. Por medio de la prueba de Bruesch-Pagan se detectó que el modelo también presenta problemas de heterocedasticidad, por lo tanto con el fin de obtener mejores coeficientes de determinación y corregir estas limitaciones en del modelo, se probaron varias transformaciones, pero resultaron infructuosas.

Modelo de crecimiento para *V. ferruginea*

En la Figura 15 se muestra el número de variables que explican la mayor variación en el incremento diamétrico de *V. ferruginea*. Observamos que 6 variables explican el 47.2% de la variación. Esto sirve de base para escoger en número de variables a incluir en el modelo.

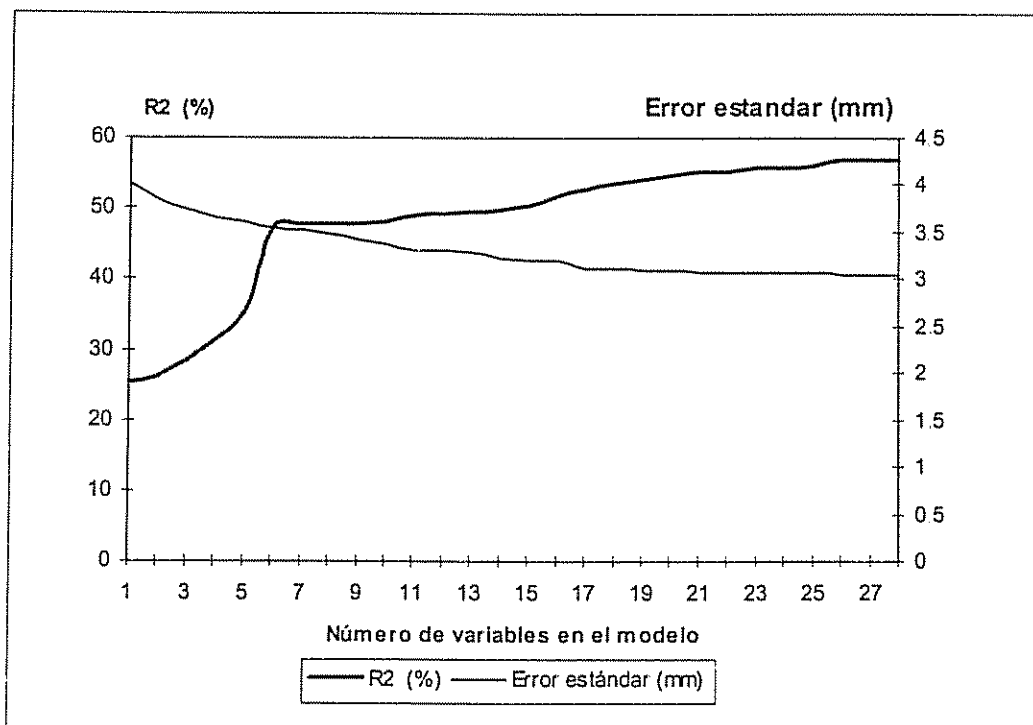


Figura 15. Relación entre el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar (mm) con el número de variables del árbol y del sitio y la estimación del incremento diamétrico de la especie *V. ferruginea*.

El modelo ajustado para la predicción del incremento diamétrico en función de las variables del árbol y del sitio para la especie *V. ferruginea* es el siguiente:

$$\text{Ima (mm)} = - 2.289 + 0.019 \text{ Dap} - 1.804 \text{ Fcopa} + 1.576 \text{ Posición} - 1.284 \text{ Forter} + 0.979 \text{ Calcio} + 0.204 \text{ Zinc} \quad [11]$$

$$R^2 = 47.2\%,$$

$$\text{Desviación estándar} = 3.6 \text{ mm}$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 45.9\%,$$

$$\text{Coeficiente de variación} = 69.6\%$$

Del total de variables incluidas en el modelo, únicamente la posición de la parcela en la pendiente no presentó correlación lineal significativa ($p < 0.05$) con el incremento diamétrico, pero al actuar en forma conjunta con las demás variables resultó significativa en el modelo.

Las variables incluidas en el modelo no presentan correlación significativa entre ellas lo cual indica que no hay problemas de colinearidad entre variables. Lo anterior se confirma con los resultados del análisis de varianza donde se puede observar que todos los Factores de Inflación de la Varianza (FIV) son inferiores a 2.0 (Cuadro 16 del Anexo 4). No obstante el índice de condición ($ic=23.6$) indica que existen problemas de colinearidad moderada.

El modelo presenta algunas limitaciones: aunque presentan una distribución muy cercana a la normalidad, esta es afectada por algunos valores extremos que la sesgan hacia la derecha. Se detectó que el modelo también presenta problemas de heterocedasticidad. Se probaron algunas transformaciones (logarítmicas y semilogarítmicas) con el fin de mejorar los modelos y de corregir estas limitaciones, pero resultaron negativas.

Comparación de modelos de crecimiento

En los Cuadros 10 y 11 se comparan los modelos obtenidos anteriormente [10] y [11], con los modelos [5] y [6] de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* generados en el acápite 6.2.3, con el fin de determinar si hubo ganancia (mejor ajuste) en la variación explicada del incremento diamétrico y por ende, considerar o desechar la posibilidad de incorporar en los modelos las variables del sitio, conjuntamente con las variables intrínsecas de los árboles.

Cuadro 10. Comparación entre el modelo [5] y el modelo [10] para la especie *C. alliodora*

CONCEPTO	MODELO [5]	MODELO [10]	DIFERENCIA
Variables	2	4	2
R ² (%)	23.1	27.4	4.3
R ² ajustado (%)	20.7	24.6	3.9
Desviación estándar	1.65	1.9	0.2
Coefficiente de Variación (%)	98.2	107.9	9.7

Para el caso de *C. alliodora* el modelo [5] únicamente con el diámetro y la altura, explica el 23.1% de la variación del incremento diamétrico, mientras que el modelo [10] necesitó además de las variables anteriores, la forma de copa y el contenido de zinc del suelo para explicar solamente el 27.4% de la variación. Únicamente se consigue una ganancia de 4.3% en la variación explicada del incremento diamétrico a pesar de estar integrado el modelo [10] con el doble de variables, el cual también pierde precisión en relación a la desviación estandar y el coeficiente de variación (0.2 y 9.7 respectivamente).

En relación a *V. ferruginea* el modelo [6] logró explicar el 37.7% de la variación del incremento diamétrico de la especie con las variables diámetro y forma de copa. El modelo [11] necesitó además de estas dos variables, cuatro del sitio (posición de la parcela en la pendiente, forma de terreno y el contenido de calcio y zinc del suelo) para explicar el 47.2% de la variación del incremento. Hubo tan solo una ganancia de 9.5% en la variación explicada con un número de variables tres veces mayor. Podemos afirmar que el modelo [6] da un mejor ajuste, y además tiene sentido biológico, pues el diámetro y la forma de copa están muy asociados al incremento diamétrico.

Cuadro 11. Comparación entre el modelo [6] y el modelo [11] para la especie *V. ferruginea*

CONCEPTO	MODELO [6]	MODELO [11]	DIFERENCIA
Variables	2	6	4
R ² (%)	37.7	47.2	9.5
R ² ajustado (%)	37.2	45.9	8.7
Desviación estandar	3.8	3.6	-0.2
Coficiente de Variación (%)	74.9	69.6	-5.3

El incremento diamétrico parece ser más afectado por las variables intrínsecas del árbol y del rodal, que por variaciones en el sitio, pues al agregar variables del sitio no mejoró el ajuste de los modelos y hubo pérdidas en la estimación del incremento diamétrico. Por lo que se recomienda continuar con

estudios para evaluar el efecto del sitio en el crecimiento de bosques secundarios y determinar la necesidad de incorporar este efecto en la construcción de modelos de crecimiento.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V. ferruginea mostró un incremento diamétrico muy superior a *C. alliodora*; en la primera esta fue de 6 mm año⁻¹, mientras que en la segunda fue de 1.7 mm año⁻¹.

En los árboles del estudio intensivo de crecimiento -aei- el descenso en el segundo período de incremento (95-96) para ambas especies, probablemente se debe al estrés sufrido por los individuos después del tratamiento silvicultural a que fue sometido el bosque a finales del año 1994, recuperándose al final del tercer período, posiblemente porque están respondiendo positivamente al tratamiento.

Para la especie *C. alliodora* se encontró correlación lineal con la altura y la forma de la copa y para los parámetros de los aei se encontró correlación con el diámetro altura y la forma de la copa. Así mismo se encontró correlación lineal entre la posición de la parcela en la pendiente, forma de terreno, potasio, zinc y porcentaje de acidez con el incremento diamétrico de esta especie.

El incremento diamétrico de *V. ferruginea* correlacionó con el diámetro, altura, calidad de fuste, iluminación y forma de la copa y para los aei correlacionó con el diámetro, altura, forma de copa y calidad de fuste.

El modelo [5] explicó un 23.1% de la variación del incremento diamétrico de *C. alliodora*, en función del diámetro y la altura, mientras que para los aei se explicó un 26.7% de la variación del incremento diamétrico en función de la altura únicamente, por lo que el modelo se considera de poco valor práctico por los errores que conlleva la medición de esta variable.

El modelo [6] explicó un 37.7% de la variación del incremento diamétrico en función de el diámetro y la forma de copa, por lo que se considera el modelo bastante lógico desde el punto de vista biológico, pues estas variables están muy

asociadas al incremento diamétrico. Para los aei el modelo únicamente logró explicar solamente un 12.2% de la variación del incremento diamétrico en función del diámetro y la forma de copa.

En el modelo [7] la variación del incremento diamétrico fue posible explicarla en un 24.4%, en función de la posición de la parcela en la pendiente, fósforo y zinc. Mientras que para *V. ferruginea* únicamente presentó un 16.2% en función del porcentaje de pendiente, posición de la parcela en la pendiente, potasio y CICE.

El modelo [8] logró explicar un 86.5% de la variación, en función del potasio, porcentaje de acidez, CICE, manganeso y zinc. Los altos niveles manganeso parece ser que no afectan el crecimiento de la planta, a pesar de considerarse una especie no tolerante .

El modelo [9] explicó un 58.2% de la variación del incremento diamétrico de *V. ferruginea*, en función del porcentaje de pendiente, fósforo, potasio y porcentaje de acidez; pero al compararlo con el generado por Herrera (1996), no presentó un mejor ajuste, por lo que se considera que las variables del sitio se asocian mejor con la altura dominante que con el incremento diamétrico.

Los bajos ajustes observados en la mayoría de los modelos obtenidos puede ser debido a los cortos periodos de mediciones, alta variación (entre árboles, entre años en el incremento diamétrico de un mismo árbol y dentro de parcelas) errores de medición y a las intervenciones silviculturales. Se recomienda tener periodos más largos de medición, mayor número de parcelas y reducir todo lo posible los errores de medición.

Para la evaluación de la asociación entre el incremento diamétrico de *C. alliodora*, en función de variables del árbol, adicionando las variables del sitio, se encontró correlación lineal entre la altura, forma de copa y zinc. El modelo [10], logró explicar el 27.4% de la variación en función de el diámetro, altura, forma de copa y

zinc. Mientras que, *V. ferruginea* correlacionó con el diámetro, forma de copa, forma del terreno, calcio y zinc; y el modelo [11] explica el incremento diamétrico en un 47.2%, en función del diámetro, forma de copa, posición de la parcela en la pendiente, forma del terreno, calcio y zinc.

En los modelos [10] y [11] existe únicamente una ganancia en la variación explicada del incremento diamétrico de 4.3% y 9.5%, respecto a los modelos [4] y [5], a pesar de estar formados por el doble y triple de variables. Al agregar variables del sitio no mejoró el ajuste de los modelos y hubo pérdidas en la precisión de la estimación del incremento diamétrico, el cual parece ser más afectado por variables intrínsecas del árbol que por variables del sitio. Se recomienda continuar con estudios para evaluar el efecto del sitio en el crecimiento de bosques secundarios y determinar la necesidad de incorporar este efecto en la construcción de modelos de crecimiento

8. BIBLIOGRAFIA

- ALDER, D.** 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento; con referencia especial a los trópicos. Roma. FAO:MONTES 22/2. v. 2 198 p.
- _____. 1983. Growth and yield of the mixed forest of the humid tropics: a review. Consultancy report prepared for the FAO of the United Nations. Oxford, G.B. 44p.
- _____. **SINNOTT, T.J.** 1992. Permanent sample plot techniques for mixed tropical forest. Oxford, Inglaterra. Oxford Forestry Institute. Tropical Forestry Papers No. 25. 124 p.
- ALFARO M., M.A.** 1983. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en el Valle Central de Costa Rica. Tesis Ing. For. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias de la Tierra y Mar, Escuela de Ciencias Ambientales. Costa Rica. 111 p.
- AUTEN, J.** 1945. Prediction of site index for Yellow Poplar from soil and topography. Journal of Forestry (EE.UU.) 43(9):662-668.
- BAKER, S.** 1950. Principles of silvicultural. New York, McGraw Hill. 414 p.
- BERGMANN, C.; STUHRMANN, M.; ZECH, W.** 1994. Site factors, foliar nutrient level and growth of *C. alliodora* plantations in the humid lowlands of Northern Costa Rica. Plant and Soil 166: 193-202.
- BUDOWSKI, G.** 1963. Forest sucesion in tropical lowlands. Turrialba (C.R.) 13 (1):42-44.

_____. 1965. La sucesión forestal y su relación con antiguas prácticas agrícolas en el trópico americano. IICA. Turrialba, Costa Rica. 7 p.

CAMACHO, L. 1996. Modelos de crecimiento y rendimiento forestal. Notas del curso: Dasometría. Programa Post-grado. Turrialba, Costa Rica. CATIE. s.p.

CAMPOS, J. 1989a. Curvas de índice de sitio para *Eucalyptus camaldulensis* en América Central. In: Actas reunión IUFRO (1989, Guatemala). "Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple". Rodolfo Salazar. CATIE. Turrialba, Costa Rica. p. 351-367.

_____. 1989b. Asociación de índice de sitio con variables ambientales. In: Actas reunión IUFRO (1989, Guatemala). "Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple". Rodolfo Salazar. CATIE. Turrialba, Costa Rica. p. 368-386.

_____. 1989c. Environmental effects on the productivity of *Eucalyptus camaldulensis*, *Leucaena leucocephala* and *Gliricida sepium* in Central América. Tesis Doc. Phill. University of Oxford. 156 p (sin apéndices).

CARMEAN, W. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Advances in Agronomy* 27:209-255.

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. 1994. Laurel (*Cordia alliodora*) especie de árbol de uso múltiple en América Central. Serie Técnica. Informe técnico No. 239. Turrialba, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 41p.

_____. 1995. *Vochysia (Vochysia ferruginea)* especie de árbol de uso múltiple en América Central. Serie Técnica. Informe técnico No. 261. Turrialba, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 26p.

- COLAN, V.** 1995. Ecología de frutos y semillas de seis especies maderables en un bosque húmedo tropical secundario de Costa Rica y posibilidades de conservación del rodal en fuente de semilla. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 90 p.
- COILE, T.** 1952. Soil and the growth of forest. *Advances in Agronomy*. (New York) 4 ():323-397.
- CURTIS, R.** 1964. A Stem-Analysis Approach To Site-Index Cruves. *Forest Science* (10)2:241-256.
- CLUTTER, J.; FORTSON, J; PIENAAR,; BRISTER, H.; BAYLEY, R.** 1983. Timber management: a quantitative approach. New York. John Willey & Sons. 333 p.
- DANCE, C.; MALLEUX, O.** 1975-1976. Estudio de una metodología para la determinación de edades en bosques tropicales en bosques naturales. *Revista forestal del Perú*. 6(1-2):33-40.
- DANIEL, T.; HELMS, J.; BAKER, F.** 1979. Principles of silviculture. Second edition. New York. McGraw-Hill Book Company. 500 p.
- DAUBENMIRE, R.** 1976. The use of vegetation in assessing the productivity of forest lands. *Botanical Review (EE.UU)* 42(2):115-143.
- DAVIS, K.** 1966. Forest management regulation and valuation. Second edition. New York. McGraw Hill Book Company. 519 p.
- DAWKINS, H.** 1956. Rapid detection of aberrant girth increment of rain forest trees. *The Empire Forestry Review* 35(4):449-454.

- DONOSO, C.** 1981. Ecología Forestal; el bosque y su medio ambiente. Santiago, Chile. Ed. Universitaria. 369 p.
- DRAPPER, N.; SMITH, H.** 1981. Applied regression analysis. Second edition. New York, EEUU. John Wiley & sons. 709 p.
- ESCOBEDO L., M.A.** 1995. Indices de sitio para *Pinus pseudostrobus Lindl.*, en los departamentos de Chimaltenango y Sololá. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 80 p.
- FASSBENDER, H.; BORNEMISZA, E.** 1987. Química de suelos con énfasis de suelos de América Latina. Segunda edición. San José, Costa Rica. IICA. 420p.
- FINEGAN, B., SABOGAL, C.** 1988. El desarrollo de sistemas de producción sostenible en bosques tropicales húmedos de bajura: un estudio de caso en Costa Rica. El Chasqui No. 17:3-24.
- FINEGAN, B.** 1992. El potencial de manejo de los bosques húmedos secundarios neotropicales de las tierras bajas. Traducido por: Ricardo Lujan. Serie Técnica. Informe Técnico No. 188. Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Naturales No. 5. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 29 p.
- _____. **GUILLÉN, L.** 1992. Crecimiento y rendimiento de bosques húmedos secundarios en Sarapiquí, Costa Rica, y los factores que lo determinan. In: II Congreso Forestal Nacional (San José, Costa Rica). Resumen de ponencias. San José, Costa Rica. p 142-144.
- _____. 1996a. Introducción a la ecología de poblaciones. Notas del curso Bases ecológicas para la producción sostenible. Programa de Post-grado. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 17 p.

_____. 1996b. La competencia vegetal. Notas del curso Bases ecológicas para la producción sostenible. Programa de Post-grado. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 11 p.

_____. 1996c. Los ambientes forestales tropicales y el ajuste de las especies vegetales. Notas del curso Bases ecológicas para el manejo forestal sostenible. Programa de Post-grado. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 15 p.

_____. 1996d. Comunidades de bosques tropicales: historia, perturbación y el efecto del medio ambiente físico. Notas del curso Bases ecológicas para el manejo forestal sostenible. Programa de Post-grado. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 52 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO).

1981. Proyecto de evaluación de los recursos forestales de la América Tropical. FAO. Informe Técnico no. 1. 343 p.

_____. 1985. Evaluación de tierras con fines forestales. Estudio FAO Montes 48. Organización de las Naciones Unidas par la Agricultura y la Alimentación. Roma. 106 p.

GUILLÉN, L. 1993. Inventario comercial y análisis silvicultural de bosques húmedos secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica. Tesis Lic. en Silvicultura Tropical. Programa de Licenciatura forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 97 p.

GIRALDO, L.G.; DEL VALLE, J.I., ESCOBAR, M. 1990. El crecimiento del nogal (*Cordia alliodora*) Ruiz & Pavon Oken en relación con algunos factores climáticos, edáficos y fisiográficos en el sureste de Antioquia (Colombia). Revista Facultad Nacional de Agronomía. 32(1): 21-32.

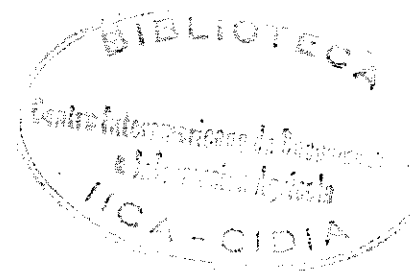
- GOMEZ-POMPA, A.; VAZQUEZ-YANEZ, C.** 1981. Successional studies of a rain forest in México. In: West, D.C., Shugart, H.H., Botkin, D.B. (eds) Forest Succession: concepts and applications. Berlin, Alemania, Springer-Verlag. p. 246-266.
- GUJARATI, D.** 1993. Econometría. Trad. por Victor M. Mayorga. T. Segunda Edición. México. Mcgraw-Hill. 597 p.
- HÄGGLUND, B.** 1981. Evaluation of forest site productivity. Forestry Abstract 42(11)515-527.
- HENRIQUEZ, C.; BERTSCH, F.; SALAS, R.** 1995. Fertilidad de suelos. Manual de laboratorio. San José Costa Rica, Asociación Costarricense del Suelo. 64 p.
- HERRERA, R.** 1990. Evaluación financiera del manejo del bosque natural secundario en cinco sitios en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 109 p.
- HERRERA F., B.** 1996. Evaluación del efecto del sitio en la productividad de las poblaciones de dos especies forestales dominantes en un bosque tropical de la tercera fase de la sucesión secundaria en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 152 p.
- HUGHELL, D.** 1990. Modelo para la predicción de crecimiento y rendimiento de *Ecalyptus camaldulensis*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en América Central. MADELEÑA/CATIE. Turrialba. Costa Rica. 57 p.
- _____. 1991. Lineamientos para el desarrollo de modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de árboles de uso múltiple. MADELEÑA/CATIE. Turrialba, Costa Rica. 131 p.

- HUTCHINSON, I.** 1993. Puntos de partida y muestreo diagnóstico para la silvicultura de bosques naturales del trópico húmedo. Traducido por Ricardo Luján. Serie Técnica. Informe Técnico No. 204. Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Naturales No. 7. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 32 p.
- ISOLAN, F.B.** 1972. Estudio da qualidade de sitio para *Pinus caribaea* Morelet var *Hondurensis* Barrett e Golfari no cantão de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. IICA, Centro Tropical de Ensino e Pesquisa, Departamento de Ciências Florestais Tropicais. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 83 p.
- ITZEP M., A.** 1995. Indices de sitio y desarrollo de un modelo preliminar de rendimiento para *Pinus oocarpa* Schiede en las fincas Santa Rosalía, Gualán, Zacapa y Salamá I, Salamá, Baja Verapaz. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 99 p.
- JADAN, P.; S.V.** 1972. Sistema de clasificación de índice de sitios para *Eucalyptus deglupta* BL en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 98 p.
- JOHN, H.; TSCHINKEL, H.** 1971. Parcelas forestales permanentes: su establecimiento, medición y análisis. Medellín. Universidad Nacional de Colombia/FAO. 190 p.
- KLEPAC, D.** 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales 2ed. Chapingo, México, Universidad Autónoma Chapingo. 365 p.
- LOJAN, L.** 1965. Aspectos de crecimiento diamétrico quincenal de algunos árboles tropicales. Turrialba 15(3):231-237

- ORTEGA V., H.** 1986. Factores edáficos y topográficos que determinan la calidad de sitio en plantaciones jóvenes de *Pinus caribaea var, hondurensis* en Pavones, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 110 p.
- ORTEGA , A.; MONTERO, G.** 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología (Esp)* (2):155-184.
- PEREZ, J.; BORNEMISZA, E.; SOLLINS, P.** 1993. Identificación de especies forestales acumuladoras de aluminio en una plantación forestal experimental ubicada en Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 17(2): 99-103.
- REED, K.** 1980. An ecológica approach to modeling growth of forest trees. *Forest Science* 26(1):33-50.
- REVOLORIO, A.** 1996. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas, Guatemala. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 141 p.
- SALAS, G. DE LAS.** 1974. Factores edáficos y climáticos en la clasificación de sitios forestales. *Bosques de Colombia (Co)* 1:15-30.
- SITOE, A.** 1992. Crecimiento diamétrico de especies maderables en un bosque húmedo tropical bajo diferentes intensidades de intervención. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 119 p.
- SOCIETY OF AMERICAN FORESTERS.** 1958. *Forestry terminology: a glosary of technical terms used in foresrty.* Third edittion. Washington DC. 97 p.

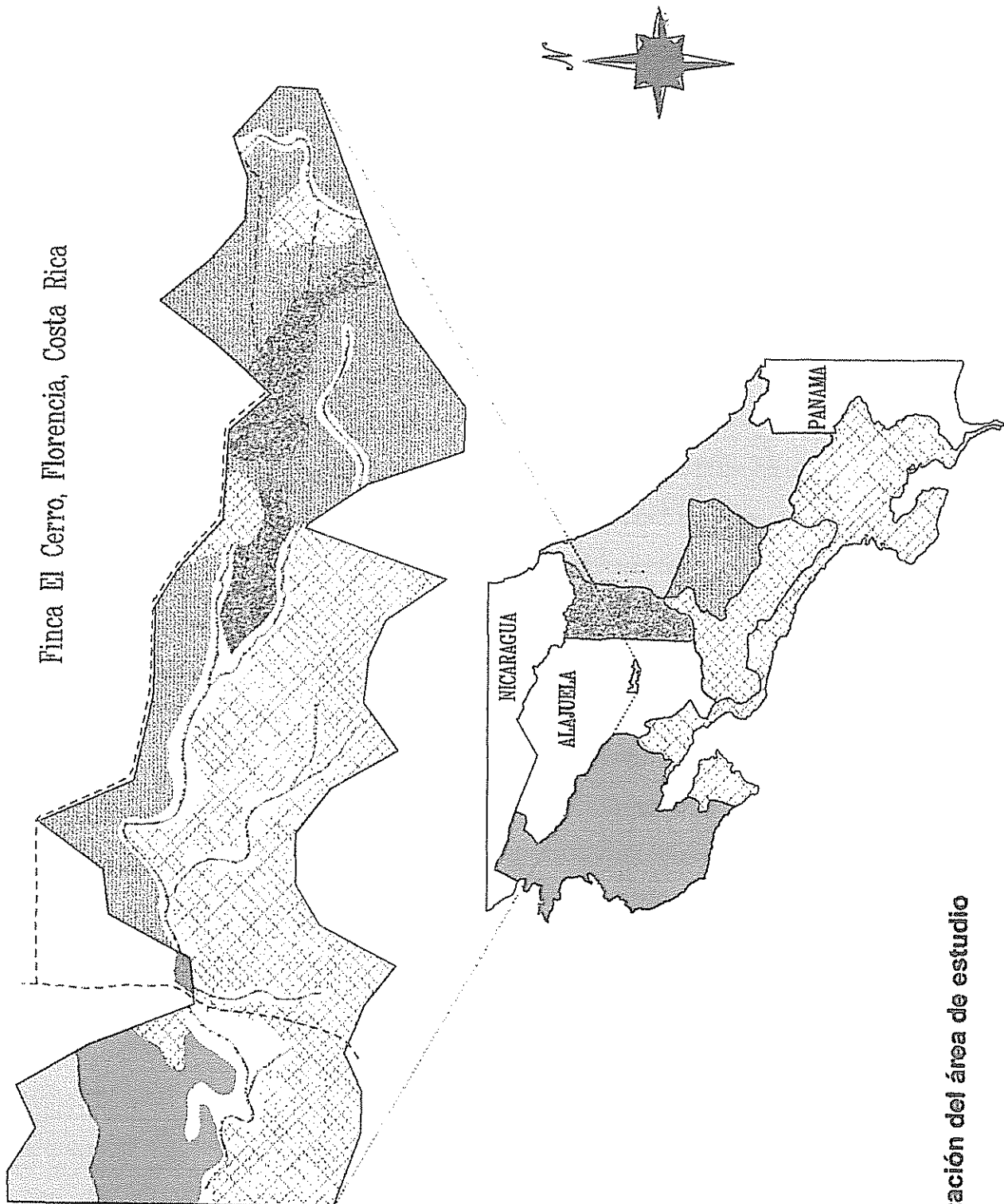
- SOMARRIBA, E.; BEER, J.** 1987. Dimensions, volumes and growth of *Cordia alliodora* in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management (Holanda)* 18(2): 113-126.
- SPURR, S.** 1964. Site. *Forestry Ecology*. Nev York . John Wiley & Sons Inc. 125-149 p.
- SYNNOTT, T. J.** 1991. Manual de procedimientos de parcelas permanentes para bosque húmedo tropical. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 103 p.
- TAYLOR, R.** 1932. Plant indicators in Southeastern Alaska. *Journal of Forestry (EE.UU.)* 30(6):746
- TESCH, S.D.** 1981. The evolution of forest yield determination and site clasification. *Forest Ecology and Management*. 3: 169-182.
- TSCHINKEL, H.** 1972. La clasificación de de sitios y el crecimiento del *Crupessus lusitanica* en Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía (Col.)* 27(1):3-30.
- VANCLAY, J.** 1989. A tree model for north Queensland rainforests. *Forestry Ecology Management* . 27:245-271.
- _____. 1991. Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rain forests. *Forestry Ecology Management* . 42:143-168.
- _____. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forest. Wallingford, Reino Unido. CAB international. 312 p.

- VASQUEZ, W. 1987. Desarrollo de índices de sitio y selección de un modelo preliminar de rendimiento para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en la reserva forestal La Yeguada, Panamá. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 113 p.
- _____ ; UGALDE, L. 1996. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea*, en Guanacaste, Costa Rica. Notas del Curso: Silvicultura de Plantaciones Forestales. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 13 p.
- VINCENT, L. 1980. Manejo de plantaciones forestales con fines de producción. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado, Departamento de Manejo de Bosques. 151 p.
- ZECH, W. 1994. Metodología práctica para la identificación de sitios para reforestación en la Zona Norte de Costa Rica, en especial con melina y laurel. Documento del Proyecto No. 39. COSEFORMA. San José, Costa Rica. 53 p.



9. ANEXOS

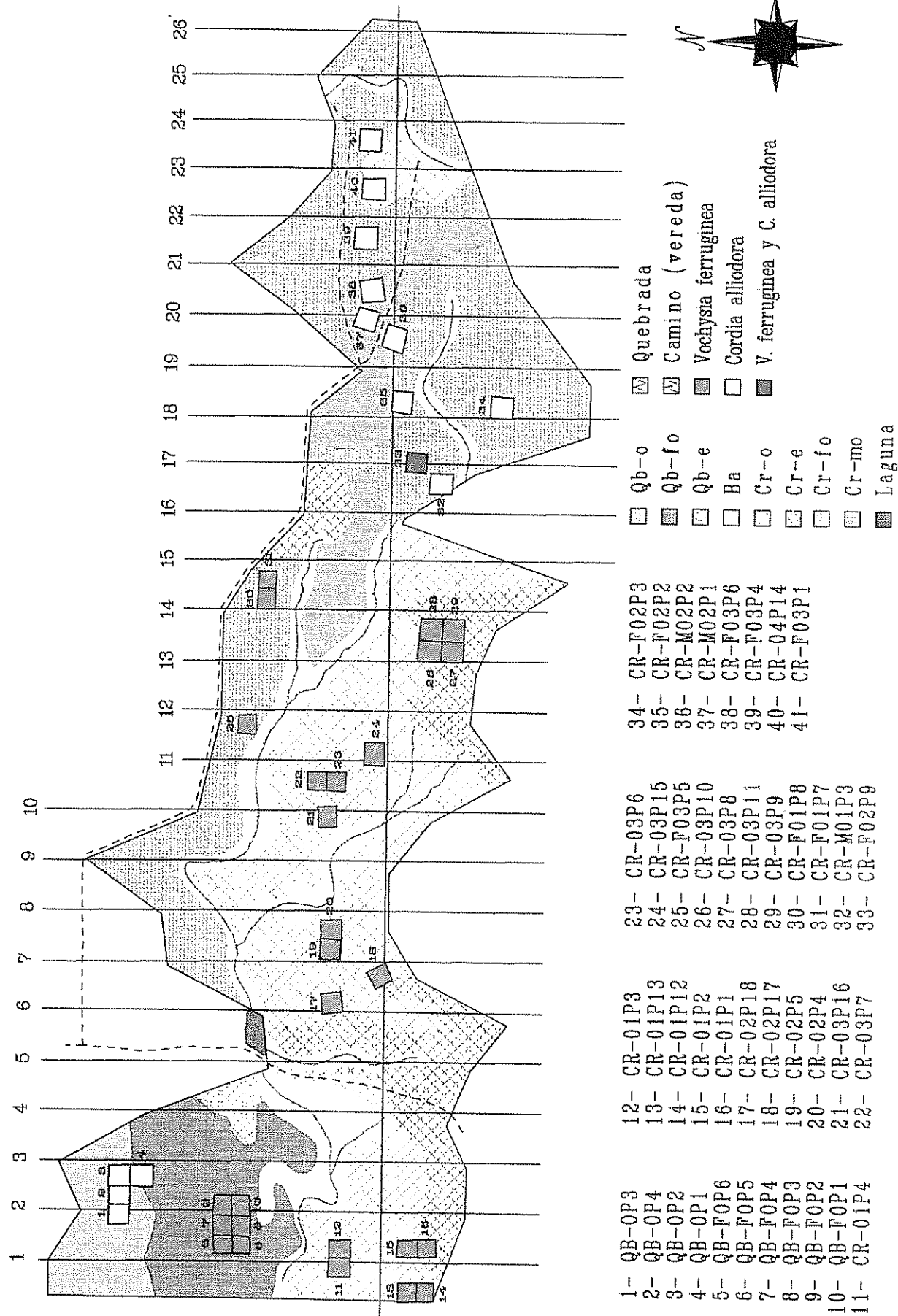
9.1. Anexo 1



Finca El Cerro, Florencia, Costa Rica

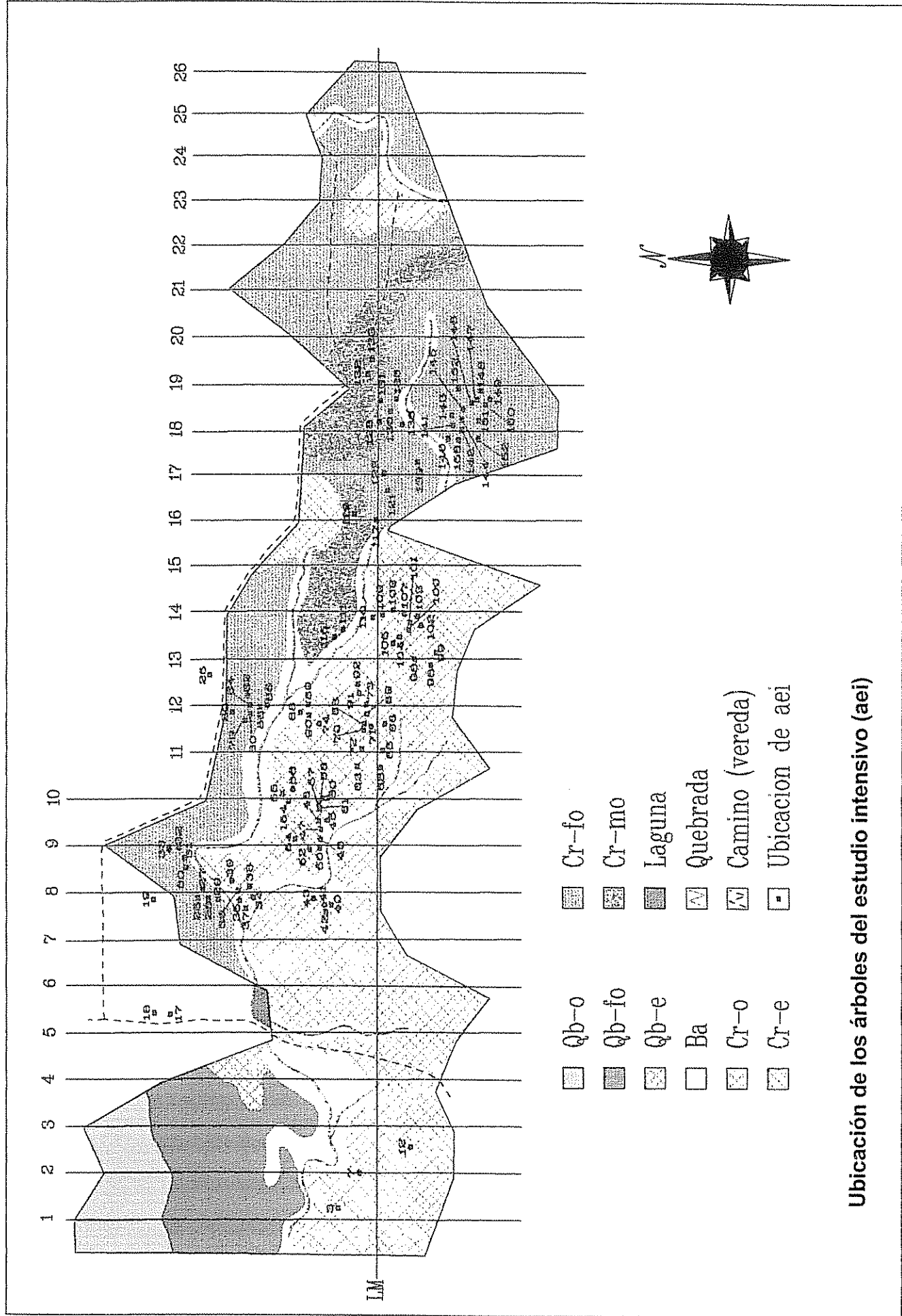
Localización del área de estudio

9.2. Anexo 2



Ubicación de las parcelas de medición temporal

9.3. Anexo 3



Ubicación de los árboles del estudio intensivo (aei)

9.4. Anexo 4.

Cuadro 1. Valores mínimos, máximos, medios y coeficiente de variación para las variables físicas y químicas del suelo a una profundidad de 0- 12 cm. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

VARIABLE	<i>Cordia alliodora</i> ^{no suman 100%}				<i>Vochysia ferruginea</i>			
	MIN	MAX	MEDIANA	C.V.	MIN	MAX	MEDIANA	C.V.
(%) Ar	25	33	36	12	18	41	26	22
(%) Li	13	27	15	23	7	26	16	29
(%) Arc	44	60	52	8	44	66	56	9
Ca (cmol(+)/L)	3.3	14.2	6.9	47	2.9	7.8	4.8	26
Mg (cmol(+)/L)	1.7	3.2	2.4	21	1.2	3.7	2.1	24
K (cmol(+)/L)	0.1	0.5	0.2	52	0.1	0.5	0.2	55
Ac (cmol(+)/L)	0.1	1.1	0.3	65	0.3	1.1	0.6	39
CICE (cmol(+)/L)	6.2	17.8	9.8	37	5.3	15.4	10.4	24
P (mg/L)	3.1	13.5	6.8	44	2.5	11.5	6.3	43
Cu	22.7	41.4	29.7	15	18.1	33.4	26	13
Fe	164	452	246	30	152	397	262	30
Mn	40.6	197	90	61	14.4	123	51.7	52
Zn (mg/L)	3.8	23	9.7	61	2.1	23	6	80
B	0.4	2.5	0.6	62	0.4	2.3	0.7	62
S	30.3	61.1	34.8	21	24.4	66.6	39.8	26
% MO	5	9	8	12	5.2	9.1	7.6	12
pH agua 1:2.5	4.9	5.4	5.2	4	4.8	5.4	5.2	3.4

Cuadro 2. Porcentaje del número de árboles (N ha⁻¹) y área basal (m² ha⁻¹) por clases diamétricas de las especies *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea*. (Los datos entre paréntesis corresponden a los porcentajes). Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

ESPECIE	CLASES DIAMETRICAS											
	10-19.9		20-29.9		30-39.9		40-49.9		50-59.9		Total	
	N	AB	N	AB	N	AB	N	AB	N	AB	N	AB
<i>C. alliodora</i>	34 (49)	0.66 (25)	28 (40)	1.39 (32)	7 (10)	0.60 (23)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	69 (100)	2.65 (100)
<i>V. ferruginea</i>	60 (37)	1.10 (12)	58 (36)	2.85 (31)	31 (19)	2.85 (31)	10 (6)	1.62 (18)	4 (2)	0.79 (8)	162 (100)	9.20 (100)

Cuadro 3. Número de árboles por clases diamétricas del estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

ESPECIE	CLASES DIAMETRICAS											
	10-19.9		20-29.9		30-39.9		40-49.9		50-59.9		Total	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
<i>C. alliodora</i>	9	21	17	39	16	36	1	2	1	2	44	100
<i>V. ferruginea</i>	10	16	20	33	17	28	8	13	6	10	61	100

Cuadro 4. Incremento diamétrico medio anual y coeficiente de variación de *Cordia alliodora*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

PARCELA	IMA (mm)	NUMERO DE INDIVIDUOS	C.V. (%)
CR FO2P2	3.6	6	118.2
CR FO2P3	1.9	5	107.5
CR FO2P9	4.1	5	73.6
CR FO3P1	2.6	7	93.8
CR FO3P4	0.4	4	227.7
CR FO3P6	0	8	0.0
CR MO2P1	0.3	5	278.9
CR MO2P2	0.8	7	117.4
CR O4P14	3.9	7	73.2
QB OP1	1.5	13	124.8
QB OP2	1.6	6	100.7
QB OP3	0.3	8	161.5
QB OP4	1.4	8	68.1
CR FO1P8*	2	1	.
CR FO3P5*	2	2	.
CR MO1P3	1.3	2	141.4
CR O1P1	0.5	3	69.3
CR O1P12*	4	1	.
CR O1P13	4	2	60.6
CR O1P3	2	2	0.0
CR O1P4*	1	1	.
CR O2P18*	1	1	.
QB O3P6	1	2	47.1
QB FOP2	1.3	2	198.0
QB FOP5	1	3	173.2
QB FOP6	0.2	3	173.2

* En estas parcelas no se registró coeficiente de variación debido a que en las mismas solamente había un individuo comparable.

Cuadro 5. Incremento diamétrico medio anual y coeficientes de variación de *Vochysia ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

PARCELA	IMA (mm)	NUMERO DE INDIVIDUOS	C.V. (%)
CR FO1P7	7.6	7	49.1
CR FO1P8	4.6	6	103.1
CR FO2P9*	14.1	7	43.9
CR FO3P5	9.4	5	100.1
CR MO1P3	6.5	9	43.2
CR O1P1	3.7	16	85.7
CR O1P12	3.0	17	90.7
CR O1P13	4.0	20	89.0
CR O1P2	3.2	12	80.0
CR O1P3	1	22	140.9
CR O1P4	2.8	24	125.9
CR O2P18	7.8	6	52.3
CR O2P4	3.6	8	63.9
CR O2P5	3.8	9	39.2
CR O3P10	3.2	5	73.8
CR O3P11	2.9	15	82.5
CR O3P15	6.6	7	81.4
CR O3P6	6	4	70.8
CR O3P7	4.6	7	56.5
CR O3P8	2.5	12	14.8
CR O3P9	2.1	12	89.4
QB FOP1	6.1	10	69.9
QB FOP2	6.9	8	46.5
QB FOP3	6.2	10	87.8
QB FOP4	6.6	7	58.7
CR FO3P6*	2	2	.
CR MO2P1	9.3	2	42.0
CR O2P17	4.0	4	101.6
CR O3P16	7.4	4	14.0
QB FOP5	9.9	4	66.1
QB FOP6	11.0	2	141.4
QB OP3	21.3	3	21.8

* En esta parcela no se registró coeficiente de variación debido a que en la misma solamente había un individuo comparable.

Cuadro 6. Diámetro a la altura del pecho, altura total, altura dominante e incrementos medios de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* (valores mínimos, máximos y medios) Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

ESPECIE	VARIABLE	MINIMO	MAXIMO	MEDIO
<i>Cordia alliodora</i>	Dap (mm)	113	343	213
	ima (mm año ⁻¹)	-2	10	1.7
	Altura (m)	11.0	29.5	20.8
	ima (m año ⁻¹)	-1.0	2.8	0
	Hdom (m)	19.5	23.8	22.1
<i>Vochysia ferruginea</i>	Dap (mm)	100	543	251
	ima (mm año ⁻¹)	-2.0	26	6.0
	Altura (m)	10.8	32.3	19.8
	ima (m año ⁻¹)	-1.0	2.0	0.2
	Hdom (m)	16.0	27.9	22.5

Cuadro 7. Características de los árboles del estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

ESPECIE	VARIABLE	MINIMO	MAXIMO	MEDIO
<i>Cordia alliodora</i>	Dap (mm)	153	516	274
	ima (mm año ⁻¹)	-0.10	12.8	4.6
	Altura (m)	14.7	33.3	24
<i>Vochysia ferruginea</i>	Dap (mm)	153	562	319
	ima (mm año ⁻¹)	1.0	25.9	8
	Altura (m)	11.1	29.3	20

Dap = diámetro_{1,30 m}. ima = incremento diamétrico medio anual

Cuadro 8. Número de individuos (N) por clases diamétricas (cm) y períodos de incremento (años) de los árboles del estudio intensivo de la especie *C. alliodora*. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

CATEGORIA DIAMETRICA			PERIODO DE INCREMENTO (años)		
Clase diamétrica (mm)	Abundancia total (N)	%	94 - 95 (mm año ⁻¹)	94 - 95 (mm año ⁻¹)	94 - 95 (mm año ⁻¹)
Dap bajo (100 - 199)	14	32	3.4	0.73	8.7
Dap medio (200 - 299)	14	32	2.2	0.48	4.6
Dap alto (> 300)	16	36	4.3	0.60	8.2

Cuadro 9. Número de individuos (N) por clases diamétricas (mm) y períodos de incremento (años) de los árboles de estudio intensivo de la especie *Vochysia ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

CATEGORIA DIAMETRICA			PERIODOS DE INCREMENTO (años)		
Clase diamétrica (mm)	Abundancia total (N)	%	94 - 95	94 - 95	94 - 95
Dap bajo (100 - 249)	25	41	5.5	3.4	11.6
Dap medio (250 - 399)	25	41	6.6	4.1	14.6
Dap alto (> 400)	11	18	9.9	7.2	21.5

Cuadro 10. Resultados del análisis de varianza para el modelo de estimación del incremento diamétrico de *C. alliodora* a partir de dos variables del árbol. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	VALOR F	PROB >F
Modelo	2	51.570	25.785	9.458	0.0003
Error	63	171.748	2.726		
Total	65	223.318			

VARIABLE	GL	VALOR DE T	PROB > T	FIV
Intercepto	1	-1.616	0.1112	0.000
Dap	1	-3.471	0.0009	1.637
Altura	1	4.214	0.0001	1.637

Cuadro 11. Análisis de varianza para el modelo de estimación del incremento diamétrico de *V. ferruginea* a partir de dos variables del árbol. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	VALOR F	PROB >F
Modelo	2	2238.173	1119.087	76.410	0.0001
Error	253	3705.404	14.646		
Total	255	5943.577			

VARIABLE	GL	VALOR DE T	PROB > T	FIV
Intercepto	1	3.180	0.0017	0.000
Dap	1	7.109	0.0001	1.351
forma de la copa	1	-5.075	0.0001	1.351

Cuadro 12. Resultados del análisis de varianza para el modelo de estimación del incremento diamétrico de *C. alliodora* a partir de tres variables del sitio por árbol individual. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	VALOR F	PROB >F
Modelo	3	54.401	18.134	6.656	0.0006
Error	62	168.917	2.724		
Total	65	392.235			

VARIABLE	GL	VALOR DE T	PROB > T	FIV
Intercepto	1	-0.416	0.6787	0.000
Posición	1	2.946	0.0045	1.254
P	1	-2.028	0.0469	1.284
Zn	1	3.119	0.0028	1.243

Cuadro 13. Resultados del modelo de estimación del incremento diamétrico por parcela de *C. alliodora* a partir de cinco variables del sitio. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	VALOR F	PROB >F
Modelo	5	21.421	4.284	8.931	0.0060
Error	7	3.358	0.480		
Falta de ajuste	5	2.741	0.548	1.776	ns
Error puro	2	0.617	0.309		
Total	12	24.779			

VARIABLE	GL	VALOR DE T	PROB > T	FIV
Intercepto	1	-2.284	0.0563	0.000
Potasio	1	-4.609	0.0025	2.013
Acidez (%)	1	-3.638	0.0083	2.063
CICE*	1	4.106	0.0045	3.589
Manganeso	1	3.893	0.0060	3.676
Zinc	1	3.690	0.0079	1.173

Cuadro 14. Resultados del análisis de varianza para el modelo de estimación del incremento diamétrico por parcela de *V. ferruginea* a partir de cuatro variables del sitio. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	VALOR F	PROB >F
Modelo	4	106.210	26.552	6.610	0.0016
Error	19	76.326	4.017		
Total	23	182.536			

VARIABLE	GL	VALOR DE T	PROB > T	FIV
Intercepto	1	5.166	0.0001	0.000
Pendiente	1	-4.838	0.0001	1.765
P	1	2.106	0.0487	1.707
K	1	3.834	0.0011	1.440
AC	1	-2.274	0.0348	2.022

Cuadro 15. Resultados del análisis de varianza para el modelo de estimación del incremento diamétrico de *C. alliodora* a partir de tres variables del árbol y una del sitio. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	VALOR F	PROB >F
Modelo	4	141.437	35.359	9.626	0.0001
Error	102	374.681	3.673		
Total	106	516.117			

VARIABLE	GL	VALOR DE T	PROB > T	FIV
Intercepto	1	1.692	0.0938	0.000
Dap	1	-4.503	0.0001	2.490
Altura	1	3.672	0.0004	2.592
Forma de copa	1	-3.299	0.0013	1.182
Zn	1	2.518	0.0134	1.024

Cuadro 16. Resultados del análisis de varianza para el modelo de estimación del incremento diamétrico de *V. ferruginea* a partir de dos variables del árbol y cuatro del sitio por parcela. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMATORIA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	VALOR F	PROB >F
Modelo	4	106.210	26.552	6.610	0.0016
Error	19	76.326	4.017		
Total	23	182.536			

VARIABLE	GL	VALOR DE T	PROB > T	FIV
Intercepto	1	-1.273	0.2041	0.000
Dap	1	6.870	0.0001	1.412
Forma de copa	1	-5.490	0.0001	1.520
Posición	1	3.716	0.0003	1.974
Forter	1	-2.959	0.0034	1.965
Ca	1	5.095	0.0001	1.167
Zn	1	4.552	0.0001	1.057

9.5. Anexo 5

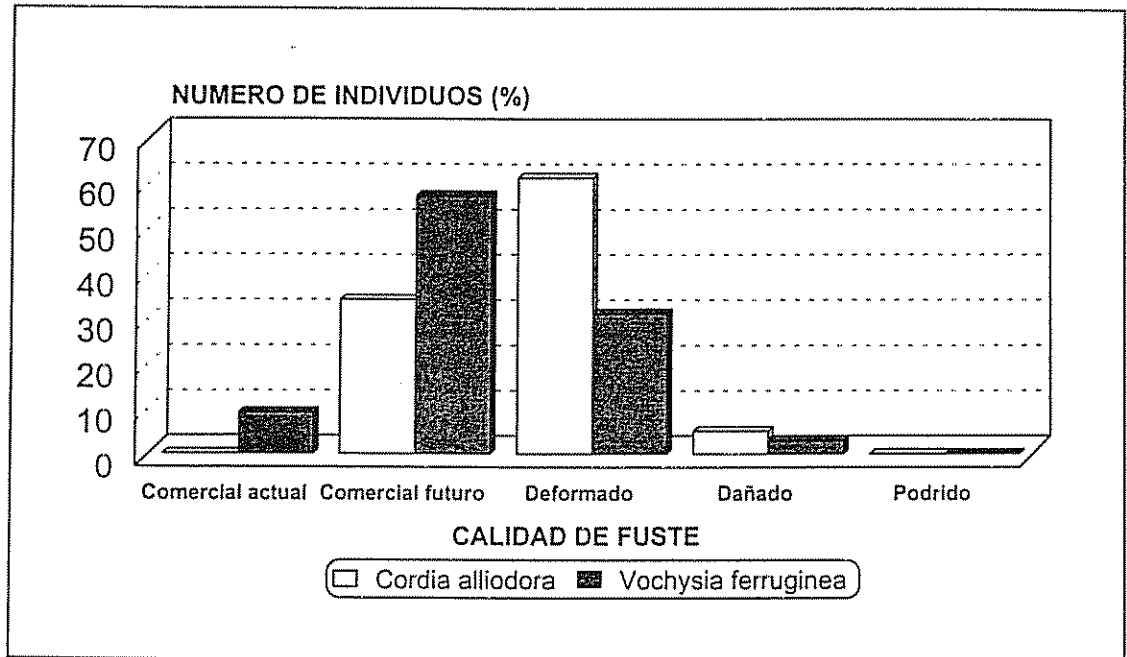


Figura 1. Calidad de fuste de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* presentes en las parcelas de medición temporal. Finca El Cerro, Florencia de San Carlos, Costa Rica.

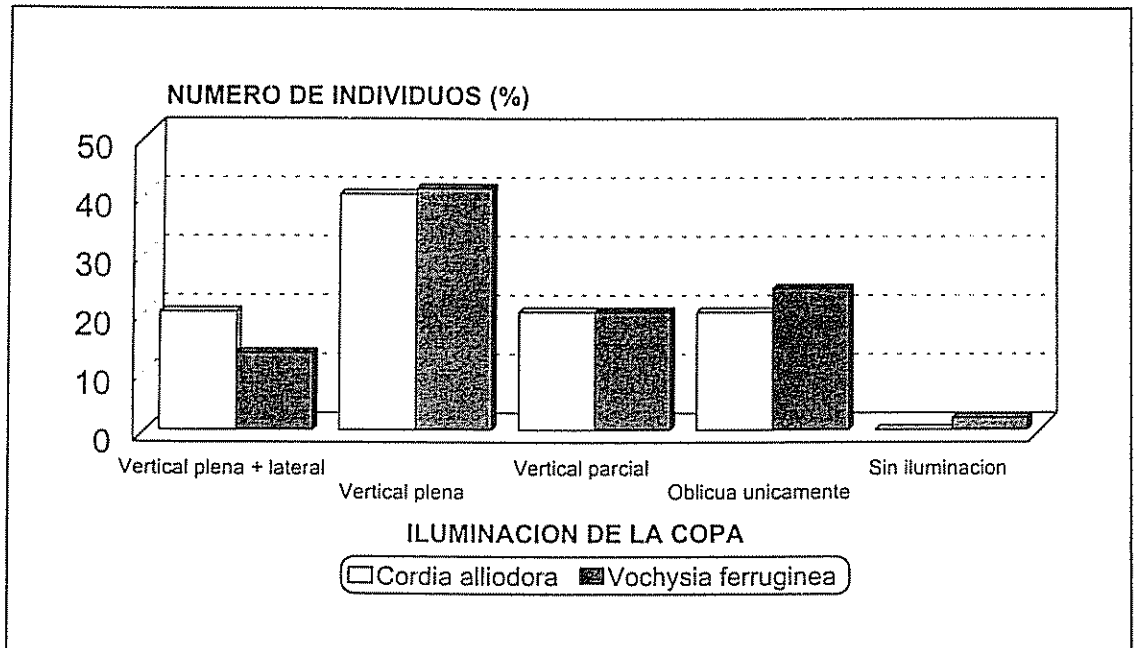


Figura 2. Iluminación de la copa de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* presentes en las parcelas de medición temporal. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

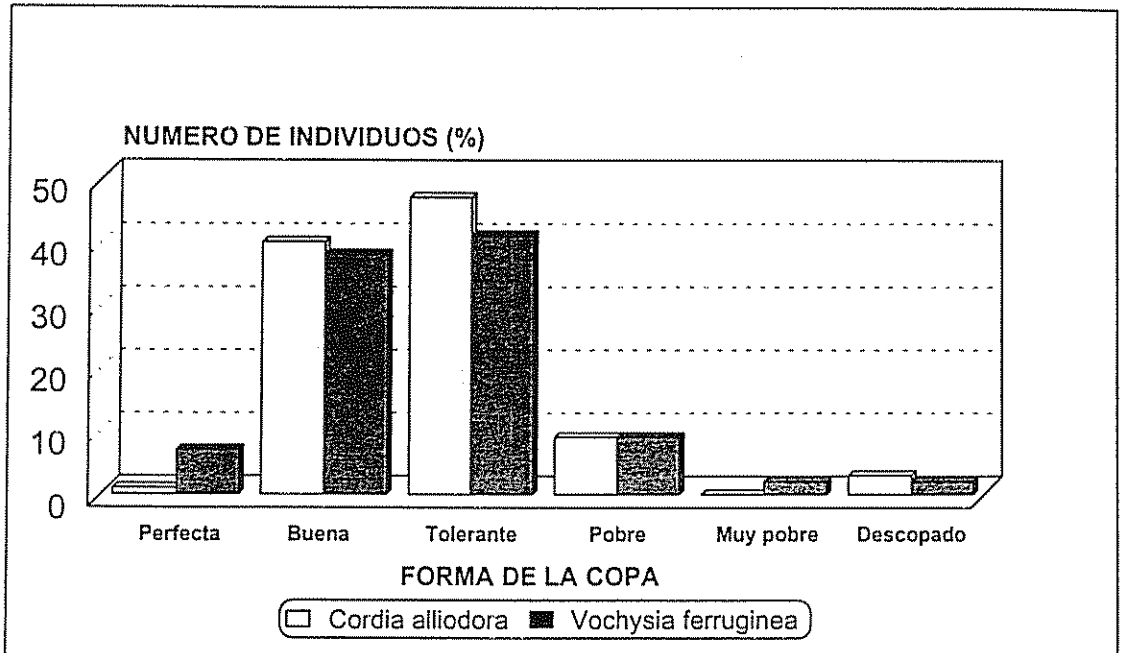


Figura 3. Forma de la copa de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea* presentes en las parcelas de medición temporal. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

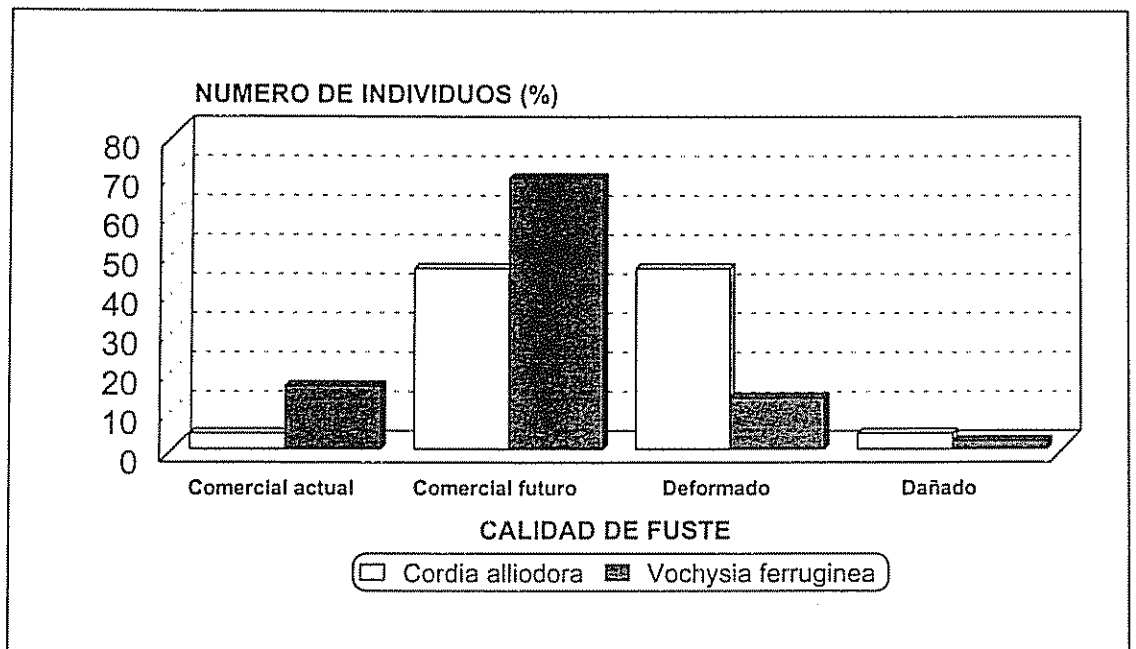


Figura 4. Calidad de fuste de los árboles del estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica.

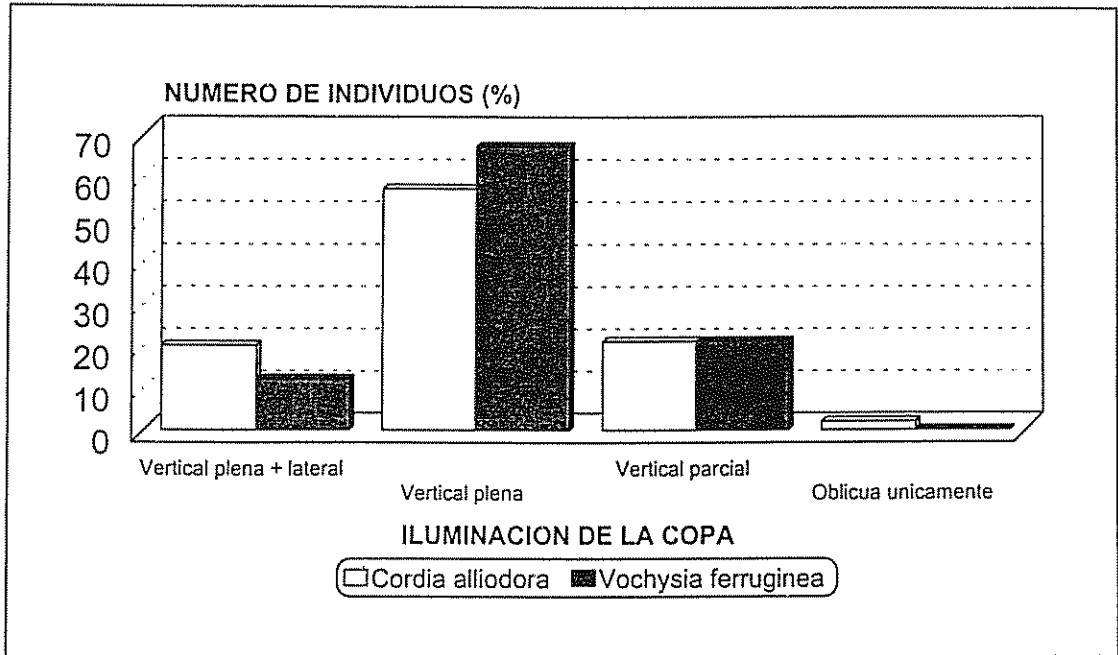


Figura 5. Iluminación de la copa de los árboles de estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica

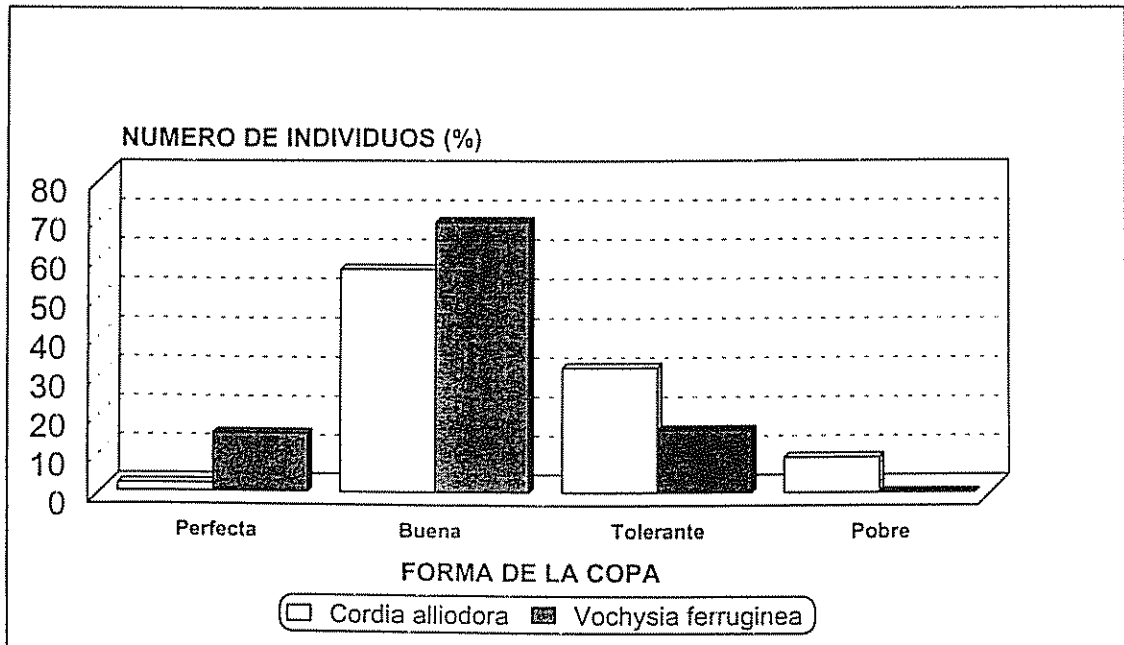


Figura 6. Forma de la copa de los árboles del estudio intensivo de las especies *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Finca El Cerro, Florencia, San Carlos, Costa Rica