

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
SUBDIRECCIÓN GENERAL ADJUNTA DE ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE POSGRADO

"EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE Coffea arabica cv. 'Caturra'  
BAJO DIFERENTES DENSIDADES DE Cordia alliodora Y Erythrina  
poeppigiana PLANTADOS EN UN DISEÑO SISTEMÁTICO DE  
ESPACIAMIENTOS"

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

Magister Scientiae.

Por

EDWIN GUILLERMO DETLEFSEN RIVERA

1988

## DEDICATORIA

A mi patria

Guatemala

A mis padres

Carl Henning  
y Thelma Edith

A mi esposa

Maribel, por  
todo su amor y  
comprensión

A mi hijo

Luis Guillermo

A mis hermanos

Annie, Henning,  
Astrid y  
apreciables  
familias

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. John Beer, Profesor Consejero, y a los integrantes del Comité Asesor, Dr. Pedro Ferreira, Dr. Gustavo Enriquez e Ing. Héctor Martínez, por su respeto, amistad, guía y colaboración brindadas durante mis estudios y realización del presente trabajo de tesis.

Al Lic. Eduardo Somarriba, por sus aportes al presente trabajo.

Al personal del Proyecto Agroforestal CATIE-GTZ en general, y en particular a Jorge Alvarez, por toda su colaboración prestada durante el trabajo de campo y laboratorio, a Lilliam Ugalde, por su gran ayuda en la presentación final de este trabajo, y al Dr. Arnim Bonnemann, por su amplio apoyo logístico.

Al Ing. Javier López, por su invaluable colaboración durante el procesamiento y análisis de datos.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, y al Programa de Estudios de Posgrado y Capacitación, por darme la oportunidad de realizar estos estudios.

A la Oficina Regional para Centroamérica y Panamá de la Agencia Internacional para el Desarrollo (AID/ROCAP), que a través del Proyecto MADELEÑA financió mis estudios y el presente trabajo de tesis.

Al Proyecto Agroforestal CATIE-GTZ por el apoyo material y financiero que hizo posible la realización de este trabajo de tesis.

Al Instituto Nacional Forestal de Guatemala (hoy Dirección General de Bosques y Vida Silvestre), por la oportunidad y apoyo financiero brindados para efectuar mis estudios de posgrado.

A todos los compañeros de la Promoción 86-88 y a todas aquellas personas que nos brindaron generosamente su amistad.

## BIOGRAFIA

El autor nació en 1959 en la ciudad de Guatemala. Realizó sus estudios primarios y secundarios en el Liceo Salesiano Guatemala de la Ciudad de Quetzaltenango, donde obtuvo el Diploma de Bachiller en Ciencias y Letras en 1976.

En 1978 ingresó a la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, donde obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo en marzo de 1984. Desde abril de 1984 hasta setiembre 1986 se desempeñó en diferentes cargos dentro del Instituto Nacional Forestal.

En setiembre de 1986 se incorporó al Programa de Estudios de Posgrado y Capacitación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza en Turrialba, Costa Rica, donde obtuvo el grado de Magister Scientiae en agosto de 1988.

Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la Coordinación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE, y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

COMITE ASESOR:

-----  


John Beer, M. Sc.

Profesor Consejero

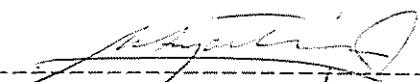
-----  


Pedro Ferreira, Ph.D.

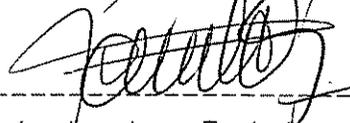
Miembro del Comité

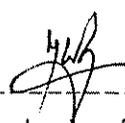
-----  
Gustavo Enríquez, Ph.D.

Miembro del Comité

-----  
  
Héctor Martínez, M. Sc.

Miembro del Comité

-----  
  
Ramón Lastra Rodríguez, Ph.D.  
Coordinador, Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, CATIE

-----  
  
Dr. José Luis Parisi  
Subdirector General Adjunto de Enseñanza

-----  
  
Edwin Guillermo Detlefsen Rivera  
Candidato

## INDICE DE CONTENIDO

Página

1.	INTRODUCCION.....	1
2.	REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1	Condiciones generales del cultivo del café a pleno sol y bajo sombra.....	4
2.2	Ventajas y desventajas de la sombra sobre los cafetos.....	6
2.2.1	Ventajas.....	6
2.2.2	Desventajas.....	7
2.3	Efectos fisiológicos de la sombra a pleno sol sobre el cultivo del café.....	8
2.3.1	Fotosíntesis.....	8
2.3.2	Transpiración.....	10
2.3.3	Producción.....	11
2.4	Características generales de los árboles de <i>C. alliodora</i> .....	13
2.4.1	Distribución natural y requeri- mientos ecológicos.....	13
2.4.2	Características silvícolas.....	14
2.4.3	Crecimiento y rendimiento.....	14
2.5	Características generales de los árboles de <i>E. poeppigiana</i> .....	16
2.5.1	Distribución natural y requeri- mientos ecológicos.....	16
2.5.2	Características silvícolas.....	16
2.5.3	Crecimiento y rendimiento.....	17
2.6	Diseños sistemáticos.....	18
2.6.1	Ventajas y desventajas de los diseños sistemáticos.....	19
2.7	Indices de competencia.....	20
2.7.1	Indices de competencia agrícolas....	21
2.7.2	Indices de competencia forestales...	27
2.8	Modelos de simulación de sombras de árboles.....	33

3.	MATERIALES Y METODOS.....	35
3.1	Características del área experimental.....	35
3.2	Historia del sitio del experimento.....	38
3.3	Descripción del experimento.....	39
3.3.1	Tratamientos.....	41
3.3.2	Diseño experimental.....	42
3.3.3	Manejo del experimento.....	42
3.4	Variables estudiadas.....	44
3.4.1	En el suelo.....	44
3.4.2	En el cultivo del café.....	46
3.4.3	En las especies forestales.....	47
3.5	Análisis de la información.....	49
4.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	55
4.1	Suelo.....	55
4.2	Crecimiento de <u>Cordia alliodora</u> .....	56
4.3	Producción de café.....	58
4.3.1	Rendimiento de café en grano a pleno sol y bajo sombra.....	58
4.3.2	Relación entre la producción de biomasa aérea de los cafetos y las densidades de los árboles de sombra.....	61
4.3.3	Relación entre el rendimiento de café en grano y las densidades de los árboles de sombra.....	63
4.4	Competencia entre el cultivo y las especies forestales.....	72
4.5	Efecto de la sombra sobre el rendimiento del café.....	74

**Página**

5.	CONCLUSIONES.....	77
6.	BIBLIOGRAFIA.....	80
7.	APENDICE.....	88
8.	ANEXOS.....	115

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el propósito de investigar: a) la variación del rendimiento de *Coffea arabica* cv. 'Caturra' (4790 plantas/ha) bajo sombra de diferentes rangos de densidades de *Erythrina poeppigiana* (131 - 266 árboles/ha) y *Cordia alliodora* (114 - 344 árboles/ha), utilizando los rendimientos totales por café de cuatro años, y donde los árboles de sombra se establecieron entre las hileras de los cafetos mediante un diseño sistemático de espaciamientos; b) algunos índices que representaron el efecto de competencia entre los cafetos y las especies forestales; y c) el comportamiento de *C. alliodora* combinado con café en su primera fase de crecimiento, en los rangos de densidades establecidos.

Otras evaluaciones realizadas fueron: el cambio de la producción de la biomasa aérea por café (peso de tallos + hojas) debida a la variación de las densidades de sombra; y el cambio del rendimiento de los cafetos en el último período de cosecha (1987), ocasionado por la proyección de sombra de los árboles (horas sombra/día).

Los rendimientos totales del café (g M.S./arbusto), fueron utilizados como la variable de respuesta de los cambios de densidades de sombra de ambas especies forestales, a través de análisis de regresión múltiple. El modelo de regresión de mejor ajuste ( $r^2 = 44\%$ ), fue un polinomio cuadrático que consideró las densidades de sombra estimadas a través de un método de polígonos regulares:

$$\ln \text{REND} = 11,62 - 0,03 (\text{DENER}) - 9,34 \times 10^{-3} (\text{DENCO}) \\ + 3,34 \times 10^{-5} (\text{DENER} \times \text{DENCO}) + 6,78 \times 10^{-5} \\ (\text{DENER})^2 + 8 \times 10^{-7} (\text{DENCO})^2$$

donde REND representa el rendimiento total por planta de café (g M.S.), DENER y Denco las densidades de *E. poeppigiana* y *C. alliodora*, respectivamente (árboles/ha).

Se encontró que tanto con las predicciones del modelo como con los datos reales del campo, los cafetos presentaron consistentemente altos rendimientos (0,6 - 0,9 kg M.S.café cereza/planta/año) cuando las densidades de *E. poeppigiana* fueron altas (240 - 266 árboles/ha). Los máximos rendimientos (1,0 - 1,2 kg M.S./planta/año) fueron observados cuando las densidades de *E. poeppigiana* fueron altas (alrededor de 266 árboles/ha) con densidades bajas de *C. alliodora* (114 - 150 árboles/ha) y para bajas densidades de ambas especies forestales (131 y 114 árboles/ha, en el mismo orden, respectivamente). Además, los rendimientos mínimos (0,4 - 0,2 kg M.S./planta/año) se presentaron a altas densidades de *C. alliodora* (300 - 344 árboles/ha) y densidades bajas de *E. poeppigiana* (131 - 150 árboles/ha). Una tendencia similar fue observada con la producción de biomasa aérea de los cafetos, aunque el ajuste de este modelo de regresión fue muy bajo ( $r^2 = 16\%$ ). No obstante, su nivel de significancia fue alto ( $P > 0,01$ ).

Con el fin de reducir la influencia de la asignación sistemática de los tratamientos y la falta de repeticiones del experimento sobre la estimación de parámetros y sobre el error experimental, se adicionaron covariables al modelo del rendimiento del café. La suma de las áreas basales de los tallos/cafeto medidas a un año de edad cuando los árboles de sombra aún no habían causado ningún efecto sobre el cultivo, fue la única covariable que resultó útil (el  $r^2$  del modelo se incrementó de 0,44 a 0,60).

Debido al incremento de los índices de competencia ocasionados por las densidades crecientes de *C. alliodora*,

se observaron reducciones de al menos un 50% en la producción del café. Por otro lado, el incremento de los índices de competencia de *E. poeppigiana* no mostró un efecto claro de competencia, ya que tanto en los niveles inferiores como superiores de estos índices, se observaron producciones altas.

Los modelos de regresión que relacionaron el efecto de la sombra simulada que proyectaron ambas especies forestales sobre el cultivo, indicaron que en términos generales dicho efecto fue negativo, a pesar del ajuste tan bajo de los modelos ( $r^2 = 5 - 9\%$ ,  $P > 0,01$ ). Sin embargo, una representación gráfica del modelo de mejor ajuste mostró que no toda la sombra fue perjudicial para el cultivo, pues a bajas cantidades de horas sombra por día, se proyectaron los rendimientos más altos.

El crecimiento en diámetro a la altura del pecho de *C. alliodora* fue significativamente superior ( $P > 0,05$ ) en un rango de 118 - 150 árboles/ha. Las diferencias en altura con las densidades más altas (196 - 332 árboles/ha) no fueron significativas. El crecimiento en diámetro de copa de esta especie presentó un comportamiento similar en todas las densidades evaluadas, hasta este estado de desarrollo de los árboles.

## SUMMARY

This study was carried out in order to investigate: a) the variation in the yields of Coffea arabica cv. 'Caturra' (4790 plants ha<sup>-1</sup>) under different shade densities of Erythrina poeppigiana (131 - 266 trees ha<sup>-1</sup>) and Cordia alliodora (114 - 344 trees ha<sup>-1</sup>), using individual coffee bush yields summed for 4 years (1984 - 1987), and where the trees were established between the coffee rows in a systematic spacing design; b) competition indices that represent the interaction between coffee bushes and shade trees; and c) the juvenile development of C. alliodora under the above mentioned range of densities, when combined with coffee.

Other evaluations that were made were: the variation of above-ground coffee biomass production (stems plus leaves) with changes in the shade tree densities and the association of coffee bush harvests in the final year (1987) with shade projection (shade hours day<sup>-1</sup>) from the shade trees.

Multiple regression analysis methods were applied using the coffee bush yields (oven dry weights; g bush<sup>-1</sup>) as the dependent variable and the shade tree densities as independent variables. A polynomial, based on shade tree densities calculated with a regular polygon, gave the best fit ( $r^2 = 44\%$ ):

$$\ln \text{REND} = 11.62 - 0.03 (\text{DENER}) - 9.34 \times 10^{-3} (\text{DENCO}) \\ + 3.34 \times 10^{-5} (\text{DENER} \times \text{DENCO}) + 6.78 \times 10^{-5} \\ (\text{DENER})^2 + 8 \times 10^{-7} (\text{DENCO})^2$$

where REND represents total yield (oven dry weights; g bush<sup>-1</sup>), DENER and DENCO the densities of E. poeppigiana and C. alliodora, respectively (trees ha<sup>-1</sup>).

In general, high coffee yields both in the field and as predicted by the model (0.6 - 0.9 oven dry weights ripe cherry beans  $\text{kg bush}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) were associated with high *E. poeppigiana* densities (240 - 266 trees  $\text{ha}^{-1}$ ). Maximum yields (1.0 - 1.2 kg) were found where high *E. poeppigiana* densities (around 266 trees  $\text{ha}^{-1}$ ) were associated with low *C. alliodora* densities (114 - 150 trees  $\text{ha}^{-1}$ ), and also where there were low densities of both species (131 and 114 trees  $\text{ha}^{-1}$ , in the same order, respectively). In addition, lowest yields (0.4 - 0.2  $\text{kg bush}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) were found where high *C. alliodora* densities (300 - 344 trees  $\text{ha}^{-1}$ ) were associated with low *E. poeppigiana* densities (131 - 150 trees  $\text{ha}^{-1}$ ). A similar tendency was observed for above ground biomass production, but although the model was highly significant ( $P > 0.01$ ) the fit was very poor ( $r^2 = 16\%$ ).

In order to reduce experimental error resulting from the systematic assignation of treatments and the absence of replications, covariables were introduced into the model. The sum of the basal areas of coffee stems in a bush, measured at 1 year age when the shade trees had not yet any effect, was the only covariable which proved useful ( $r^2$  for the model increased from 0.44 to 0.60).

The increased competition under the higher *C. alliodora* densities caused at least 50% reduction in coffee production. On the other hand, the increase in the *E. poeppigiana* competition index apparently did not indicate tree-coffee competition, since high coffee production was recorded for both high and low values of this index.

Regression models which related shade values over the crop predicted by a simulation model, were significantly associated with reductions in coffee yields, but the fit of the model was very poor ( $r^2 = 5 - 9\%$ ,  $P > 0.01$ ).

Diameter growth of *C. alliodora* was significantly higher in the density range of 118 - 150 trees  $ha^{-1}$  ( $P > 0.05$ ). Height differences at the highest densities (196 - 332 trees  $ha^{-1}$ ) were not obvious. Likewise crown diameters of this species were similar at all densities at this stage of growth.

## INDICE DE CUADROS

<u>En el texto</u>	<u>Página</u>
Cuadro 1      Resumen de los datos metereológicos del CATIE, para el área del experimento 169....	38
Cuadro 2      Resumen de labores agronómicas en la plantación de café del experimento 169 durante el periodo junio 1984-junio 1988 (actividades anuales).....	44
Cuadro 3      Variables utilizadas en los análisis de regresión del rendimiento de café en función de un índice de competencia.....	53
Cuadro 4      Rendimiento promedio de café bajo sombra de <i>E. poeppigiana</i> y <i>C. alliodora</i> , y a pleno sol (datos de pesos frescos de café por unidad de superficie y por planta).....	59
Cuadro 5      Parámetros estadísticos que describen la relación existente entre el logaritmo natural del rendimiento del café (g M.S./planta) y los niveles de fertilidad del suelo escogidos a diferentes profundidades por el análisis Stepwise.....	69
 <u>En el Apéndice</u>	
Cuadro 1 A    Metodologías utilizadas para el análisis químico y textura del suelo.....	89
Cuadro 2 A    Análisis de fertilidad del suelo del experimento efectuado al momento de su establecimiento (18-7-83).....	90
Cuadro 3A    Segundo análisis de fertilidad del suelo del experimento 169 y contenido de pedregosidad (15-1-88).....	92
Cuadro 4A    Crecimiento promedio de <i>C. alliodora</i> por densidades de evaluación durante el periodo del estudio.....	96
Cuadro 5A    Modelos de regresión que describen la relación existente entre la biomasa podada de los cafetos con los diámetros o áreas basales de los tallos podados por planta de café.....	97

Cuadro 6A	Modelos de regresión que describen el rendimiento de café en grano (g M.S./planta) en función de las diferentes densidades de <u>E. poeppigiana</u> y <u>C. alliadora</u> (árboles/ha).....	98
Cuadro 7A	Correlaciones entre el logaritmo natural del rendimiento del café, densidades de <u>E. poeppigiana</u> y <u>C. alliadora</u> , diámetro de copa y diámetros basales de los cafetos (medidos en 1985), cosecha precoz 84-85 y pedregosidad del sitio.....	99
Cuadro 8A	Correlaciones entre el rendimiento del café, las densidades de sombra de <u>E. poeppigiana</u> y <u>C. alliadora</u> y todas las variables del suelo tomadas a 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm de profundidad.....	100
Cuadro 9A	Modelos de regresión que describen el rendimiento de café en grano (g M.S./planta) en función de las densidades de <u>E. poeppigiana</u> y <u>C. alliadora</u> (árboles/ha), y todas las covariables seleccionadas.	101
Cuadro 10A	Modelos de regresión de mejor ajuste entre el rendimiento del café (g M.S./planta), los diferentes índices de competencia y la covariable área basal.....	102
Cuadro 11A	Modelos de regresión que describen la relación existente entre el rendimiento de los cafetos y las cantidades de horas sombra recibidas por los mismos en el período de cosecha de 1987 (julio-diciembre).....	103

## INDICE DE FIGURAS

<u>En el Texto</u>	<u>Página</u>
Figura 1 Localización del diseño en estudio dentro de los campos experimentales del CATIE.....	36
Figura 2 Climadiagrama del CATIE.....	37
Figura 3 Plano del diseño sistemático de densidades de sombra sobre café incluyendo la parcela efectiva.....	40
Figura 4 Representación de la poda efectuada sobre los árboles de <i>E. poeppigiana</i> .....	50
Figura 5 Crecimiento en altura (H) y diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles de <i>Cordia alliodora</i> .....	57
Figura 6 Superficie de respuesta de la producción de café en función de las densidades de sombra de <i>C. alliodora</i> y <i>E. poeppigiana</i> ....	66

### En el Apéndice

Figura 1A Croquis del área correspondiente a cada muestra de suelo tomada durante el establecimiento del ensayo.....	104
Figura 2A Ubicación de las calicatas y los sitios donde se tomaron las submuestras de suelo por subparcela del área de café bajo sombra.....	105
Figura 3A Esquema representativo de la determinación del área disponible por árbol por el método de polígonos regulares.....	106
Figura 4A Densidades promedio por cada fila de árboles de <i>C. alliodora</i> (árboles/ha) y por filas de densidades similares.....	107
Figura 5A Predicción de la biomasa total del café (tallos + hojas) en función de las densidades de sombra.....	108
Figura 6A Predicción del rendimiento del café en función de las densidades de poró y laurel.	109

Figura 7A	Gráfico de los residuos del error del modelo de regresión del rendimiento de café contra las densidades de <u>E. poeppigiana</u> .....	110
Figura 8A	Gráfico de los residuos del error del modelo de regresión del rendimiento de café contra las densidades de <u>C. alliodora</u> .....	111
Figura 9A	Gráfico de los residuos del error del modelo de regresión del rendimiento de café contra las áreas basales de los cafetos.....	112
Figura 10A	Predicciones del rendimiento del café en función del índice de competencia II....	113
Figura 11A	Relación logarítmica entre el rendimiento de los cafetos y las cantidades de horas sombra recibidas por los mismos...	114
ANEXO 1	Programa en SAS para el cálculo de las densidades circulares de laurel ( <u>C. alliodora</u> ) y poró ( <u>E. poeppigiana</u> ) para cada cafeto, utilizando radios de 5, 7, 10 y 15 m.....	116
ANEXO 2	Programa en SAS para el cálculo de los índices de competencia entre <u>C. arabica</u> , <u>E. poeppigiana</u> y <u>C. alliodora</u> utilizando radios de 5, 7 y 9 m.....	119

## 1. INTRODUCCION

En sus orígenes el café se cultivaba bajo bosques raleados. En una etapa posterior, algunos cafetaleros empezaron a regular la luminosidad a través de la poda de los árboles de sombra (Beer, 1985). Actualmente, el café se produce tanto a pleno sol como bajo sombra.

En las pequeñas fincas de la Vertiente Atlántica de Costa Rica (hasta 800 m.s.n.m.), los cafetos se establecen tradicionalmente bajo sombra de poró (Erythrina poeppigiana) y laurel (Cordia alliodora). La descripción inicial de la asociación agroforestal café - poró - laurel (Ugalde, 1979), presentó a este sistema como una opción económicamente aceptable para los pequeños productores de la región Atlántica de Costa Rica, por la posibilidad de obtener ingresos adicionales por la venta de madera de laurel y por la manutención de un sistema de producción sostenido mediante el manejo de la especie leguminosa (poró). Al cuantificar la producción de café con y sin asocio de laurel y poró, se concluyó que el valor de la producción de café más el de la madera de laurel, era superior al de café sin asocio (González, 1980; Glover, 1981).

La selección de una especie de sombra en particular determina la dinámica de algunos procesos ecológicos importantes (ej. ciclaje de nutrientes) y las expectativas económicas de los agricultores. Por ejemplo, comparaciones entre la producción y funcionamiento del sistema café - poró vs. café - laurel, demostraron que la producción de café en la asociación con poró fue mayor que en la asociación con laurel (Heuvelodop et al, 1985), y que la asociación café - poró presentó una dinámica más activa en la absorción, recirculación y aporte de N, P, K, Ca y Mg (Fassbender, et al, 1985). Sin embargo, la asociación café - laurel mantuvo

una ventaja económica para los agricultores debido a la producción de madera.

A la fecha existen muchos estudios más sobre diferentes aspectos de la asociación café - poró - laurel. No obstante, la variación en las densidades de los árboles de sombra, que es una de las prácticas de manejo relativamente fáciles de transferir al agricultor, aún no ha sido estudiada.

En el presente trabajo se midieron los cambios en la producción de los cafetos bajo un rango amplio de densidades de estos árboles de sombra, y se iniciaron estudios de competencia entre el componente arbóreo y los cafetos. El modelo de simulación de sombras de Quesada *et al* (1987) se adaptó al presente trabajo como otra opción para medir las variaciones de rendimiento de los cafetos debida a cambios en el sombreamiento producido bajo diferentes densidades de árboles.

Los objetivos del trabajo fueron:

- a) Estudiar las variaciones de rendimiento de *C. arabica* cv. 'Caturra' bajo sombra de diferentes densidades de *C. alliodora* (114 - 344 árboles/ha) y *E. poeppigiana* (131 - 266 árboles /ha) durante los primeros cuatro años de establecido el ensayo. †
- b) Evaluar índices que midan el efecto de competencia entre los cafetos y las especies forestales.
- c) Caracterizar el comportamiento de *C. alliodora* combinado con café en la primera fase de crecimiento, en los rangos de densidades establecidos.

## 2. REVISION DE LITERATURA.

Por la gran discrepancia existente en la literatura entre un grupo de autores y otro, respecto a la utilización de la sombra arbórea sobre el cultivo del café, los puntos considerados como parte de la revisión bibliográfica del presente trabajo básicamente pretenden: a) dar un esbozo general sobre las condiciones en que se practica el cultivo del café bajo sombra y a pleno sol; b) discutir las ventajas y desventajas del uso de la sombra sobre los cafetos, así como fundamentar los principales efectos fisiológicos de la sombra sobre el cultivo y sus consecuencias sobre el rendimiento; c) describir las características generales y de crecimiento de las especies forestales utilizadas como sombra en el presente trabajo; d) discutir las ventajas y desventajas de la utilización de diseños sistemáticos en comparación con los diseños convencionales, por el hecho de haber elegido un diseño sistemático para la conducción del presente estudio; e) describir algunas funciones e índices de competencia importantes utilizadas por agrónomos y forestales, para poder adaptarlos al estudio de competencia del presente trabajo; y, f) justificar la elección del modelo de simulación de sombras que mejor se adapta a las condiciones de este estudio, para medir el efecto de la sombra de los árboles sobre el rendimiento del cultivo.

### 2.1 Condiciones generales del cultivo del café a pleno sol y bajo sombra.

El Coffea arabica es originario de Etiopía, donde se encuentra en estado silvestre en las montañas Abisinicas entre los 7° y 9° latitud Norte a elevaciones que fluctúan entre 900 y 1200 m, con precipitaciones entre 1000 y 2000 mm anuales y cuatro meses de estación seca bien marcada. Las

temperaturas extremas en el área no pasan de 30°C ni bajan de 5°C (Nosti, 1953). En promedio oscilan entre 18° y 21°C (Hunter, 1959).

En forma natural el café se encuentra debajo de los árboles más altos de la selva donde la iluminación no es muy intensa (Duque, 1966; Fernández, 1963b). Sin embargo, en los claros naturales o artificiales estimula sus funciones vegetativas, ramificando abundantemente y dando mayor rendimiento, aunque su periodo de vida se acorta en estas condiciones, especialmente si el suelo pierde su contenido de materia orgánica (Duque, 1952).

En plantaciones, el café se establece desde el nivel del mar hasta alrededor de 2100 m (Guiscafré, 1959a). Aunque Campos (1982) señala que el cafeto no prospera por encima de 1650 msnm o por debajo de 150 msnm. La temperatura media oscila entre 18° y 25°C, y la precipitación entre 1500 y 2000 mm anuales, con una estación seca bien definida (tres meses). En condiciones extremas, suele producirse en regiones de Africa o la India en las que la lluvia llega a 5000 mm anuales, o en climas extremadamente secos, bajo condiciones de riego (Fernández, 1963a).

Con raras excepciones, las zonas que quedan fuera de la formación Bosque húmedo de la franja subtropical, se consideran marginales para el buen desarrollo de esta planta (Hunter, 1959).

La humedad relativa apropiada para el café es de 75 a 85% (Guiscafré, 1959a). Si se exceden estos valores, en combinación con altas temperaturas y exceso de sombra, se favorece el desarrollo de plagas y enfermedades fungosas (Guiscafré, 1959a; Campos, 1982).

El cafeto requiere suelos aluviales, arcillosos, silicosos o de origen volcánico, profundos, friables y con espacios porosos entre 60% - 30% cuando el suelo está húmedo (Campos, 1982). Una gran cantidad de plantaciones se encuentran también sobre suelos de origen volcánico, tal es el caso de muchas zonas de Colombia y Centro América (Fernández, 1963a). Los suelos ideales para café deben tener una profundidad superior a 0,75 m (Campos, 1982), un buen contenido de materia orgánica y buenas condiciones físicas, pues las condiciones químicas pueden corregirse fácilmente por medio de la aplicación de fertilizantes (Fernández, 1963a; Campos, 1982). La reacción del suelo debe ser ligeramente ácida, de 6,0 a 6,5 (Fernández, 1963a; Campos, 1982).

Se considera que el café requiere de 200 a 280 horas de brillo solar por mes durante la estación seca y de 100 a 150 horas luz por mes durante la estación lluviosa, es decir de 1500 a 2500 horas anuales (Fernández, 1963a; Campos, 1982).

El cultivo con fines comerciales ha sido colocado en diversas condiciones de sol o sombra (Guiscafré, 1959a). En Brasil, por ejemplo, se ha cultivado a plena exposición solar, debido principalmente a la competencia por el agua entre los cafetos y los árboles de sombra en estas zonas con escasez de lluvias (Duque, 1966). Tampoco se usa sombra en las zonas altas de Jamaica, así como en Hawaii, con prevalencia de lluvias casi todo el año y sol brillante alternado con horas de tiempo nublado (Duque, 1966). En Cuba, y en casi todo el resto de países americanos, el café suave se obtiene de cultivos bajo sombra (Duque, 1966).

## 2.2 Ventajas y desventajas de la sombra sobre los cafetos

La discusión de las ventajas o desventajas de la utilización de sombra sobre café es algo muy relativo que depende de las condiciones locales de cada plantación (Carranza, 1933; Nosti, 1953; Haarer, 1956; Guiscafré, 1956b; Ostendorf, 1962; Menas et al, 1978; Beer, 1987):

Segun Beer (1987), las ventajas y desventajas de la utilización de la sombra arbórea sobre café y otros cultivos perennes son:

### 2.2.1 Ventajas

A. Facilitar el manejo del cultivo: se previene la sobreproducción y consecuente muerte regresiva (die back) por medio de producciones menos variables que al cabo de un largo periodo permiten una utilización eficiente de las labores durante la cosecha y el procesamiento; se suprime el desarrollo de malezas; se diversifica la producción; se puede controlar la fenología del cultivo; además, se puede mejorar la calidad del grano.

B. Influencias benéficas en el ciclo hidrológico: disminución de la tasa de evapotranspiración del estrato inferior; remoción de los excesos de humedad del suelo vía transpiración de los árboles de sombra; incremento en la entrada de humedad a través de la intercepción horizontal de neblina o nubes.

C. Protección al cultivo: extensión de la vida productiva del cultivo; reducción de los valores extremos en la temperatura del aire, suelo y superficie solar, promoviendo en algunos casos condiciones microclimáticas más adecuadas para el cultivo, como por ejemplo, mayor humedad; disminución del daño ocasionado a los

cafetos por el granizo y lluvias torrenciales; disminución de algunas enfermedades, plagas e infestaciones de plantas parásitas; disminución de la velocidad del viento.

D. Mejoramiento de la fertilidad y/o protección del suelo: el crecimiento y muerte de los sistemas radicales de los árboles favorece el drenaje y la aireación del suelo; el suministro de hojarasca al suelo como producto de la caída de hojas y residuos de las podas contribuye a retener la humedad del suelo en la época seca e incrementa la cantidad de materia orgánica del suelo; se disminuye la erosión en las pendientes; se disminuye la tasa de descomposición de la materia orgánica se recirculan nutrimentos que no eran accesibles al cultivo, y en el caso de la existencia de árboles leguminosos se puede fijar nitrógeno; el incremento de materia orgánica en el suelo bajo sombra aumenta la actividad biológica sobre los organismos del suelo.

### 2.2.2 Desventajas:

A. Consecuencias que pueden dificultar el manejo del cultivo: la caída natural de ramas y árboles, o la cosecha de árboles maduros dañará el cultivo del estrato inferior; defoliaciones repentinas de los árboles de sombra a causa de insectos o enfermedades pueden producir un cambio brusco en las condiciones ambientales normales del cultivo bajo sombra; se requiere una labor manual adicional para el manejo de los árboles de sombra que regularmente se podan; la mecanización del cultivo en el estrato inferior se dificulta; el establecimiento de estructuras de control de erosión como construcción de terrazas se dificulta; el mejoramiento de las nuevas variedades de cultivos está orientado para que se adapten a condiciones de monocultivo y no para adaptarse bajo sombra.

B. Influencias perjudiciales en el ciclo hidrológico: competencia por agua por las raíces de los

árboles de sombra en la estación seca y por oxígeno durante la estación lluviosa.

C. Promoción de influencias adversas al cultivo: la disminución en el movimiento del aire y el aumento en humedad pueden favorecer las enfermedades fungosas; pueden ocurrir efectos alelopáticos; los árboles de sombra pueden ser hospederos de plagas y enfermedades; los árboles de sombra reducen la cantidad y calidad de la luz, y por tanto, el rendimiento del cultivo en suelos fértiles.

D. Disminución en la disponibilidad de nutrimentos para el cultivo asociado: las raíces de los árboles de sombra compiten por nutrimentos; el agua que corre por los troncos y el goteo producido por la coalescencia de las gotas en las hojas de los árboles de sombra, puede ocasionar una distribución desfavorable de la lluvia, que incrementa la erosión, daña al cultivo y disminuye el almacenamiento de agua en el suelo; la exportación de frutos y/o madera constituye una salida de los nutrimentos del lugar.

## **2.3 Efectos fisiológicos de la sombra o pleno sol sobre el cultivo del café.**

### **2.3.1 Fotosíntesis**

El café desarrollado a la sombra del bosque forma hojas grandes y tallos largos y tiernos, con la finalidad de aumentar el contenido de clorofila y captar mayor cantidad de luz. A campo abierto, disminuye el volumen y la superficie de sus hojas para limitar la superficie de evaporación (Menas *et al.*, 1978).

A pesar que el café es una planta  $C_3$ , generalmente se ha aceptado que su intensidad fotosintética es baja en comparación con otras especies de esta misma clasificación (Alvim, 1959). Esto puede ser un factor limitante de la capacidad de producción de la planta a la vez que la hace más susceptible a trastornos fisiológicos, tales como la muerte descendente (Sylvain, 1958).

Por los efectos fisiológicos que producen las altas temperaturas e intensidades luminicas, se ha verificado en la práctica que el café responde mejor a la sombra (Huxley, 1967; Sam y Morales, 1983). Otros autores contradicen lo anterior (Castillo, 1961; Huerta, 1954; Soto, 1986), debido, posiblemente, a la intensidad de sombra y los métodos de análisis utilizados (Huxley, 1967).

El cierre parcial de los estomas bajo la luz solar directa se ha interpretado como una indicación de que el café es una especie que prefiere la sombra (Alvim, 1959). Nutman (1937b), sugirió que en hojas individuales los estomas se abrían a bajas intensidades luminicas (bien fuera bajo sombra o en días nublados), y se cerraban con altas intensidades de luz. Otros autores (Maestri y Viera, 1958) han mostrado que el valor promedio de la apertura de los estomas para un arbusto en conjunto fué mayor en plantas sin sombra que en plantas sombreadas.

Inicialmente Nutman (1937a), encontró que la tasa fotosintética máxima del café era de  $4,5 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$  cuando el tiempo estaba nublado, o cuando se le proveía de sombra, observando una caída en dicha tasa al medio día. Otros trabajos recientes sugieren que las tasas fotosintéticas del café pueden alcanzar valores entre  $6,0 - 8,5 \text{ mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$  (Tío, 1962; Cannell, 1976; Kumar y Tieszen, 1976).

Respecto al efecto de la interacción de la intensidad luminica y la temperatura, Kumar y Tieszen (1976)

encontraron que no hubo reducción en la tasa fotosintética con valores altos de irradiación si la temperatura de las hojas se mantenía baja. Por otra parte, Nunez *et al* (1968), encontraron que temperaturas mayores de 24°C pueden reducir en un 7% la producción de materia seca por cada grado centigrado que se exceda de este nivel. Este hecho fue atribuido al incremento de la concentración interna de CO<sub>2</sub> (20 ppm/°C), lo cual es crítico en las hojas expuestas a pleno sol donde la temperatura puede alcanzar hasta 40°C. Cannell (1976) agrega que arriba de 20°C se presenta un incremento progresivo en la fotorespiración y en la concentración de CO<sub>2</sub>, resultando en un cierre estomatal. Así, la disminución de la fotosíntesis aparente a altas temperaturas se puede explicar por el aumento de la resistencia estomática (Nunez *et al*, 1968), y por la resistencia mesofílica (Kumar y Tieszen, 1980).

### 2.3.2 Transpiración

Nutman (1941), encontró que la transpiración aumentaba en proporción directa con la intensidad luminica cuando esta última era relativamente baja, y que a intensidades luminicas relativamente altas se presentaba una reducción de la transpiración, infiriendo que se debía a un cierre parcial de los estomas.

Franco e Inforzato citados por Fernández (1963b), determinaron en Campinas (Brasil) que la transpiración de café al sol excedía a las caídas de agua durante tres meses. Mientras que la transpiración del café sombreado más la transpiración de los árboles de sombra sobrepasaba la caída de agua durante seis meses. Sin embargo Franco (1951), señaló que los suelos de Centro América pueden mantener la humedad disponible para las plantas por periodos

más largos de tiempo que los suelos de Sao Paulo, por lo que la velocidad de la transpiración de los cafetos en esta región, puede ser más lenta, aun cuando estén sombreados.

Alvim (1959), en un estudio sobre tasas de transpiración medidas por pesadas rápidas de hojas de café separadas de la planta, encontró que la temperatura de las hojas aumentó hasta 20° C en dos minutos después de haber sido transferidas de la sombra a la luz solar intensa, alcanzando valores de 45° C cuando la temperatura del aire fue de 25° C. De esta forma dedujo que ese aumento en la temperatura podría ser causa de una intensificación en la transpiración, y que a su vez podría originar en pocos minutos un déficit de humedad suficientemente grande, como para reducir la apertura de los estomas. Kumar y Tieszen (1976) encontraron que el incremento de temperatura más el de la intensidad luminica incrementaron considerablemente la transpiración.

### 2.3.3 Producción

En la literatura existe una serie amplia de trabajos que en general concuerdan en que el rendimiento del cafeto y con ello la producción de biomasa, disminuye considerablemente cuando se establece con exceso de penumbra (Carranza, 1933; Nosti, 1953; Duque, 1966; Fernández, 1963b; Cannell, 1976; Alpizar *et al.*, 1985). La sombra reduce el número de flores producidas por cafeto, de tal forma que se obtienen producciones que no lo dejan exhausto (Haarer, 1956). Castillo (1961), Cannell y Huxley (1969), y Wormer y Gituanja (1970), afirman que la sombra atrasa la iniciación floral. Por otra parte, las altas intensidades luminicas elevan la relación C/N de la planta (Kumar, 1978), lo cual favorece la iniciación floral (Guzmán, 1987).

Glover (1981), realizó un estudio en una plantación de Coffea arabica variedad Caturra con sombra de Erythrina poeppigiana, con y sin sombra de Cordia alliodora, en una finca del Cantón de Turrialba, Costa Rica, con el objeto de cuantificar el efecto de C. alliodora en el rendimiento del café. Después de dos años de estudio Glover (1981) observó que el rendimiento total de la producción de la parcela A (sin C. alliodora) fue muy similar al de la parcela B (con C. alliodora), por lo que concluyó que no hubo efecto de C. alliodora durante el periodo de tiempo evaluado. Sin embargo, señaló que dos años no fueron suficientes para medir dicho efecto. Otra observación importante del estudio de Glover (1981), fue que en los dos años de registros el pico de las cosechas de café bajo sombra de C. alliodora se registró dos semanas y media después que en el caso del café sin C. alliodora.

Heuveloop et al (1985), al comparar las producciones de café bajo sombra de laurel (C. alliodora) con las producciones de café bajo sombra de poró (E. poeppigiana) en Turrialba, encontraron que durante los primeros cinco años de cosecha la combinación de café con la leguminosa presentó casi siempre las mayores producciones anuales.

Respecto a la producción de biomasa aérea seca total de café (tallos + ramas + hojas), Alpizar et al (1985), también encontraron en Turrialba, que los cafetos de 4,5 años de edad establecidos bajo sombra de E. poeppigiana produjeron más del doble de biomasa aérea seca total, que los cafetos de la misma edad establecidos bajo sombra de C. alliodora.

## 2.4 Características generales de los árboles de C. alliodora

### 2.4.1 Distribución natural y requerimientos ecológicos

Cordia alliodora (Ruiz y Pavón) Oken, es una especie maderable de la familia Boraginaceae, de crecimiento rápido con capacidad de rebrote de cepa y frecuente en los bosques secundarios (Johnson y Morales, 1972; Escobar, 1979; Webb, 1980). Se distribuye en forma natural en América desde los 25° latitud Norte hasta los 25° latitud Sur. Es relativamente común en el sur de México, Centro América, Noroeste de Sur América y también en la mayoría de las islas de las Antillas desde Cuba hasta Trinidad (Johnson y Morales, 1972; Webb, 1980).

Según Pérez (1954), las mejores condiciones de desarrollo en Costa Rica se presentan en la formación bosque húmedo Tropical y bosque muy húmedo Tropical (2000 a 4000 mm de precipitación anual y 24° C de temperatura media anual). En cambio en las zonas tropicales secas el crecimiento es menor (Johnson y Morales, 1972).

Webb (1980), caracteriza los sitios de desarrollo de C. alliodora desde 0 a 2000 msnm, con precipitaciones anuales entre 1000 y 4000 mm, una estación seca de 0 a 4 meses y una temperatura promedio anual de 23° a 27° C.

C. alliodora se desarrolla bien sobre suelos de textura arenosa o franco arenosa, pH alcalino, neutro, ácido a fuertemente ácido, arcillas profundas con buen drenaje y suelos pedregosos con baja fertilidad (Johnson y Morales, 1972; Escobar, 1979; Webb, 1980).

#### 2.4.2 Características silvícolas

C. alliodora es una especie pionera, caducifolia y heliófita, encontrada raramente en bosques maduros (Johnson y Morales, 1972). La regeneración natural parece ser debida a la ocurrencia de claros en el bosque (naturales o por la intervención del hombre) y es abundante si encuentra luz y espacio para crecer (Johnson y Morales, 1972; Escobar, 1979).

En estado adulto es un árbol que necesita espaciamientos amplios. La madera se utiliza para construcciones livianas, enchapado y contrachapado, y otro uso importante de este árbol es como sombra de cultivos (Webb, 1980).

En los sistemas agroforestales tradicionales de Costa Rica, los árboles de C. alliodora provienen de regeneración natural encontrándose a diferentes densidades (Glover, 1981). Los finqueros regulan las densidades de acuerdo con el manejo del cultivo, pero no ejercen ningún control silvicultural para mejorar la forma o el vigor de los árboles (Somarriba y Beer, 1986). Beer (1987), señala que los agricultores toleran los árboles de C. alliodora dentro de los cultivos porque producen madera valiosa para construcción, tienen rápido crecimiento, copa pequeña y poco densa, regeneración natural abundante, se autopodan y además los árboles comerciales representan una reserva de capital que puede ser utilizada cuando fallan los cultivos o en otras eventualidades. ✕

#### 2.4.3 Crecimiento y rendimiento

Webb (1980), señala que en general la especie C. alliodora alcanza alturas de 25 a 30 m con producciones de 10 a 20 m<sup>3</sup>/ha/año. En forma similar Bronstein (1984) citando a otros autores, menciona que los crecimientos en volumen

indicados para esta especie son del orden de  $15 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ . También menciona que a los 10 años estos árboles alcanzan un dap de 25 cm, a los 20 años entre 45 y 50 cm, y a los 30 años más de 60 cm con una altura de 35 m.

Pérez (1954), concluyó que el incremento promedio en dap para los árboles de C. alliodora asciende progresivamente hasta los primeros 6 a 10 años de edad, y que después se nota un descenso paulatino de más o menos 3 mm/año en este incremento.

Romijn y Wilderink (1981), encontraron que a los tres años y medio del establecimiento de C. alliodora en asocio con café en el "Experimento Central de La Montaña" CATIE, los árboles alcanzaron una altura promedio de 9,1 m y un dap promedio de 20 cm. Esto implica un incremento medio anual en altura de 2,6 m y 5,9 cm en dap.

Por otra parte Somarriba y Beer (1986) analizando los datos de C. alliodora en 12 parcelas agroforestales en la región Atlántica de Costa Rica (debajo de 650 msnm, 2600 a 4000 mm de precipitación anual sin estación seca bien definida), encontraron que los agricultores manejan densidades de C. alliodora dentro de un rango de 69 a 290 árboles/ha. En el asocio con café encontraron un incremento periódico anual en dap de 0,8 a 1,8 cm/año. Las tasas de crecimiento en diámetro se incrementaron en el orden pasturas, caña de azúcar, café y cacao. En promedio, la tasa de crecimiento predecible en dap resultó de 3 cm/año y en altura de 2 m/año hasta la edad de cinco años. El turno de corta recomendado en base al estudio de estos autores es de 34 años de rotación, con el cual se podría obtener un volumen total de 298 a 690  $\text{m}^3/\text{ha}$  utilizando un factor de forma de 0,425.

## 2.5 Características generales de los árboles de E. poeppigiana

### 2.5.1 Distribución natural y requerimientos ecológicos

Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook, de la familia Leguminosae, es originaria del piedemonte peruano y se distribuye naturalmente de Panamá a Bolivia. Crece en zonas tropicales con precipitaciones medianas a altas desde el nivel del mar hasta 1400 m (Russo, 1983)

### 2.5.2 Características silvícolas

E. poeppigiana es un árbol de muy rápido crecimiento que presenta un fuste relativamente limpio aunque raras veces muy recto. Cuando no está podado permanece sin hojas durante el periodo más seco del año (enero-febrero) y especialmente cuando la estación seca es relativamente larga. Las ramas jóvenes y el tronco presentan espinas. En condiciones de podas periódicas no se manifiesta el proceso de floración y presenta abundante follaje en los meses secos (Russo, 1983).

En sistemas agroforestales como planta de sombra o en cercos vivos, se propaga vegetativamente por estacaones largos (de aproximadamente 2 m de altura) que enraizan fácilmente (Russo, 1984).

En la actualidad esta especie está muy difundida en el área de Turrialba, asociada con cafetos (Russo, 1984). Según Glover (1981), E. poeppigiana en asociación con café se planta en densidades que oscilan entre 150 y 300 árboles/ha con un régimen de podas de dos a cuatro veces al año a una altura de 3 a 7 m. Russo (1984), indica que usualmente se le hacen dos podas anuales. La primera poda es intensiva y se hace entre enero y febrero a una

altura de 2,5 a 3 m; la segunda, es menos severa que la primera y con ella se pretende promover la maduración de los frutos del café.

### 2.5.3 Crecimiento y rendimiento

E. poeppigiana en condiciones de libre crecimiento alcanza una altura media de 22 m, pudiendo alcanzar hasta 30 m en menos de 10 años con condiciones apropiadas de suelo y manejo (Russo, 1984).

En Turrialba, Russo (1983), evaluó la producción de biomasa al podar E. poeppigiana plantada a 6 x 6 m (280 árboles/ha) como sombra en un cafetal y encontró que con podas semestrales se depositaron alrededor de 13,7 toneladas de materia seca/ha/año. Con una poda anual el mismo autor obtuvo 22,7 t M.S./ha/año, contabilizando en ambos casos las hojas caídas naturalmente durante el periodo entre podas. Con estos valores de biomasa depositada el aporte de nutrimentos al suelo fue de 269 kg de N, 21 kg de P, 150 kg de K, 126 kg de Ca y 51 kg de Mg, mediante dos podas anuales.

Glover y Beer (1984), indican haber obtenido 7,8 t/ha/año de biomasa seca como producto de tres podas durante un año en árboles de E. poeppigiana establecidos como sombra de un cafetal a una densidad de 245 árboles/ha en Turrialba. Mientras que para un cafetal alledaño con sombra de C. alliodora y E. poeppigiana en densidades respectivas de 475 y 222 árboles/ha, encontraron que el producto de las tres podas de E. poeppigiana fué de 3 t M.S./ha/año.

Alpizar et al (1985), encontraron que la suma de los promedios de la biomasa seca de las hojas y ramas del E. poeppigiana (dos podas al año), utilizado como sombra de café en el "Experimento Central de La Montaña", CATIE, fue de

11,8 t M.S./ha/año. Russo (1983), también encontró un valor de 11,8 t M.S./ha/año cuando no tomó en cuenta las hojas caídas naturalmente.

## 2.6 Diseños sistemáticos

La idea fundamental de los diseños sistemáticos, es que la densidad de plantación del cultivo cambia consistentemente de hilera a hilera con cambios de 10 a 15 %; y dado que cada hilera está rodeada por otras con densidades similares, se descarta la utilización de bordes internos (Mead y Stern, 1980). Como consecuencia, la asignación de los tratamientos no es aleatoria, sino decidida con algún esquema tendiente a economizar en el costo y tamaño del experimento (Alder, 1980). Esta disminución de bordes internos hace que los diseños sistemáticos sean potencialmente importantes para la experimentación de cultivos intercalados. Lo cual se debe a que generalmente se requiere utilizar un amplio rango de tratamientos que involucren espacio, combinados factorialmente con muchos otros factores (Mead y Stern, 1980).

Los diseños sistemáticos pueden ser muy útiles en las primeras etapas de la experimentación, donde se requiera un reconocimiento de las respuestas de la planta a un rango amplio de condiciones (Huxley, 1983). Las combinaciones más promisorias pueden analizarse posteriormente con diseños de campo convencionales, más precisos. Alder (1980), indica que en silvicultura la aplicación principal de los diseños sistemáticos se orienta hacia experimentos de espaciamiento en bosques uniformes.

En el presente trabajo se utilizó un diseño sistemático de espaciamientos de árboles de sombra (Erythrina poeppigiana y Cordia alliodora) sobre café, para evaluar el efecto de las diferentes densidades arbóreas sobre el

rendimiento del cultivo. El diseño sistemático utilizado fue el desarrollado por Bleasdale (1967), como se indica en la sección 3.3.2 de este trabajo. Este diseño fue adaptado al presente estudio, debido a que permitió establecer los árboles de sombra con incrementos de densidades en dos direcciones, sin obstaculizar el establecimiento de las hileras de café a un distanciamiento homogéneo.

### 2.6.1 Ventajas y desventajas de los diseños sistemáticos

La principal desventaja de estos diseños es que el análisis de varianza es inapropiado para examinar las variables utilizadas. Esto es debido a que la asignación de los tratamientos no es aleatoria (Alder, 1980; Mead y Stern, 1980; Huxley, 1983; Ortiz, 1984). Otra de las objeciones más grandes de estos diseños es que la comprobación de la hipótesis nula no es generalmente aceptada, por la falta de aleatorización de los tratamientos (Alder, 1980). Mead y Stern (1980), agregan que cualquier tendencia que exista a lo largo de la parcela, perjudica la curva de respuesta de dicha parcela, haciendo menos consistentes las curvas para diferentes réplicas.

A continuación se presenta un listado de las principales ventajas y desventajas señaladas por Huxley (1983) para estos diseños, en comparación con los diseños convencionales:

A. Ventajas: 1) los diseños sistemáticos ocupan un espacio mucho menor que los bloques completamente al azar u otros diseños convencionales; 2) utilizan relativamente pocas plantas; 3) el área experimental efectiva es menor en comparación con la de los diseños convencionales lo que disminuye la variabilidad debida al sitio; 4) el rango de niveles de la variable experimental bajo prueba, puede ser más grande que el de los diseños convencionales, pudiendo

incorporar fácilmente extremos para obtener una mejor apreciación de las respuestas de la planta a las presiones de densidad, o cualquier otro factor de manejo impuesto; y, 5) pueden proveer una respuesta a un tratamiento fácilmente observable, de tal forma que pueden ser muy útiles para demostraciones.

B. Desventajas: 1) los diseños sistemáticos requieren un nivel más alto de destreza para ser establecidos en el campo; 2) cada parcela debe ser ubicada en un área que sea ambientalmente muy uniforme; 3) debido a que son muy susceptibles a daños requieren mucha atención y cuidados para mantener un nivel alto de manejo a través de la parcela (por ejemplo control de malezas); 4) aunque pueden y deberían ser adecuadamente replicados (preferiblemente utilizando diferentes orientaciones cardinales) los datos son evaluados básicamente por regresión; y, 5) puede ocurrir variabilidad no deseada cuando el material genético no es homogéneo y cuando no se toma el cuidado debido en el establecimiento.

## 2.7 Índices de competencia

Donald (1963) señala que los factores por los cuales puede existir competencia entre plantas son agua, nutrimentos, luz, oxígeno, dióxido de carbono y, en la fase reproductiva, los agentes de polinización y dispersión.

Los factores más comúnmente deficientes señalados por Donald (1963) son el agua, los nutrimentos y la luz, aunque en cultivos de fotosintetización rápida el dióxido de carbono puede ser utilizado por las plantas competidoras, así como que en suelos pobremente estructurados el oxígeno puede ser importante. El mismo autor señala además que la competencia por agua generalmente ocurre con otras formas de competencia, especialmente por nitrógeno y otros nutrimentos, pero cuando el agua y los nutrimentos no son limitantes, entonces la sombra será el factor principal.

Según Hall (1974), la definición clásica de competencia no abarca todas las relaciones que pueden ocurrir entre dos plantas que crecen juntas, como la estimulación directa de una planta a otra por medio de la fijación de nitrógeno, y la protección de una especie por otra. Bajo este contexto, el mismo autor indica la conveniencia de utilizar el término de "interferencia entre plantas" propuesto por Harper. Hall (1974), agrega que las interrelaciones entre factores del crecimiento tales como la luz y competencia por nutrimentos no han sido analizadas en conjunto. Esto ha motivado que en el pasado algunos autores como De Wit (1960), hayan utilizado al espacio entre plantas como un término con el que se pretende integrar a todos los componentes de la competencia, argumentando que probablemente es imposible separar un componente individual sin afectar todo el sistema.

En este trabajo se requirió utilizar índices que midieran el efecto de competencia que podrían estar causando los árboles de sombra sobre el cultivo. Motivo por el cual, a continuación se describe una serie de funciones e índices de competencia comúnmente utilizados por agrónomos y silvicultores, para finalmente fundamentar la elección del índice de competencia de Daniels (1976), que fue utilizado en este trabajo.

### 2.7.1 Índices de competencia agrícolas

Mead (1979), señala que los principales modelos utilizados para describir la relación de rendimiento - densidad son:

a) El simple polinomio cuadrático:

$$W = \alpha + \beta \delta + \tau \delta^2$$

donde  $W$  representa el rendimiento por unidad de área,  $w$  representa el rendimiento por planta y  $\delta$  representa las plantas por área (densidad).

Este polinomio ha sido utilizado frecuentemente para suavizar curvas, pero no se considera apropiado para describir la relación antes anotada.

b) La ecuación de Mitscherlich:

$$W = \alpha [1 - \exp(-\beta \delta)]$$

que ha sido evaluada por varios investigadores quienes han encontrado que no siempre es adecuada.

c) La relación recíproca:

$$w^{-1} = \alpha + \beta \delta$$

derivada por Shinozaki y Kira sobre las suposiciones de que la curva de crecimiento fue logística y el rendimiento por área independiente de la densidad en densidades altas.

d) La ecuación recíproca de Holliday:

$$w^{-1} = \alpha + \beta \delta + \tau \delta^2$$

generalizada para la familia de polinomios inversos por Nelder.

(

e) La versión del modelo de Shinozaki y Kira propuesta por Bleasdale y Nelder:

$$w^{-\theta} = \alpha + \beta \delta$$

Mead (1979), agrega que ultimamente las ecuaciones c), d) y e) son las más utilizadas, donde la ecuación c) se utiliza para relaciones asintóticas, y las ecuaciones d) y e) para relaciones parabólicas. Estos modelos son utilizados porque generalmente proveen un ajuste estadístico adecuado de los datos y al menos algunos de los parámetros tienen interpretaciones biológicas razonables.

Holliday (1960), menciona que en cuanto al rendimiento de un cultivo y la densidad de plantación existen dos relaciones distintas de acuerdo a si la variable de rendimiento se refiere a una parte reproductiva o vegetativa del cultivo. En el primer caso, se ha demostrado, principalmente con rendimiento en granos, que la relación densidad - rendimiento es parabólica y la ecuación puede obtenerse por regresión usando el modelo cuadrático:

$$W = \alpha + \beta \delta + \tau \delta^2$$

Esta relación justifica haber tomado un modelo parabólico para relacionar el rendimiento del café en función de las densidades de sombra en el presente trabajo.

Por otro lado, si el rendimiento es medido sobre una parte vegetativa (tubérculos, follaje, madera), la forma de la relación densidad - rendimiento es asintótica. La expresión sugerida por Holliday (1960) para esta relación de rendimiento por densidad de plantas es:

$$W = w' * [1/(1 + w' \beta \delta)]$$

donde W es el rendimiento en materia seca por unidad de área; w' es el rendimiento máximo aparente por planta;  $\delta$  es el

numero de plantas por unidad de área; y  $\beta$  el coeficiente de regresión lineal del recíproco del rendimiento por planta y densidad de plantas. En esta expresión la función de competencia está expresada por el término  $1/(1 + w' \beta \delta)$  que representa la manera en la cual el rendimiento máximo de las plantas ( $w'$ ) es reducido por el incremento de competencia resultante de la mayor densidad de plantas. Además Holliday (1960), señala que  $1/\delta$  es la proporción de área disponible por planta.

Respecto a los índices de competencia en sí, De Wit (1960) derivó una ecuación matemática diseñada para medir el coeficiente de aglomeración relativo ( $K_{ab}$ ) para la especie "a" en asociación con la especie "b":

$$K_{ab} = (O_{ab} * Z_b) / [(M_a - O_{ab}) Z_a]$$

donde  $M_a$  es el rendimiento de la especie "a" en monocultivo;  $O_{ab}$  el rendimiento de la especie "a" en asociación con la especie "b"; y  $Z_a$  y  $Z_b$  las proporciones relativas de las especies, respectivamente.

De Wit (1960), indica que si una especie tiene un coeficiente menor que, igual a, o más grande que uno, esto significa que se ha producido menor, igual o mayor rendimiento que el esperado, respectivamente.

Hall (1974), analizando en detalle el coeficiente de aglomeración relativa propuesto por De Wit (1960), señala que este puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$O_{ab} = (M_a * Z_a * K_{ab}) / [(Z_a * K_{ab}) + Z_b] \quad (\text{para la especie a})$$

&

$$O_{ba} = (M_b * Z_b * K_{ba}) / [(Z_b * K_{ba}) + Z_a] \quad (\text{para la especie b})$$

McGilchrist (1965), desarrolló una medida de agresividad posteriormente analizada y representada por Willey (1979) como:

$$Aab = [Yab/(Yaa * Zab)] - [Yba/(Ybb * Zba)]$$

donde Yab representa el rendimiento de "a" en la mezcla; Yba el rendimiento de "b" en la mezcla; y Yaa \* Zab así como Ybb \* Zba los rendimientos esperados de "a" y "b" cuando han sido sembradas en las proporciones Zab y Zba, respectivamente. Esta medida es interpretada por Mc Gilchrist (1965) y por Willey (1979) en el sentido de que si el valor que se obtiene para la agresividad es de cero, significa que las especies son igualmente competitivas; si es mayor que uno, habrá una ventaja en el rendimiento de "a", por lo que se concluirá que es más agresiva; y si es menor que uno la ventaja obtenida en el rendimiento la habrá tenido la especie "b".

Donald (1963) menciona que para valorar el efecto de la asociación entre especies pareadas se debe tomar en cuenta el efecto de la densidad, y para analizar dicho efecto propone el índice de competencia desarrollado por McIntyre:

$$IC = ((N'A - NA) (N'B - NB)) / (NA * NB)$$

donde NA y NB son los rendimientos por planta de las especies A y B cuando están asociadas, y cada rendimiento por especie representa una densidad respectiva; y N'A y N'B representan los rendimientos por planta de las especies A y B, cuando se siembran en monocultivo con las mismas densidades usadas en el asocio. Si  $IC < 1$ , se interpreta que hay un efecto positivo de la asociación.

Para estudiar este índice de competencia, hay que cultivar las especies solas y asociadas en un rango de densidades suficientemente amplio. Esto además permite la construcción de curvas densidad-rendimiento (Donald, 1963).

Este hecho de que el cultivo tenga que estar presente en monocultivo en un rango de densidades ensayadas en el asocio es señalado por Willey (1979) como una desventaja. Problema que es común a los índices de competencia de cultivos intercalados descritos en esta sección.

Otro índice comunmente utilizado en los estudios de cultivos intercalados es el LER o Proporción de Tierra Equivalente (por sus siglas en inglés "Land Equivalent Ratio"), el cual dá una medida de la proporción de tierra que se necesitaría para producir el mismo rendimiento de los cultivos involucrados en la asociación en monocultivo (Willey, 1979). Pero al igual que los otros índices de competencia que han sido utilizados en cultivos intercalados, necesita estimaciones en monocultivos y en asocio en el rango de densidades utilizado en el experimento.

Willey y Rao (1980), señalan que algunas funciones de competencia propuestas en el pasado como la de De Wit (1960), la proporción de tierra equivalente (LER), y la de agresividad (Mc Gilchrist, 1965), no han producido ninguna medida que pueda ser utilizada para definir cuantitativamente el grado exacto de competencia en una situación dada. Por lo que estos autores sugieren hacer un cambio en la diferencia de los términos de la función de agresividad, por una división de dichos términos:

$$CR = \left[ \left( \frac{Y_{ab}}{Y_{aa}} \right) / \left( \frac{Y_{ba}}{Y_{bb}} \right) \right] * \left( \frac{Z_{ba}}{Z_{ab}} \right)$$

denominándole a esta modificación: proporción competitiva

(CR). Willey y Rao (1980) señalan que si el término CR se observa desde otro punto de vista, resulta que no es más que la proporción de los LERs individuales de los dos cultivos componentes de un sistema de cultivos intercalados, pero corregida en las proporciones en las cuales fueron sembrados inicialmente, o sea:

$$[(LERa/LERb) * (Zba/Zab)].$$

El término CR puede ser útil para comparar la habilidad competitiva de los diferentes cultivos, medir los cambios competitivos dentro de una combinación dada, identificar qué caracteres de la planta están asociados con la habilidad competitiva y determinar qué balance competitivo entre los componentes podría tener la ventaja del máximo rendimiento (Willey y Rao, 1980).

### 2.7.2 Indices de competencia forestales

En años recientes se ha desarrollado una serie de índices de competencia para cuantificar el estado relativo de competencia de los árboles individuales dentro de un rodal. Los índices de competencia también han sido utilizados para desarrollar modelos de simulación sobre el crecimiento de los árboles y para determinar la mortalidad atribuible a la competencia con sus árboles vecinos (Daniels, 1976).

La mayoría de los índices de competencia forestales desarrollados hasta el momento, siguen las dos aproximaciones diferentes que fueron señaladas por Mead (1979) para índices de competencia en general. Una de estas aproximaciones considera los círculos de influencia de cada planta o árbol, donde el radio del círculo puede ser una proporción del tamaño de la planta o una medida arbitraria. La definición de la densidad correspondiente para cada planta bajo esta aproximación, se hace en función del número de

plantas cuyos círculos queden incluidos o traslapados dentro del círculo de la planta de referencia. En cambio la otra aproximación, considera el polígono de tierra teóricamente disponible para la planta. El polígono se define en función de la mitad de la distancia de la planta de referencia a las plantas vecinas, o relacionando el tamaño de la planta en forma proporcional con el polígono. Así, la densidad correspondiente a cada planta de referencia, se estima como el cociente entre el área de su polígono y el área total del lote o parcela y el área de su polígono.

Bajo la línea de la primera aproximación, Opie (1968), desarrolló un índice de competencia al que le denominó modelo de zona de influencia. Este modelo cuantifica las áreas traslapadas entre los círculos formados por cada árbol de referencia y sus competidores. El radio de acción donde ocurre competencia dentro de este modelo, se define como una proporción de su dap que se ajusta a través de análisis de regresión. El efecto de la competencia en este modelo se obtiene sumando las expresiones de traslape entre el árbol de referencia y sus competidores, y multiplicándolas por el cociente entre el área basal del árbol de referencia y el número de competidores:

$$S = (BAF/n) \sum_{i=1}^n C_i$$

donde S representa el efecto de la competencia entre el árbol de referencia y sus competidores; n es el número de competidores; BAF el área basal del árbol de referencia; y  $C_i$  el área de traslapos entre el círculo de influencia de cada árbol competidor y el círculo de influencia del árbol de referencia.

La determinación del radio de acción donde ocurre la competencia para el árbol de referencia es una de las mayores dificultades del modelo (Opie, 1968). En la definición del radio de competencia, Bella (1971) propuso incluir un factor de ponderación que tome en cuenta el desarrollo relativo de los árboles (indicado por el dap de cada uno):

$$CIO_i = \sum_{i=1}^n [(ZO_{ij}/ZAI)(D_j/D_i)^a]$$

donde  $CIO_i$  representa la zona de traslape o de influencia competitiva para el árbol de referencia  $i$ ;  $n$  es el número de competidores cuyas zonas interceptan la del árbol de referencia;  $ZO_{ij}$  es el área de traslape entre el árbol de referencia  $i$  y el competidor  $j$ ;  $ZAI$  es el área de influencia del árbol de referencia  $i$ ;  $D_j$  es el dap del competidor  $j$ ;  $D_i$  el dap del árbol de referencia  $i$ ; y  $a$  un exponente arbitrario.

Bella (1971), concluyó que este índice de competencia explicó por lo menos el 50 % de la variación de los dap en las especies evaluadas en su trabajo.

Un nuevo modelo de círculos de influencia similar al desarrollado por Opie (1968) fue presentado por Keister (1971). Este modelo considera que la cantidad de competencia recibida por cualquier árbol de referencia de sus vecinos competidores, depende de las porciones del área de su círculo de influencia que son traslapadas por los círculos de influencia de sus árboles vecinos, y del área de su círculo de influencia (que es obtenida en función a su tamaño). Así, la competencia recibida del  $i$ -ésimo competidor

por el  $k$ -ésimo árbol de referencia ( $I_{ik}$ ) es definida por Keister (1971) como:

$$I_{ik} = C_{ik} / \pi K_k^2$$

donde  $C_{ik}$  es el área de traslape existente entre el árbol de referencia y el competidor; y  $K_k$ , el radio del círculo de influencia del árbol de referencia.

Además, el radio  $T_i$  del círculo por influencia de un árbol cumple con la siguiente ecuación:

$$T_i = (hc) / m$$

donde  $h$  es la altura total del árbol;  $c$  es el radio de copa; y  $m$  la altura de copa.

Con este índice el crecimiento en plantaciones de baja y alta densidad puede predecirse con los modelos siguientes:

$$a) G_i = b_0 + b_1 d_i + b_2 I_i$$

$$b) G_i = b_0 + b_1 \ln(I_i / n)$$

donde  $G_i$  es el crecimiento en diámetro del árbol  $i$  después del segundo o tercer año;  $d_i$  el dap al comienzo del período de crecimiento;  $I_i$  el índice de competencia al comienzo del período;  $n$  el número de árboles competidores; y  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$  los coeficientes de regresión.

Otro índice de competencia forestal más reciente que sigue la línea de la primera aproximación es el presentado por Daniels (1976), que prácticamente no es más que una modificación del índice desarrollado por Hegyi.

Según Daniels (1976), el índice de competencia propuesto por Hegyi es el siguiente:

$$CI_i = \sum_{j=1}^n (D_j/D_i)/DIST_{ij}$$

donde  $CI_i$  es el índice de competencia del árbol de referencia  $i$ ;  $D$  el dap;  $DIST_{ij}$  la distancia entre el árbol  $i$  y el competidor  $j$ ; y  $n$ , el número de competidores. En este modelo "n" incluye a todos los árboles dentro de un radio de 3,05 m. Lo cual no es completamente satisfactorio, ya que no permite incluir a nuevos competidores conforme desarrollan los vecinos (Daniels, 1976).

Sobre esta base, Daniels (1976) propuso que el número de competidores ( $n$ ) se definiera en base a sus tamaños y a la distancia respecto al árbol de referencia. De esta forma incluyó como competidores potenciales a aquellos árboles vecinos que presentarían áreas basales (BAF) iguales o mayores que 2,3 ó 4,6 m<sup>2</sup>/ha. El radio de influencia del árbol de referencia, lo dedujo a través de una multiplicación entre el dap de los competidores potenciales por una constante de mejor ajuste, que a su vez la obtuvo por medio de análisis de correlación simple.

Modificaciones ulteriores propuestas por Daniels (1976) al índice de Hegyi, expresaron el efecto competitivo como una relación entre las áreas basales de los competidores, el de referencia y las distancias entre plantas  $(D_j^2/D_i^2)/DIST_{ij}$ ; como una relación entre el dap de los competidores, el de referencia y la distancia entre los mismos  $(D_j/D_i)/DIST_{ij}$ ; y la última expresión anteriormente mencionada pero elevando al cuadrado la distancia entre los competidores y el árbol de referencia  $(D_j/D_i)/DIST_{ij}^2$ .

Con estas modificaciones, Daniels (1976) encontró que los mejores coeficientes de correlación que obtuvo entre estos índices de competencia y el crecimiento de la especie de pino "Loblolly" ( $r = -0,40$  y  $-0,46$ ), superaron los coeficientes de correlación encontrados por Hegyi, y superaron o estuvieron muy próximos a los coeficientes de correlación encontrados por otros autores.

Bajo la línea de la segunda aproximación, Brown (1965) desarrolló un método para determinar el "Área Potencialmente Disponible (APA)" de un árbol dentro de un rodal, para evaluar densidades de rodales. Este método consiste en trazar líneas en el campo por medio de azimuts que dividan la distancia entre el árbol de referencia y los vecinos exactamente a la mitad. De esta manera se forman polígonos unidos en forma de rompecabezas que representan el área potencialmente disponible para cada árbol individual, y la densidad representativa por árbol, se obtiene dividiendo una unidad fija de área (e.g. 1 ha) entre su área potencialmente disponible.

Las áreas potencialmente disponibles por árbol divididas en clases, fueron correlacionadas por Brown (1965) contra las áreas basales de cada árbol, encontrando que a medida que se aumentaba el número de observaciones aumentaba la correlación.

Adlard (1973), basado en los trabajos realizados anteriormente por Brown (1965) y por otros autores que continuaron con esta línea de trabajo, utilizó los polígonos formados por un árbol de referencia y sus competidores, adicionándole un factor de ponderación del crecimiento de los árboles. Dicho factor de ponderación lo obtuvo como resultado de la proporción entre las áreas basales relativas del árbol de referencia y sus vecinos competidores. Sin embargo, el método propuesto por Adlard

(1973) aun no ha resuelto el problema de la definición de las áreas de influencia de los árboles, la cual varía en función del crecimiento.

El índice de competencia elegido finalmente para ser utilizado en la asociación agroforestal del presente trabajo, fue el índice de Daniels (1976), descrito anteriormente. Su elección se hizo en base a que con este índice se permitió evaluar el efecto de competencia causado por E. poeppigiana y C. alliodora sobre una planta de referencia de café, incluyendo además dentro de dicho índice, una medida del desarrollo de los árboles de ambas especies forestales. En el caso de C. alliodora esta medida fue la misma utilizada por Daniels (el dap o el área basal), y en el caso de E. poeppigiana se utilizó la biomasa podada de los árboles de esta especie.

## 2.8 Modelos de simulación de sombras de árboles

En la actualidad existen varios modelos que permiten simular la sombra proyectada por los árboles sobre la superficie del suelo, o sobre cualquier otro objeto que se encuentre bajo el radio de acción de su copa (e.g. los modelos de Satterlund, 1971; Satterlund, 1983; y, Quesada et al, 1987). Estos modelos son de particular interés en la agroforestería, porque con ellos se puede determinar si la sombra que proyectan los árboles que se intercalan dentro de los cultivos afectan el rendimiento mediante la competencia por luz.

En el presente trabajo se requirió simular la sombra proyectada por los árboles sobre las hileras de café en evaluación, necesitándose además, cubrir todo el rango de

combinaciones entre latitud, arreglo de establecimiento, dimensiones y formas de copa de las especies forestales consideradas.

Por los requerimientos del presente trabajo, se seleccionó el modelo de simulación de sombras desarrollado por Quesada et al, (1987). Esto debido a que con los otros modelos consultados (Satterlund, 1971 y Satterlund, 1983) sólo se podían obtener estimaciones globales del radio de acción del sombreamiento de los árboles, o bien, las horas sombra proyectadas por especies forestales con copas en forma de cono.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Características del área experimental

El trabajo de campo se realizó en el experimento DRNR 169 del sitio Llanos de San Lucas, ubicado dentro de los terrenos del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica (Figura 1). Las coordenadas geográficas aproximadas del sitio son 9° 53' N y 82° 38' W, y la altitud es de 600 m.s.n.m. La zona está comprendida dentro de la formación bosque muy húmedo premontano (Holdridge, 1979).

La temperatura promedio del lugar es de 21,5 °C, con una media máxima anual de 26,4 °C y una media mínima anual de 18,0 °C. La precipitación media anual es de 2642 mm, con un promedio de 246 días de lluvia. La humedad relativa promedio anual es de 87,5%. La radiación solar media es de 420 Langley/día y el brillo solar medio de 4,6 h/día.

En el Cuadro 1 se muestra la información climática anual del período 1983-1987 (que cubre la parte más importante del período experimental del ensayo), y en la Figura 2 se presenta un climadiagrama que resume las principales características climáticas de la zona (promedio de 17 años o más).

Los meses con déficit hídrico por año para el período experimental del sitio del ensayo fueron: febrero y abril en 1983, marzo y abril en 1984, enero, marzo, abril y mayo en 1985, febrero y diciembre en 1986, y febrero y marzo en 1987. De esta información más los registros del Cuadro 1, se deduce que a excepción del año de 1984, el período experimental del ensayo ha sido relativamente más seco que

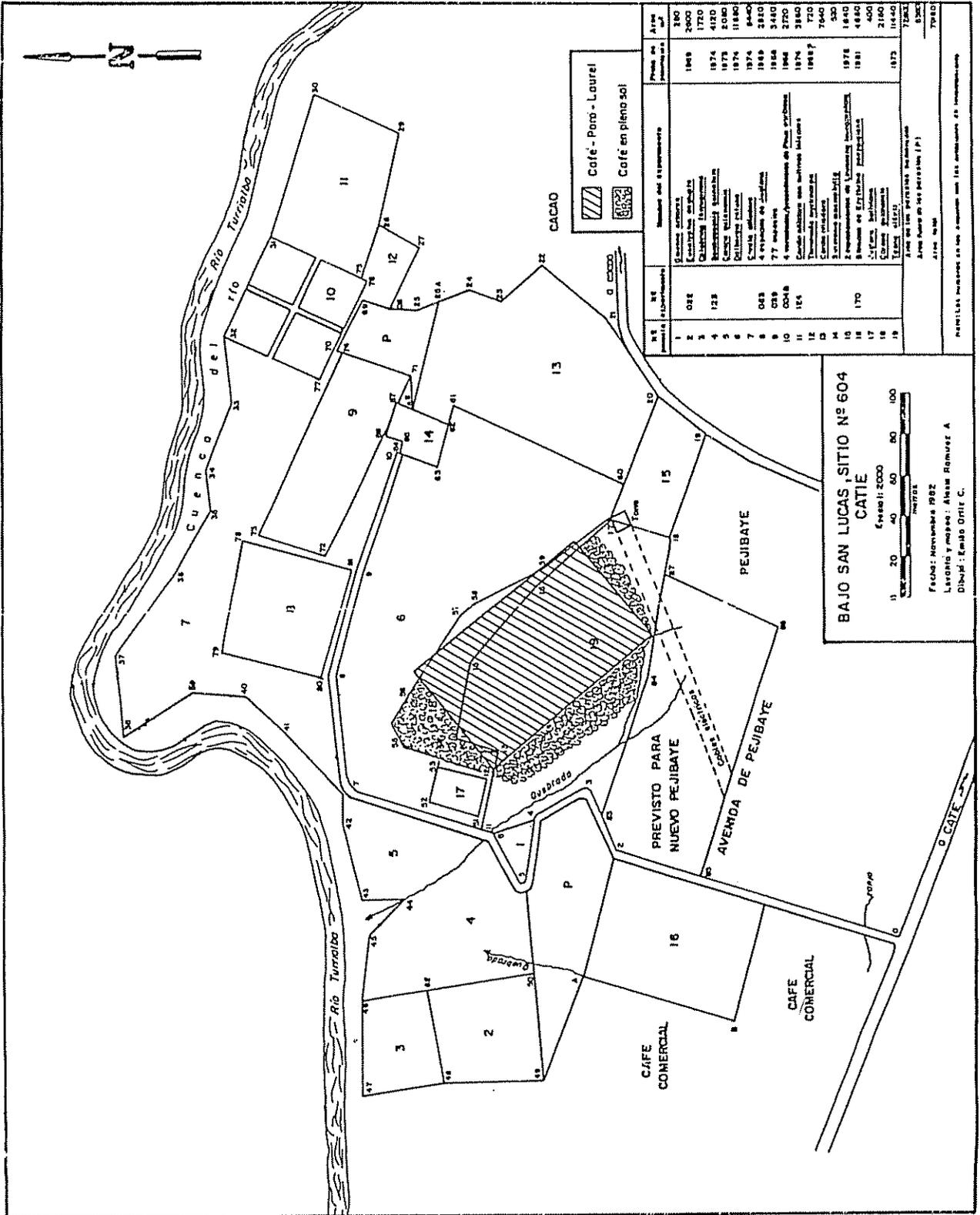
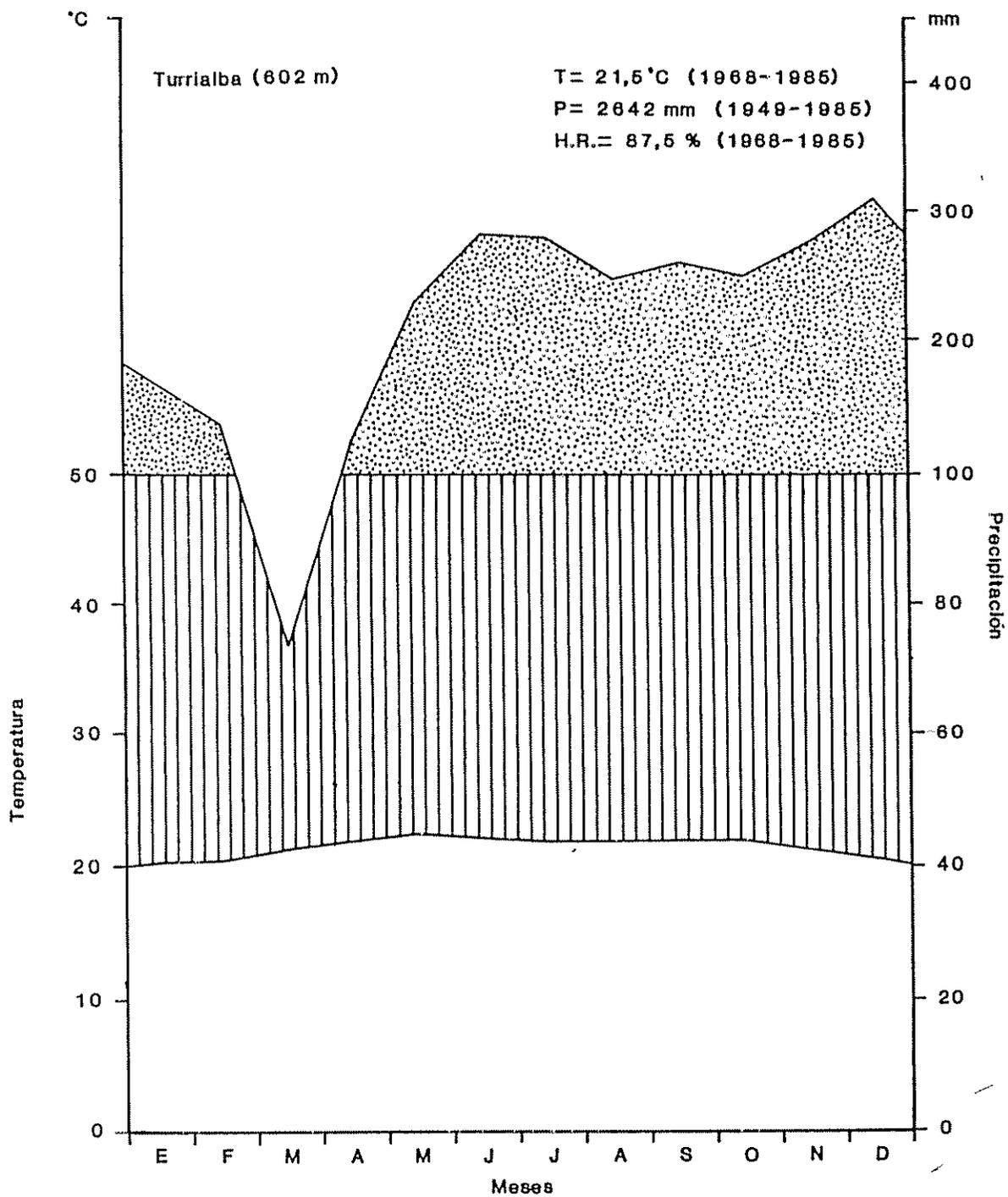


Figura 1 Localización del diseño en estudio dentro de los campos experimentales del CATIE



**Figura 2** Climadiagrama del CATIE

Fuente: Jiménez Otárola, F. 1986

el del promedio de 17 o más años de registros mostrado en la Figura 2, y además, que el año de 1985 fue extremadamente seco en comparación con los mismos registros.

Los suelos del área experimental han sido clasificados por Aguirre (1971) como Inceptisoles Typic Dystropepts de origen volcánico, pertenecientes a la serie Instituto fase normal. La topografía es plana con microrelieve ondulado y con una pendiente general de 0 a 3%. La textura es franco arcillosa de 0 a 30 cm de profundidad y arcillosa de 30 a 60 cm. El pH decrece de 5,1 a 4,9 conforme aumenta la profundidad (0 - 60 cm). Los contenidos de materia orgánica, nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico son moderadamente altos (0,5 - 6,9%; 0,1 - 0,3%; y 50 meq/100 g de suelo, respectivamente).

Cuadro 1. Resumen de los datos meteorológicos del CATIE, para el área del experimento 169\*.

AÑO	PRECIPITACION TOTAL (mm)	TEMPERATURA PROMEDIO (°C)	BRILLO SOLAR TOTAL (h)	HUMEDAD RELATIVA (%)
1983	2395	22,4	16001,8	87,2
1984	2673	21,4	1612,5	86,4
1985	1954	21,4	1699,9	88,9
1986	2269	21,5	1586,7	90,3
1987	2599	22,1	1534,9	90,4

\* Fuente: JIMENEZ, F.; SALAS, A. Estación Meteorológica del CATIE.

### 3.2 Historia del sitio del experimento

Antes de establecer el ensayo, el área estuvo cubierta por un cafetal abandonado, que a su vez fue invadido completamente por malezas (principalmente Panicum maximum). Con el fin de establecer el experimento se

eliminaron los cafetales con machete (desenterrando las raíces con pala), y también se hizo una aplicación de herbicidas para contrarrestar las malezas (2,5 litros de glifosato diluídos en 600 litros de agua/ha). Sin embargo, debido a la persistencia del Panicum maximum fue necesario raspar la capa superficial de toda el área del ensayo con un tractor (primeros 10 cm de la superficie del suelo), para posteriormente hacer una aplicación de herbicidas preemergentes. Aunque el raspado del suelo estuvo bien hecho en la mayoría del área del ensayo, hubo un sitio donde existe una pequeña colina (Figura 3) en el que se eliminó cerca de 20 cm de la capa superficial del suelo. A pesar de este problema, el ensayo se estableció considerando que la profundidad efectiva del suelo en esa área era de cerca de 80 cm.

### 3.3 Descripción del experimento

El experimento consta de una parcela principal de café establecida bajo diferentes densidades de sombra de C. alliodora y E. poeppigiana, y de tres parcelas aledañas de C. arabica establecidas a pleno sol alrededor de la parcela principal (Figura 3).

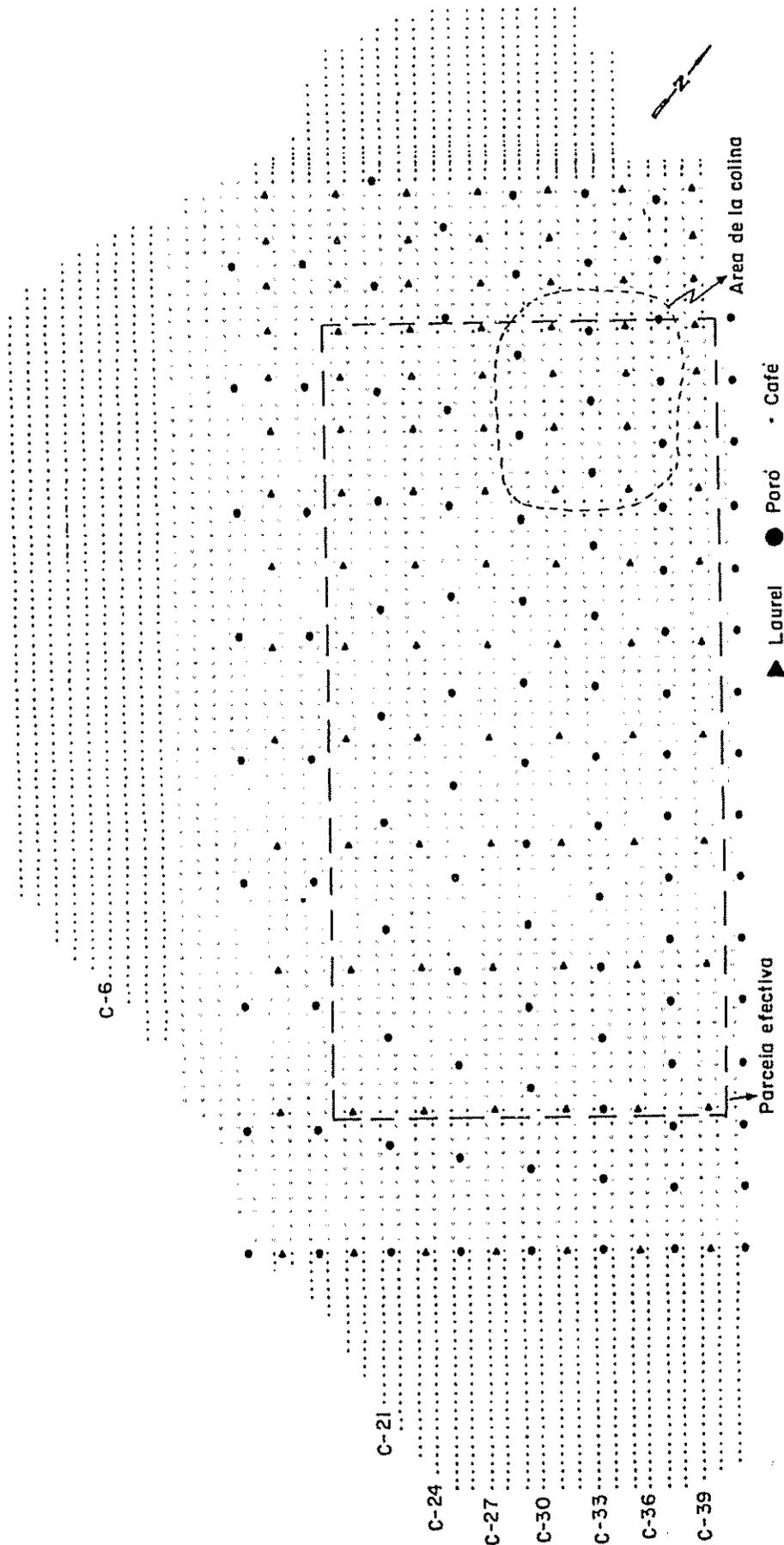


Figura 3 Plano del diseño sistemático de densidades de sombra sobre café incluyendo la parcela efectiva

### 3.3.1 Tratamientos

Los tratamientos considerados en el presente trabajo fueron las densidades de los cafetos y de las especies forestales: a) Coffea arabica cv 'Caturra' plantado bajo sombra a una densidad constante de 4790 plantas/ha, b) C. arabica cv 'Caturra' plantado a pleno sol a una densidad constante de 7215 plantas/ha, c) Cordia alliodora establecido bajo un rango de densidades de 114 - 344 árboles/ha, y d) Erythrina poeppigiana establecido bajo un rango de densidades de 131 - 266 árboles/ha. Tanto las densidades de los cafetos en ambas condiciones (sol y sombra), como las de las especies forestales, cubren el rango normal de las densidades utilizadas por los pequeños caficultores de la región atlántica de Costa Rica.

En la parcela principal el café está plantado a un distanciamiento de 1,67 m entre hileras y 1,25 m entre plantas dentro de una hilera; los árboles de C. alliodora están plantados a distanciamientos constantes entre líneas de 6,68 m y distanciamientos variables entre árbol y árbol de una misma línea de 13,1, 11,1, 9,9, 8,6, 7,5, 6,4, 5,6, 4,9 y 4,3 m; los árboles de E. poeppigiana también están plantados a distanciamientos constantes de 6,68 m entre líneas y distanciamientos constantes entre árbol y árbol de 11,4 m para la primera línea, 9,9 m para la segunda, 8,6, 7,5, 6,1 y 5,6 m para las líneas sucesivas, respectivamente.

Los cafetos establecidos a pleno sol están plantados a un distanciamiento similar al de sombra entre hileras (1,67 m), pero diferente al de sombra entre cafetos (0,83 m).

Las unidades experimentales consideradas en este estudio fueron las plantas y árboles individuales de C. arabica, C. alliodora y E. poeppigiana.

### 3.3.2 Diseño experimental

Se utilizó un diseño sistemático de densidades de sombra sobre café (Figura 3), similar al presupuesto por Mead y Stern (1980), en base al diseño desarrollado por Bleasdale (1967). Este diseño no requiere bordes internos, porque la tasa de cambio de densidades entre tratamientos contiguos es tan similar (a lo sumo 15% de diferencia entre una densidad y otra), que se asume que los tratamientos no resultan afectados por la carencia de bordes entre un tratamiento y otro. Las densidades de los árboles de C. alliodora se incrementan en la dirección Sur - Norte, mientras que las densidades de E. poeppigiana lo hacen en la dirección Oeste - Este (Figura 3). Las tres parcelas aledañas a la parcela principal (café a pleno sol) fueron establecidas como marco de comparación del rendimiento con respecto al café bajo sombra.

Debido a que el número total de plantas de café utilizadas en el experimento es muy grande, los rendimientos de los cafetos se registraron en un número reducido de hileras de café (Figura 3), seleccionadas de modo que representaron todos los tratamientos de sol y sombra del ensayo.

### 3.3.3 Manejo del experimento

Los cafetos\* fueron plantados en junio de 1983. En julio de 1984 y junio de 1985 se hicieron las resiembras necesarias para mantener el 100% de sobrevivencia. Los árboles de C. alliodora y E. poeppigiana

---

\* Las plántulas de C. arabica cv 'Caturra' fueron producidas en el vivero del Señor Cecilio Menes Brenes en San Juan Sur, Turrialba

fueron establecidos en julio de 1984 (un año después del establecimiento de las plantas de café).

Los árboles de E. poeppigiana fueron establecidos a través de estacas procedentes de la Zona de La Suiza, Turrialba. Las estacas tenían 2,1 m de longitud y 6 - 11 cm de diámetro. En cada sitio de plantación se establecieron inicialmente dos estacas, para garantizar el 100% de sobrevivencia. Al alcanzar este objetivo de prendimiento, se quiso dejar una sola estaca por punto (la más homogénea dentro de la plantación), eliminando las restantes mediante la aplicación de 2,4-D a través de la corteza. Sin embargo, la aplicación de 2,4-D eliminó también a las estacas finales. Por lo tanto, en julio de 1986 fue necesario replantar totalmente con nuevas estacas de E. poeppigiana. Este segundo lote de estacas provino de un rodal ubicado en la finca ganadera del CATIE. Las estacas se cortaron de las partes basales y centrales de las ramas de los árboles. Las estacas seleccionadas tenían diámetros entre 10 - 19 cm, y 2,5 m de largo. En enero y julio de 1987 se hizo una segunda y tercera resiembra para asegurar el 100% de sobrevivencia de la plantación. En estas fechas también se removieron las estacas menos homogéneas de los puntos donde las dos estacas ya habían prendido.

Los árboles de C. alliodora se establecieron por pseudoestacas de 5 cm de longitud de tallo y 15 cm de raíz, producidas en el vivero forestal del CATIE, a partir de semillas de rodales existentes en los sitios Florencia Sur, Cabiria y Bajo Chino dentro del mismo CATIE. En el caso de C. alliodora también se establecieron dos pseudoestacas en cada punto, dejando posteriormente solo el árbol más homogéneo. Los árboles menos homogéneos se eliminaron manualmente desde la raíz. Con este método se

logró que solamente fuera necesario hacer una resiembra de dos árboles en junio de 1985.

En el Cuadro 2 se presenta un resumen del manejo agronómico realizado a la plantación de café durante el período junio 1984 - junio 1988. En dicho manejo no se incluyen las cosechas de café, pues éstas forman parte de las variables de medición del presente trabajo.

Cuadro 2. Resumen de labores agronómicas en la plantación de café del experimento 169 durante el período junio 1984 - junio 1988 (actividades anuales).

Mes	Actividad	Comentario
Enero	Control de malezas	Chapea con machete
Enero	Fertilización	Nitrógeno <sup>1</sup>
Abril	Control de malezas	Herbicida preemergente
Abril	Aplicación fungicida	Arseniato de plomo
Mayo	Fertilización	Fórmula completa <sup>2</sup>
Junio	Aplicación fungicida	Cupratos
Julio	Control de malezas	Herbicidas postemergentes
Agosto	Aplicación fungicida	Cupratos
Agosto	Fertilización	Fórmula completa <sup>2</sup>
Septiembre	Control de malezas	Herbicidas posemergentes

<sup>1</sup> = 3 oz. de sulfato de amonio, 2 oz. de nitrato de amonio ó 1,5 oz. de urea/planta.

<sup>2</sup> = 2 oz. de 20-7-12-3-1 ó 2 oz. de 18-5-15-6-2/planta

### 3.4 Variables estudiadas

#### 3.4.1 En el suelo

Se tomaron muestras de fertilidad del suelo de toda el área experimental después del establecimiento del ensayo (agosto de 1983), y en enero de 1988 se hizo otro

muestreo de suelos en la parcela principal. En esta última fecha también se midió el contenido y distribución de la pedregosidad hasta 60 cm de profundidad a través del área de la parcela principal. Los análisis de fertilidad se hicieron en los laboratorios del CATIE con la metodología estandar (Cuadro 1A).

En la primera medición de fertilidad (agosto de 1983) se tomaron muestras a 0 - 15 y 15 - 30 cm de profundidad (Figura 1A). Las variables evaluadas incluyeron: textura, pH, materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, acidez extractable y capacidad de intercambio catiónico.

Debido a que en el área de la parcela efectiva de café bajo sombra se observó que existían sitios con presencia de alto contenido de pedregosidad superficial, se prepararon 15 calicatas de 0,80 x 0,80 x 0,60 m en las cuales se midió el volumen ocupado por las piedras. Las calicatas se ubicaron en forma sistemática en el terreno (Figura 2A). La tierra extraída de las calicatas se tamizó con una malla de alambre de 1 cm<sup>2</sup> para separar las piedras. El volumen de piedras se determinó por desplazamiento en agua en un barril de 55 galones de capacidad. El porcentaje de piedras por calicata se obtuvo mediante la relación volumen de piedras/volumen total de la calicata.

En enero de 1988 se hizo un segundo muestreo de fertilidad en la parcela principal, para utilizar estos datos como covariables del rendimiento del café, y para compararlos con los del muestreo inicial de fertilidad. En esta ocasión el suelo se muestreó a cuatro profundidades diferentes: 0 - 15, 15 - 30, 30 - 45 y 45 - 60 cm. Las muestras de los dos estratos superficiales se tomaron con barreno en forma sistemática dentro del terreno, distribuidos en las 15 subáreas indicadas en la Figura 2A.

Cada muestra fue producto de una mezcla de 20 submuestras por subárea para los estratos 0 - 15 y 15 - 30 cm de profundidad (Figura 2A). Para las profundidades 30 - 45 y 45 - 60 cm, las muestras se obtuvieron de los sitios donde se prepararon las calicatas. Cada una de estas muestras estuvo compuesta por cuatro submuestras, extraídas de las paredes de las calicatas.

### 3.4.2 En el cultivo del café

En el presente trabajo se estudiaron las siguientes variables dentro del cultivo del café: 1) las cosechas del grano comprendidas dentro del período 84-87, 2) la biomasa aérea total (hojas mas ramas) por cada planta a principios de 1988, y 3) como covariables dentro del cultivo, las mediciones de diámetro basal (a 10 cm sobre el suelo) y diámetro de copa efectuadas a todas las plantas a principios de 1985, así como la cosecha precoz de café 84 - 85. Todas estas covariables fueron medidas cuando los árboles de *E. poeppigiana* y *C. alliodora* aún no habían causado ningún efecto sobre los cafetos, con el objeto de eliminar parte de la variabilidad debida al clima, suelo, composición genética, etc.

El rendimiento por planta se midió en cada ciclo de fructificación por medio de recolecciones quincenales de granos maduros. En la última recolección del grano, se incluyeron los granos maduros y verdes. En cada recolección se registró el peso fresco de los frutos maduros por planta y se determinó el contenido de materia seca de los granos con base en una muestra de 500 g de frutos de las plantas bajo sombra y otra de las plantas a pleno sol, secadas a 70 °C durante 72 horas.

La biomasa aérea total por planta (tallos con hojas) se estimó en base a un análisis de regresión

entre las áreas basales de los tallos/mata y el peso de los tallos con hojas obtenidos en la primera poda de los cafetos en enero de 1988. Previo a la ejecución de esta poda, se midieron las áreas basales de todos los tallos/mata a 10 cm sobre el suelo. La decisión de qué tallos podar se hizo individualmente para cada cafeto dependiendo de la edad del tallo, su estado fitosanitario, nivel de daño por cosecha, etc. Después de la poda, los tallos podados se agruparon por hileras, se mezclaron y de ellos se extrajo una muestra de 10 tallos al azar. A estos tallos se les separaron las hojas y el material leñoso. Las hojas se mezclaron y de ellas se obtuvo una muestra de 500 g. El material leñoso se dividió en tres partes: basal, medio y terminal. Cada una de estas partes se cortó con machete en discos de más o menos 1 cm de grosor. Estos discos se mezclaron y de ellos se obtuvo una muestra de 500 g. El peso seco de hojas y tallos se determinó secando las muestras en un horno a 70 °C durante 72 horas.

### 3.4.3 En las especies forestales

En las especies forestales (C. alliodora y E. poeppigiana) se registraron las coordenadas cartesianas de cada árbol dentro de la parcela en junio de 1987. En C. alliodora se midió la altura total (medida con vara telescópica), el diámetro a la altura del pecho (medido con cinta diamétrica), la altura de copa y el diámetro de copa en diciembre de 1986, julio y diciembre de 1987, y junio de 1988. En E. poeppigiana solamente se hicieron mediciones de altura total, diámetro de copa y altura de copa en julio de 1987, y determinación de la biomasa de la poda practicada en enero de 1988. Con base en estas mediciones se determinaron: 1) las densidades de plantación de C. alliodora y E. poeppigiana, 2) el crecimiento en altura total, diámetro a la altura del pecho y diámetro de copa de C. alliodora, 3) las cantidades de horas sombra proyectadas

por ambas especies (por medio del modelo de simulación de sombras de Quesada et al, 1987), y 4) la producción de biomasa podada de E. poeppigiana.

Las coordenadas cartesianas de los árboles se midieron con cinta métrica. Como punto de origen se escogió el primer árbol de C. alliodora ubicado al sureste de la primera fila de los árboles de esta especie (Figura 3). Las distancias de las ordenadas entre un árbol y otro se midieron siguiendo el rumbo de las filas (320° N-E), y las distancias de las abscisas, el rumbo perpendicular de 50° N-W.

Una vez obtenidas las coordenadas por árbol, se calcularon las densidades puntuales en el sitio de ubicación de cada árbol, en base al polígono regular de área potencialmente disponible alrededor de cada árbol (Figura 3A), siguiendo la metodología desarrollada por Brown (1965).

La densidad ( $\delta$ ) puntual en el sitio de ubicación de cada árbol de C. alliodora o E. poeppigiana se obtuvo como el área por hectárea ( $m^2$ ) dividida entre el área por árbol calculada como un rectángulo (Figura 3A):

$$\delta = \frac{10.000}{[(dx_1 + dx_2)/2] * [(dy_1 + dy_2)/2]}$$

donde:  $\delta$  representa la densidad para cada árbol (árboles/ha) y dx y dy, la distancia en las abscisas y en las ordenadas entre los árboles vecinos de una misma especie (m).

El dap de C. alliodora y los datos de biomasa de E. poeppigiana también se utilizaron para calcular los índices de competencia que se desarrollaron en el presente trabajo.

La biomasa podada de E. poeppigiana se midió únicamente para los árboles comprendidos dentro de la parcela efectiva (ver Figura 3). En la poda se cortaron las ramas de los árboles con machete a una altura de más o menos 2 m sobre el nivel del suelo, dejando sin cortar una o dos ramas (Figura 4). La rama o ramas que se le dejaron a cada árbol también fueron podadas en los extremos terminales. Al momento de la poda se registraron los pesos frescos de las ramas podadas (que incluían hojas). El peso seco se determinó con base en muestras de 500 g secadas al horno durante 72 horas a 70 °C

### 3.5 Análisis de la información

Con las variables altura total y diámetro a la altura del pecho de los árboles de C. alliodora, se construyeron las curvas de crecimiento de esta especie para las diferentes densidades de plantación.

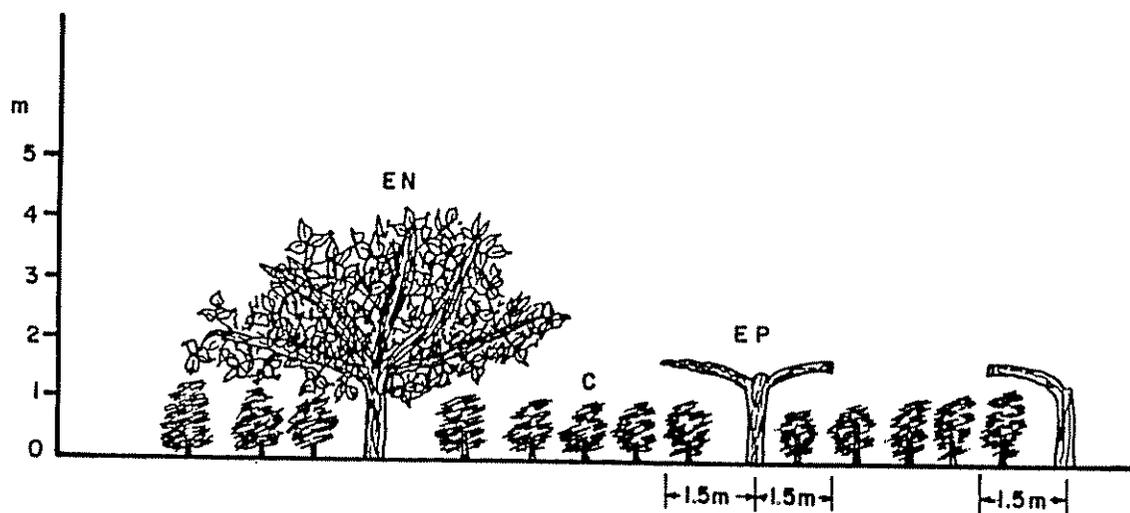
Los rendimientos totales (1984-87) de las plantas individuales de café (g M.S. de frutos/arbusto) fueron utilizados como variables de respuesta de las densidades de sombra de ambas especies forestales (C. alliodora y E. poeppigiana), a través de análisis de regresión múltiple. Los modelos estadísticos generales utilizados en estos análisis fueron los siguientes:

$$Y = \mu + F(\delta_p, \delta_1) + \epsilon$$

&

$$\ln Y = \mu + F(\delta_p, \delta_1) + \epsilon$$

donde Y representó la producción total (g M.S.) de cada arbusto de café sometido a una misma densidad de ambas especies forestales;  $\delta_p$  y  $\delta_1$  representaron las diferentes densidades de E. poeppigiana y C. alliodora a las que fueron sometidas las plantas de café en el experimento;  $\epsilon$  el error experimental y F una función a definir apropiadamente.



C = Plantas de café

EN = Árboles de E. poeppigiana no podados

EP = Árboles de E. poeppigiana podados

Figura 4 Representación de la poda efectuada sobre los árboles de E. poeppigiana

Estos modelos generales además de haber sido probados en forma lineal, también fueron expresados en las formas cuadrática y recíproca sugeridas por Holliday (1960) y Mead (1979), respectivamente, por referirse el grano de café a la parte reproductiva del cultivo. De todos los modelos de regresión utilizados, el polinomio cuadrático aplicado a una respuesta logarítmica fue el que presentó siempre el mejor ajuste biológicamente aceptable.

Las densidades de sombra asignadas a cada planta de café fueron evaluadas en dos formas diferentes: a) en base a las densidades de los polígonos regulares descritos anteriormente; y, b) en base al número de árboles de cada especie comprendido dentro de un perímetro de diferentes radios para cada planta (densidades circulares).

Las densidades circulares, se calcularon contando el número de árboles de cada especie forestal incluidos dentro de un radio de 5, 7, 10 y 15 m alrededor de cada planta individual de café, y luego se hicieron las transformaciones correspondientes a una hectárea (ver programas de cómputo en el Anexo 1).

Los polígonos regulares sirvieron como mejores predictores del rendimiento de los cafetos, por lo que se seleccionaron para los análisis con los modelos estadísticos generales.

A los modelos estadísticos generales se les fueron adicionando las variables explicativas del sitio (covariables), para corregir parte del error experimental debido a la asignación sistemática de los tratamientos en el terreno, y a la falta de repeticiones del experimento.

La primera covariable utilizada fue la cosecha precoz de café 84-85. Posteriormente se fueron agregando las covariables diámetros de copa de los cafetos, diámetros de los tallos por arbusto de café a 10 cm sobre el suelo, y la transformación de los diámetros de los ejes a áreas basales por arbusto. Finalmente, se agregaron algunas de las variables del suelo (pedregosidad y fertilidad a diferentes profundidades).

Las variables de fertilidad del suelo medidas al inicio del establecimiento del ensayo no fueron utilizadas como covariables, debido a que sólo se tomaron cuatro muestras dentro del área de producción de café bajo sombra. Por esta razón, sólo se incluyeron algunas de las variables de fertilidad medidas en enero de 1988, aun a sabiendas que podían estar afectadas por los tratamientos. La selección de las variables de fertilidad incluidas en los modelos generales, se hizo en base a un análisis de regresión "Stepwise", incluyendo solamente las que resultaron más significativas. Estas variables de fertilidad, fueron sometidas además a un análisis de correlación, para evitar la introducción de variables autocorrelacionadas entre sí a los modelos estadísticos generales.

Una vez probadas todas las covariables dentro de los modelos estadísticos generales (en forma lineal y cuadrática), se fueron eliminando aquellas que casi no incrementaron en nada el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), o cuya significancia dentro del modelo fue baja. De esta manera se llegó a escoger como covariable únicamente al área basal de los ejes/cafeto medida a principios de 1985.

Una metodología de análisis similar a la descrita para la producción de café en grano, fue realizada para la

producción de biomasa aérea total estimada por planta de café.

Por otra parte, los rendimientos del café producidos durante los dos últimos años del estudio, fueron utilizados como la variable de respuesta de los diferentes índices de competencia probados en forma individual como variables independientes (Cuadro 3). Estos índices de competencia fueron adaptados al presente trabajo de las modificaciones propuestas por Daniels (1976) al índice de competencia de Hegyi. Cada índice de competencia por arbusto de café fue obtenido por la sumatoria del inverso de los valores correspondientes a la distancia entre los árboles y el arbusto de referencia dentro de diferentes radios de 5, 7 y 10 m; o bien, dividiendo la sumatoria del dap de los árboles de C. alliodora o la biomasa podada de los árboles de E. poeppigiana, entre la sumatoria de las distancias del cafeto de referencia a los árboles incluidos dentro de los radios ya señalados (ver programas de cómputo en el Anexo 2).

Cuadro 3. Variables utilizadas en los análisis de regresión del rendimiento de café en función de un índice de competencia.

Variable	Y	IC <sub>1</sub>	IC <sub>2</sub> *
Descripción	Rendimiento total (g M.S./planta)	$\sum_i^j (1/d_{ij})$	$\sum_i^j [(dap_j)^2/d_{ij}]$

IC = índice de competencia

$d_{ij}$  = distancia entre el cafeto de referencia i y el árbol j de C. alliodora o E. poeppigiana

$dap_j$  = diámetro a la altura del pecho del árbol j de C. alliodora

\* en el caso de E. poeppigiana en vez de utilizar el dap se utilizó el peso (g M.S.) de la biomasa podada

Las sombras proyectadas por los árboles a cada dos metros sobre el sitio del área de café bajo sombra, también fueron analizadas en este trabajo. Para obtener las cantidades de horas sombra del último período de cosecha en dicha área, se utilizó el modelo desarrollado por Quesada et al (1987). De las cantidades de horas sombra obtenidas a través de este modelo, sólo se seleccionaron aquellas que le correspondieron a las coordenadas de las plantas de café en evaluación. Conociendo el rendimiento de cada planta y las cantidades de horas sombra proyectadas sobre las mismas, se hizo un análisis de regresión simple entre estas variables. El modelo estadístico utilizado en dicho análisis fue el siguiente:

$$Y = \alpha + \beta S + \epsilon$$

donde Y representa el rendimiento total de café del período de cosecha 1987 (g M.S./planta); S las cantidades de horas sombra proyectadas sobre cada planta en el mismo período de tiempo; y,  $\epsilon$  el error experimental.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

##### 4.1 Suelo

Al comparar el estado de las variables del suelo medidas al inicio y final de este experimento (Cuadro 2A y 3A), se encontró que en el estrato de 0 a 30 cm de profundidad la materia orgánica, nitrógeno total, Cu, Zn y Mn han tendido a disminuir. El fósforo y las bases intercambiables (Ca, Mg y K), presentan niveles similares en ambos periodos de tiempo (que en general son bajos), y por otra parte, la acidez extraíble y el contenido de azufre se incrementaron. Estos resultados coinciden con los obtenidos en otros estudios agroforestales cercanos (Alavez, 1987), así como con las características descritas por Aguirre (1971) para esta zona, con excepción de la capacidad de intercambio catiónico, que en el presente estudio resultó muy baja y que en términos generales puede estar resaltando la baja fertilidad del área del ensayo, debido posiblemente a la remoción de la capa superficial del suelo.

En el segundo muestreo de suelos (enero de 1988), los niveles de materia orgánica y Ca resultaron moderadamente altos en el estrato 0-30 cm y tienden a volverse críticos o deficientes a mayores profundidades. Los niveles de nitrógeno total y Mg son moderadamente altos llegando al nivel crítico en el estrato 0-15 cm de profundidad, y se vuelven deficientes a mayores profundidades. Los niveles de P y Cu son críticos o deficientes en la capa superficial y tienden a volverse altos a mayores profundidades. Los niveles de K, S, Zn y Mn son deficientes en todas las profundidades.

Con base en los dos muestreos de suelos realizados hasta la fecha (Cuadro 2A y 3A) se puede decir que dentro del área de evaluación de café bajo sombra no se encontraron

diferencias definidas de fertilidad, ni siquiera en el sitio de la pequeña colina que se afectó más con la remoción del suelo superficial y donde posteriormente se establecieron las mayores densidades de C. alliodora y E. poeppigiana. Sin embargo, en este sitio fue donde se encontraron los mayores porcentajes de pedregosidad medidos en calicatas, que a su vez no parecen haber afectado los rendimientos del café, (como se demostrará en la sección 4.3.3. de este capítulo) debido posiblemente a las condiciones de precipitación de la zona y a la aplicación de fertilizantes en forma homogénea a través de toda el área del experimento.

#### 4.2 Crecimiento de Cordia alliodora

Para detectar tendencias en el crecimiento de C. alliodora por densidades de plantación, las densidades encontradas por el método de polígonos regulares (una por cada árbol como se señaló en la sección 3.4.3) se promediaron entre árboles vecinos de una misma fila, eliminando los bordes externos (Figura 4A). Estas densidades medias por fila a su vez se promediaron con la densidad media de una fila vecina, obteniendo así cinco densidades promedio de plantación (Figura 4A), a las que se les asignaron los crecimientos de los árboles comprendidos dentro de las mismas (Cuadro 4A). Una representación gráfica de los crecimientos en diámetro a la altura del pecho y altura total de los árboles comprendidos en estas cinco densidades se presenta en la Figura 5.

Las tendencias del crecimiento de los árboles de C. alliodora definidas en la Figura 5, fueron comprobadas a través de una prueba de "t" entre los grupos de medias de las cinco densidades obtenidas. A través de esta prueba se encontró que el crecimiento en diámetro a la altura del pecho (dap) fue significativamente mayor (con un nivel de significancia de 95%) para los árboles plantados a densidades

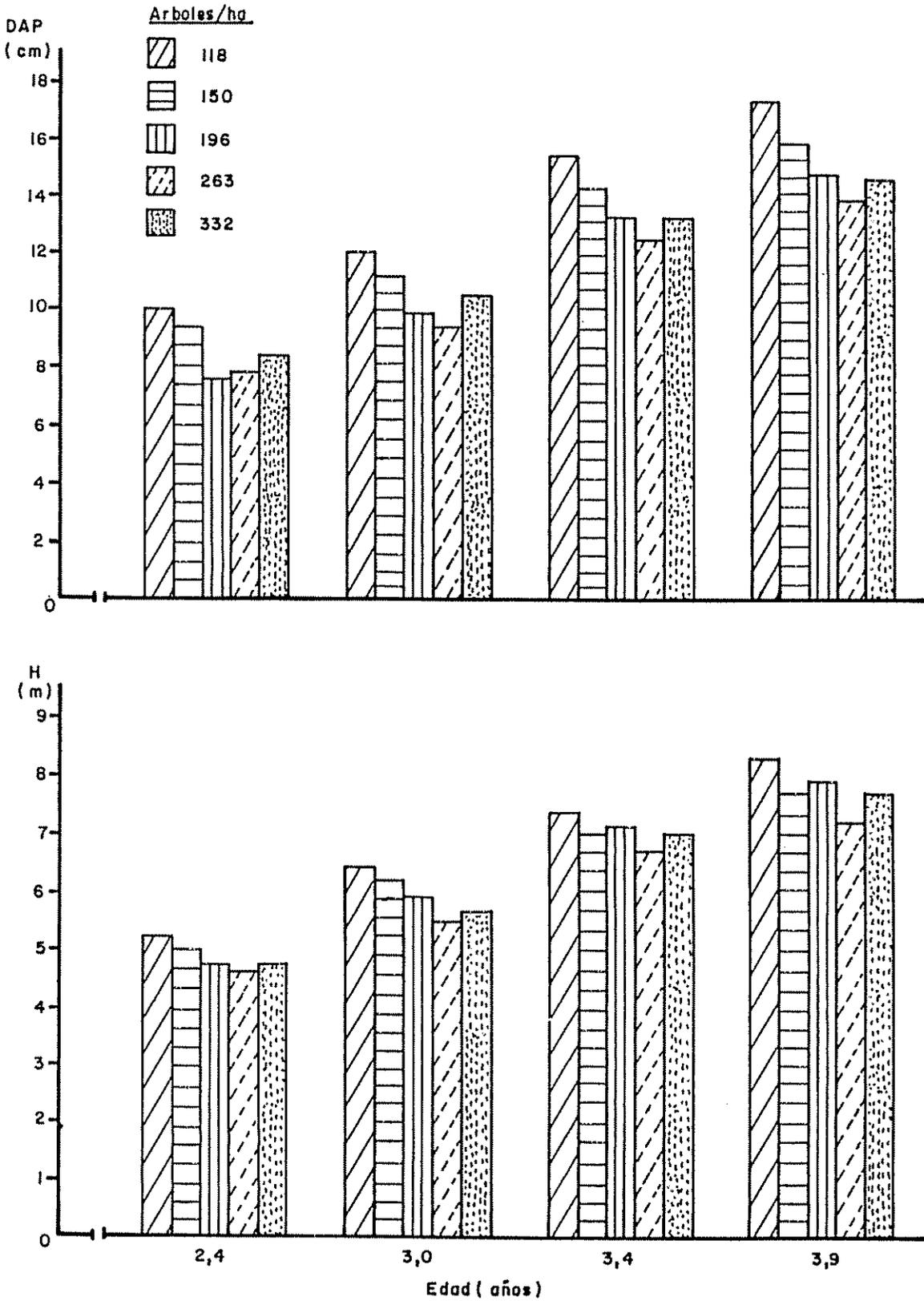


Figura 5 Crecimiento en altura (H) y diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles de Cordia alliodora

bajas (118 - 150 árboles/ha), que para los plantados a densidades altas (196 - 332 árboles/ha), lo cual coincide con la tendencia clásica definida en la literatura que a mayor densidad de plantación menor incremento en dap (Braathe, 1978). Asimismo, se encontró que no existieron diferencias significativas en el crecimiento de esta variable entre densidades bajas (118 - 150 árboles/ha), ni entre densidades altas (196 - 332 árboles/ha). Por otra parte, aunque el crecimiento en altura (h) tampoco mostró una diferencia significativa entre densidades de plantación, las mínimas diferencias que se observaron en el crecimiento de esta variable (Figura 5) parecen estar explicando las diferencias del sitio.

Los incrementos medios anuales (IMA) en dap y h de las cinco densidades representativas de la población (Cuadro 4A), se aproximan a los incrementos de la tasa de crecimiento predecible de *C. alliodora* dentro de las asociaciones agroforestales encontradas por Somarriba y Beer (1986), para los primeros cinco años de edad (3 cm/año en dap y 2 m/año en h). Mientras que son menores a los incrementos encontrados por Romijn y Wilderink (1981) para los árboles de *C. alliodora* establecidos en asocio con café, cuando tenían tres años y medio de edad (5,9 cm/año en dap y 2,6 m/año en h).

Los incrementos en diámetro de copa (Dc) fueron similares para las cinco densidades de evaluación en el presente estudio (1,2 - 1,4 m/año). Lo cual probablemente se deba a la edad tan joven de la plantación.

### 4.3 Producción de café

#### 4.3.1 Rendimiento de café en grano a pleno sol y bajo sombra

En términos generales, el rendimiento de café por unidad de superficie fue mayor a pleno sol que bajo sombra (Cuadro 4), debido posiblemente a la mayor densidad de plantación utilizada a pleno sol (7215 vs. 4790 plantas/ha,

respectivamente), ya que la producción por planta fue mayor bajo sombra (0,55 vs. 0,47 kg M.S./arbusto/año, respectivamente).

Cuadro 4. Rendimiento promedio de café bajo sombra de *E. poeppigiana* y *C. alliodora*, y a pleno sol (Datos de pesos frescos de café por unidad de superficie y por planta)

Cosecha	Rendimiento sombra		Rendimiento sol		% plantas en producción	
	kg/ha	kg/planta	kg/ha	kg/planta	sombra	sol
84-85	402	0,0838	396	0,0549	53,57	35,11
85-86	12583	2,6269	14962	2,0738	99,81	92,98
86-87	11279	2,3546	16375	2,2696	99,81	94,10
87	<u>12796</u>	<u>2,6714</u>	<u>15923</u>	<u>2,2069</u>	100,00	100,00
x 84-87	9265	1,9342	11914	1,6513		
x 85-87	12219	2,5510	15753	2,1834		
MATERIA SECA PROMEDIO						
84-87	2645	0,5522	3401	0,4714		

La existencia de mayor competencia intraespecífica entre los cafetos a pleno sol (que constituye uno de los principales efectos del incremento de las densidades de plantación), es cuestionable respecto a luz, agua y nutrientes. Debido a que a pleno sol, teóricamente los cafetos están recibiendo más luz que los establecidos bajo sombra (a no ser que el efecto de autosombreamiento sea mayor que el de la sombra proyectada por los árboles); respecto al agua, por las condiciones de precipitación de Turrialba raras veces hay escasez de este elemento en el suelo y más bien el problema podría ser ocasionado por deficiencia de drenaje; y respecto a nutrientes, todos los cafetos de sol y sombra recibieron las mismas dosis de fertilizante por planta.

Un ambiente más favorable de producción bajo sombra que a pleno sol no resulta evidente de las tendencias generales del Cuadro 4, por la falta de un análisis estadístico que incluya un número adecuado de repeticiones y aleatorización de los tratamientos. No obstante, del Cuadro 4 se pueden derivar indicios de que al menos la presencia de los árboles de sombra no han reducido drásticamente el rendimiento del cultivo.

No se descarta la posibilidad de que hasta este momento de desarrollo del asocio agroforestal, los cafetos se hallan estado beneficiando en alguna medida de la presencia de los árboles de sombra. Por consiguiente en las secciones posteriores se evalúa más a fondo el rendimiento del cultivo bajo diferentes densidades de sombra, así como la posible competencia interespecífica existente entre los cafetos y los árboles de sombra.

Al comparar el rendimiento promedio del café bajo sombra (cerezas frescas) obtenido en el presente trabajo en el período 1985-87 (12219 kg/ha), se encontró que es superior al promedio de las dos cosechas obtenidas por Glover (1981) tanto bajo sombra de C. alliodora y E. poeppigiana (10378 kg/ha), como únicamente bajo sombra de la leguminosa (10538 kg/ha). Por el contrario, se encontró que es inferior al promedio de las dos cosechas obtenidas por el ICAFE-MAG para cualquiera de los tratamientos del Experimento No. 9 (1986) de café Caturra, establecido bajo sombra regulada de E. poeppigiana en Turrialba (17140-25220 kg/ha).

En forma similar, el rendimiento promedio del café a pleno sol del presente trabajo para el período 1985-87 (15753 kg/ha), es superior al rendimiento promedio de café Caturra indicado por Carvajal (1984) para tres sitios diferentes de Costa Rica (12536 kg/ha), pero inferior a los tratamientos con fertilización a pleno sol encontrados por el

ICAFE-MAG en el Experimento No. 9 (1986) de Caturra en Turrialba (17398 - 22709 kg/ha).

Estas diferencias seguramente se deben a las distintas condiciones de sitio y manejo entre un ensayo y otro. Sin embargo, los resultados del Experimento No. 9 (1986) del ICAFE-MAG muestran una tendencia general de mayor producción de café por planta bajo sombra que a pleno sol, como se encontró en el presente trabajo en el rendimiento por planta.

#### **4.3.2 Relación entre la producción de biomasa aérea de los cafetos y las densidades de los árboles de sombra**

La búsqueda de una relación existente entre la producción de biomasa aérea de los cafetos y las densidades de los árboles de sombra, se hizo con el fin de determinar si el incremento de las densidades de sombra disminuía la biomasa aérea por cafeto.

Como no se podaron todos los tallos de los cafetos al momento de la poda efectuada en enero de 1988, fue necesario hacer una estimación de la biomasa aérea total existente por planta en esa fecha (peso de tallos podados con hojas más pesos estimados de los tallos con hojas no podados), para relacionar estos valores con las densidades de sombra.

La biomasa aérea de los tallos no podados por cafeto se estimó en función del modelo de regresión que presentó el mejor ajuste entre las áreas basales de los tallos podados por cafeto y los pesos de los mismos (Modelo 1), sustituyendo las áreas basales de los tallos no podados dentro de la ecuación:

$$\text{MODELO 1 } \ln BP = 3,92 + 1,24 (\ln \text{ARBAS}) - 0,08 (\ln \text{ARBAS})^2$$

donde BP representó la sumatoria de la biomasa podada por planta de café (g MS tallos con hojas) y ARBAS la sumatoria de las áreas basales de los tallos podados por cafeto (mm<sup>2</sup>).

Otros modelos de regresión presentaron coeficientes de determinación más bajos (Cuadro 5A) que los del Modelo 1 ( $r^2 = 68\%$ ).

La sumatoria de la biomasa aérea estimada por planta (peso de tallos con hojas + pesos estimados de los tallos no podados con hojas) se relacionó entonces con las densidades de sombra de ambas especies forestales (E. poeppigiana y C. alliodora), a través de análisis de regresión. El modelo de regresión de mejor ajuste obtenido entre estas variables fue el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{MODELO 2 } \ln B &= 10,82 - 0,02 (\text{DENER}) - 0,01 (\text{DENCO}) \\ &+ 3,65 \times 10^{-5} (\text{DENER} \times \text{DENCO}) \\ &+ 3,36 \times 10^{-5} (\text{DENER})^2 \\ &+ 5,7 \times 10^{-6} (\text{DENCO})^2 \end{aligned}$$

donde B representó la biomasa aérea total por planta de café (g M.S.) estimada en función de las densidades de sombra de ambas especies forestales, DENER las densidades de E. poeppigiana (árboles/ha) y DENCO las densidades de C. alliodora (árboles/ha).

Aunque el coeficiente de determinación del Modelo 2 fue muy bajo ( $r^2 = 16\%$ ) pero altamente significativo ( $P > 0,01$ ), la predicción de este Modelo (Figura 5A) mostró que la biomasa aérea total del café (tallos + hojas) guardó la relación biológica esperada que a menor densidad de los árboles de sombra de ambas especies forestales se obtuvo la mayor cantidad de biomasa aérea de los cafetos. Sin embargo, también se encontró que la biomasa aérea total de los cafetos fue consistentemente alta siempre que las densidades de E. poeppigiana fueron altas (240 - 266 árboles/ha), sin importar la presencia de C. alliodora en los distintos rangos de densidades evaluados (114 - 344 árboles/ha). Además se encontró otra tendencia consistente, que indicó que al disminuir las densidades de E. poeppigiana (a menos de 240 árboles/ha) e incrementar al mismo tiempo las densidades de C. alliodora (de 200 - 344 árboles/ha), la cantidad de biomasa aérea de los cafetos disminuyó hasta alrededor de un 50%.

El ajuste tan bajo del modelo de predicción de biomasa aérea de los cafetos (Modelo 2) en función de las densidades de sombra, quizás se deba al muestreo atípico de la población, por el hecho de haber podado únicamente los tallos dañados o enfermos, y posteriormente estimar el peso de los tallos remanentes en los cafetos (vigorosos y sanos) a partir de la relación existente entre las áreas basales y los pesos de los tallos ya podados.

#### 4.3.3 Relación entre el rendimiento de café en grano y las densidades de los árboles de sombra

Un modelo de regresión de segundo grado fue utilizado para el estudio de la relación directa entre el logaritmo natural del rendimiento de los cafetos y las densidades de los árboles estimadas a través de círculos de diferentes radios (5, 7, 10 y 15 m), y a través del método de polígonos regulares (Cuadro 6A). Estos modelos de tipo

cuadrático son recomendados ampliamente en la literatura (Holliday, 1960; Mead, 1979).

La tendencia mostrada por los modelos de regresión que incluyeron las densidades circulares de los árboles (primeros cuatro modelos, Cuadro 6A), fue que el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) se incrementó a medida que aumentó el radio del círculo alrededor de cada planta de café para incluir más árboles de cada especie forestal. Lo cual demostró que este método de determinación de densidades no se ajustó a los cambios de densidades continuas establecidas en el experimento, pues el rendimiento de las plantas de café se explicó mejor conforme las densidades de sombra reflejaron cada vez más el promedio de todas las densidades de sombra establecidas. En cambio el modelo que involucró las densidades estimadas en base al método de polígonos regulares (Modelo 3 en el texto), fue el que presentó el coeficiente de determinación más alto de los modelos probados ( $r^2 = 43,7$ ):

$$\begin{aligned} \text{MODELO 3 } \ln \text{ REND} = & 11,62 - 0,03 (\text{DENER}) - 9,34 \times 10^{-3} \\ & (\text{DENCO}) + 3,34 \times 10^{-5} \\ & (\text{DENER} \times \text{DENCO}) + 6,78 \times 10^{-5} \\ & (\text{DENER})^2 + 8 \times 10^{-7} (\text{DENCO})^2 \end{aligned}$$

donde REND representa el rendimiento total de café por planta (g M.S.) para los cuatro períodos de cosecha, DENER y DENCO las densidades de E. poeppigiana y C. alliodora, respectivamente (árboles/ha).

Una representación gráfica de la predicción del Modelo 3 (Figura 6A) mostró tendencias similares a las encontradas con el Modelo 2 para la predicción de la biomasa aérea de los cafetos (tallos + hojas). Con la excepción que en el caso de la predicción del rendimiento en función de las densidades de sombra (Figura 6A), los máximos rendimientos del cultivo (1,2 Kg M.S./ha/año, aproximadamente) se encontraron a densidades altas de E. poeppigiana (alrededor

de 270 árboles/ha), y a densidades bajas de C. alliodora (114 árboles/ha). En cambio en el caso de la biomasa podada, la máxima producción de esta variable fue proyectada por el modelo de mejor ajuste a bajas densidades de ambas especies forestales.

Con el objeto de comparar la predicción del Modelo 3 con el rendimiento real del café medido en función de las densidades de sombra de ambas especies forestales, se graficó una superficie de respuesta con los datos reales de este estudio (Figura 6). Esta superficie mostró dos tendencias bien definidas: 1) la tendencia más consistente fue que el rendimiento del café se incrementó conforme se incrementaron las densidades de E. poeppigiana y las densidades de C. alliodora se mantuvieron bajas (pero presentes en el sistema), y 2) la menos consistente que mostró un incremento en el rendimiento del café conforme se incrementaron las densidades de C. alliodora y E. poeppigiana. Tendencias que concuerdan con las predicciones del Modelo 3 (Figura 6A), y que probablemente estén resaltando la importancia de la presencia de E. poeppigiana en este sistema agroforestal, pues de ambos gráficos (Figura 6 y Figura 6A) se deduce que a altas densidades de E. poeppigiana (240 - 266 árboles/ha) el rendimiento del cultivo es alto (0,6 - 0,9 kg M.S./planta/año), aún y cuando las densidades de la especie maderable (C. alliodora) se incrementen. Los máximos rendimientos (1,0 - 1,2 kg M.S./planta/año) que se derivan de ambas gráficas resultan para las combinaciones de altas densidades de E. poeppigiana (alrededor de 270 árboles/ha) con densidades bajas de C. alliodora (114 - 150 árboles/ha), y para bajas densidades de ambas especies forestales (131 y 114 árboles/ha, en el mismo orden, respectivamente). Resulta evidente además, que a bajas densidades de E. poeppigiana (131 - 150 árboles/ha) y altas densidades de C. alliodora (300 - 344 árboles/ha) el rendimiento del cultivo decrece hasta sus valores mínimos (0,4 - 0,2 Kg M.S./planta/año), por

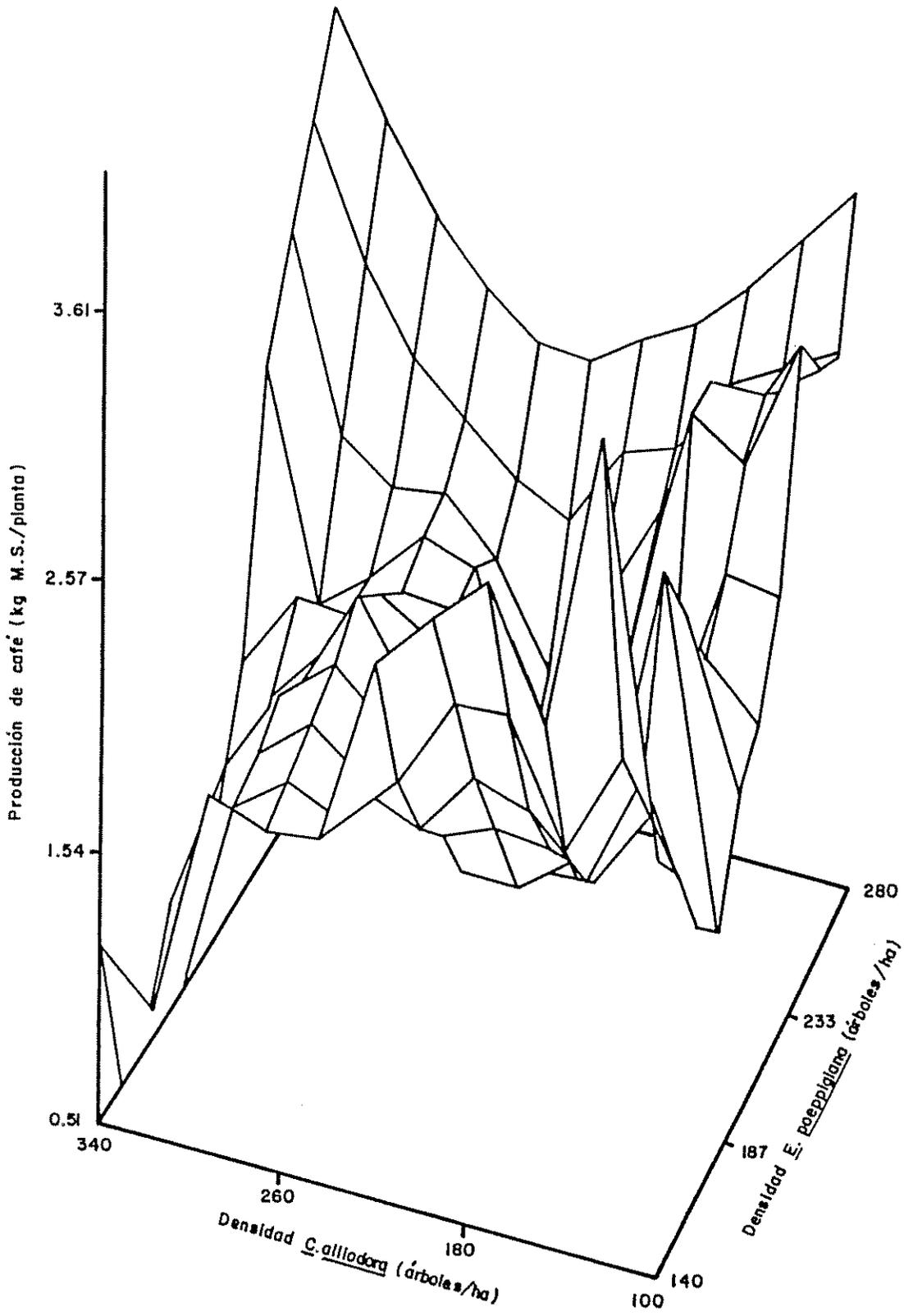


Figura 6 Superficie de respuesta de la producción de café en función de las densidades de sombra de C.alliodora y E.poeppigiana

lo cual se deduce que el rendimiento disminuye por lo menos en un 50% .

Al analizar la correlación existente entre las densidades de ambas especies forestales (Cuadro 7A) se encontró una correlación negativa ( $r = -11\%$ ) pero no significativa ( $P > 0,05$ ) por lo que se descartó la hipótesis de multicolinealidad entre ambas variables independientes.

Las covariables a ser utilizadas también fueron correlacionadas entre sí, y a su vez correlacionadas con las densidades de los árboles de sombra (Cuadro 7A), para evitar la inclusión de variables autocorrelacionadas dentro del modelo de rendimiento del café (Modelo 3).

Con los análisis de correlación realizados entre las covariables y las variables independientes del modelo (Cuadro 7A), únicamente se encontró una correlación altamente significativa entre las densidades de C. alliodora y los porcentajes de pedregosidad ( $P > 0,01$ ). Por lo que para determinar si la pedregosidad efectivamente estaba afectando el rendimiento del café, se realizó un análisis de regresión entre el logaritmo natural del rendimiento del café (g M.S./planta) y los porcentajes de pedregosidad expresados en forma lineal y cuadrática. Los resultados de este análisis de regresión indicaron que aunque hubo un efecto significativo para el modelo y la expresión cuadrática de la pedregosidad, el coeficiente de determinación fue muy bajo ( $r^2 = 4,35\%$ ). Lo cual motivó la eliminación del uso de la pedregosidad como covariable, para evitar efectos de multicolinealidad con las densidades de C. alliodora. Las otras covariables en cambio, presentaron correlaciones no significativas con las densidades de sombra, por lo que fueron seleccionadas para ser introducidas dentro del Modelo 3.

Otra serie de análisis de correlación simple realizada entre el rendimiento del café, las densidades de sombra y todas las variables del suelo medidas en 1988 (Cuadro 8A), indicaron que los rendimientos del café estuvieron altamente correlacionados con el calcio principalmente en forma negativa, aunque en la profundidad 30-45 cm la correlación con este mismo elemento fue positiva. Las densidades de E. poeppigiana también estuvieron altamente correlacionadas en la mayoría de los casos en forma negativa con los niveles de fósforo, calcio, magnesio, cobre, zinc y manganeso, y en cambio las densidades de C. alliodora, estuvieron altamente correlacionadas en forma positiva con los niveles de magnesio presentes en el suelo, y en forma negativa con la materia orgánica y la acidez extraíble.

Estos resultados aparentemente señalan que los niveles de calcio presentes en el suelo han estado influyendo negativamente en el rendimiento del café. Por otra parte, parecen indicar que las correlaciones de algunos elementos coinciden con algunos sitios del experimento donde se presentan bajas densidades de E. poeppigiana y altas densidades de C. alliodora.

Sin embargo, para comprobar si estas conjeturas explicaban el rendimiento del café, se hizo un análisis de regresión múltiple por el procedimiento Stepwise entre el rendimiento de este cultivo y todas las variables del suelo (Cuadro 5). Este análisis confirmó que las variables del suelo que aparentemente estaban influyendo en mayor medida sobre el rendimiento del cultivo fueron: el calcio y manganeso en el estrato de 30 - 45 cm, el magnesio en el estrato de 15 - 30 cm y el azufre, magnesio y zinc en el estrato de 45 - 60 cm de profundidad.

De esta forma se escogieron las variables calcio, manganeso y magnesio (a 30-45, y 15 - 30 cm de profundidad, respectivamente), para ser introducidas como covariables

dentro del Modelo 3, por ser las que presentaron los mayores coeficientes de determinación parciales a través del procedimiento Stepwise.

Cuadro 5. Parámetros estadísticos que describen la relación existente entre el logaritmo natural del rendimiento del café (g M.S./planta) y los niveles de fertilidad del suelo escogidos a diferentes profundidades por el análisis Stepwise.

Variable*	R <sup>2</sup> Parcial	R <sup>2</sup> del Modelo	Valor de "F"	Prob > F
Ca45	0,15	0,15	18,2	0,01
Mg30	0,06	0,21	8,2	0,01
S60	0,05	0,26	6,3	0,01
Mg60	0,04	0,30	5,1	0,03
Zn60	0,05	0,35	7,9	0,01
Mn45	0,08	0,43	13,0	0,01

\* Las variables aparecen listadas en el orden en que fueron seleccionadas por el procedimiento Stepwise.

Todas las covariables introducidas dentro del modelo del rendimiento del café basado en las densidades de sombra, incrementaron el coeficiente de determinación a 60,5% (primer Modelo Cuadro 9A). Sin embargo, a través de este análisis de regresión se observó que tanto el calcio como el magnesio no fueron significativos, y que el manganeso fue significativo pero a un nivel del 5%. Por lo que para determinar la contribución de estas covariables del suelo al nivel de significancia del modelo, se realizó otro análisis de regresión sin incluir las covariables del suelo (segundo modelo, Cuadro 9A). La diferencia encontrada entre los coeficientes de determinación de ambos modelos (3,42%) fue mínima y menor aún entre los coeficientes de determinación

ajustados (1,4%). De esta manera se decidió eliminar las covariables del suelo del modelo del rendimiento de café.

La selección de la covariable final (Modelo 4 en el texto), se hizo en forma similar, eliminando las covariables que no aportaron mayor significancia al modelo:

$$\begin{aligned} \text{MODELO 4 } \ln(\text{REND}) = & 9,26 - 0,02 (\text{DENER}) - 0,01 (\text{DENCO}) \\ & + 2,94 \times 10^{-5} (\text{DENER} \times \text{DENCO}) \\ & + 3,82 \times 10^{-5} (\text{DENER})^2 + 2,4 \times 10^{-6} \\ & (\text{DENCO})^2 + 5,37 \times 10^{-4} (\text{ARBAS}) \end{aligned}$$

donde REND representa el rendimiento total de café en grano por planta para los cuatro periodos de cosecha (g M.S.), DENER y DENCO las densidades de los árboles de *E. poeppigiana* y *C. alliodora*, respectivamente (árboles/ha), y ARBAS la sumatoria de las áreas basales de los ejes de cada cafeto ( $\text{mm}^2$ ), medidos en febrero de 1985.

La covariable seleccionada finalmente (área basal de los ejes de cada planta de café medida en 1985), explicó por sí sola un porcentaje de la varianza total similar al explicado por el modelo donde se incluyeron todas las covariables sujetas a estudio (primer modelo Cuadro 9A). Su efecto positivo parece indicar que esta covariable adiciona aunque en mínima parte, una porción del rendimiento que con el Modelo 3 se hubiera pensado que era reducido por las densidades de los árboles de sombra.

La poca significancia que aportaron las covariables del suelo al coeficiente de determinación del modelo, parece indicar que a través de estos análisis no se encontró un efecto notable de los niveles de fertilidad o los contenidos de pedregosidad sobre el rendimiento del café, en comparación con el efecto encontrado a través de las densidades de los árboles y la covariable área basal. Este hecho se puede explicar para el caso de la fertilidad, por las fertilizaciones mínimas pero homogéneas que se le aplican al

cultivo. Sin embargo, en el caso de la pedregosidad, sólo se puede suponer que el contenido de piedras dentro del área del experimento no ha causado problemas de escasez de agua ni de lixiviación de nutrientes, y tampoco ha obstruido el crecimiento radicular de los cafetos.

En otros estudios (Dnaliwall, 1968 y Srinivasan, 1969), las variables diámetro de copa y diámetros basales han presentado altas correlaciones positivas y significantes con el rendimiento en grano de *C. arabica* ( $r = 31 - 67\%$  y  $r = 39 - 78\%$ , respectivamente). Sin embargo en el presente trabajo, la covariable área basal fue la que explicó en mejor forma el rendimiento en grano de los cafetos dentro de las covariables evaluadas, elevando el coeficiente de determinación del modelo de las densidades de sombra de 43,7% a 60,4%.

Stevens et al (1966), proponen analizar los residuos del error de los modelos de regresión de mejor ajuste contra las variables explicativas o los valores predictivos, con el fin de determinar si dichos modelos han sido correctamente especificados y no se ha violado ninguno de los supuestos básicos del análisis ordinario de regresión por el método de mínimos cuadrados\*.

Con el propósito de determinar si el modelo cuadrático del rendimiento del café basado en las densidades de sombra y la covariable área basal era el más apropiado para los datos observados en el experimento (Modelo 4), se graficaron los residuos del error contra las variables independientes del modelo (Figuras 7A, 8A y 9A).

---

\* Según Draper y Smith (1966), los supuestos básicos de los análisis de regresión son: 1) el modelo especificado es el más apropiado, 2) no existe alta correlación entre las variables independientes del modelo, 3) la varianza del error es homogénea, 4) existe independencia en los términos del error, y 5) los términos del error están normalmente distribuidos.

A través de estos gráficos se encontró que no existe una tendencia en el comportamiento de los residuos, observándose una distribución casi aleatorizada de los mismos alrededor de la banda cero. Sin embargo, para los residuos del error en la covariable área basal, se observó un esquema de menor dispersión de los residuos conforme se incrementaron las áreas basales. Se dedujo que este cambio en las varianzas podría afectar las pruebas "F" mas nó el insesgamiento de los estimadores del modelo. Sobre lo cual es sabido que las pruebas "F" son muy robustas a desigualdades de varianzas, siendo que los niveles de significancia solo cambian en circunstancias extremas (Anderson y Mc Lean, 1974).

Se realizó también una prueba Durbin Watson para analizar autocorrelación entre parcelas vecinas. Las parcelas estuvieron definidas por cuatro hasta nueve plantas de café afectadas por una misma densidad de ambas especies forestales. Como se encontró que existía autocorrelación entre parcelas vecinas, se corrió un modelo autorregresivo utilizando la metodología Proc Autoreg del SAS.

Con los nuevos valores estimados se verificó que la diferencia entre éstos y los obtenidos con el método ordinario de mínimos cuadrados era apenas de milésimas de decimales, por lo que se descartó ese nuevo ajuste, y se aceptó como válido el ya presentado en el Modelo 4.

#### 4.4 Competencia entre el cultivo y las especies forestales

El efecto de competencia global causado por las especies forestales (E. poeppigiana y C. alliodora) sobre las plantas de café, fue medido a través de análisis de regresión (Cuadro 10A).

El modelo de regresión de mejor ajuste ( $r^2 = 34\%$ ) fue el que consideró como predictores a los índices formados por los cocientes entre la biomasa podada de E. poeppigiana ( $IC_2ER$ ) o el dap de C. alliadora ( $IC_2CO$ ), y la distancia o área entre los cafetos de referencia y los árboles incluidos dentro de un radio de nueve metros (ver Sección 3.5):

$$\begin{aligned} \text{MODELO 5 } \ln(\text{REND}) = & 7,96 - 8,36 \times 10^{-5} (IC_2ER) \\ & - 3,3 \times 10^{-3} (IC_2CO) + 6,0 \times 10^{-7} \\ & (IC_2ER \times IC_2CO) + 8,2 \times 10^{-6} \\ & (IC_2CO)^2 + 2,9 \times 10^{-4} (\text{ARBAS}) \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación obtenido con el modelo de competencia de mejor ajuste del presente trabajo ( $r^2 = 34\%$ ), superó los coeficientes de determinación obtenidos por Daniels (1976), al medir el efecto de competencia entre árboles ( $r^2 = 0,16 - 0,21$ ). Lo cual probablemente se deba a la minimización del error experimental del presente trabajo, por incluir a la covariable área basal de los cafetos (medida en 1985).

La predicción del Modelo 5 se representó gráficamente para interpretar el sentido biológico de la competencia causada por ambas especies forestales sobre el rendimiento del café (Figura 10A). Este gráfico mostró que los rendimientos máximos del cultivo (entre 0,9 y 1,2 kg M.S./planta/año) se obtuvieron cuando los índices de competencia de ambas especies forestales fueron bajos. Sin embargo, también reveló que cuando los índices de competencia de E. poeppigiana fueron altos y los índices de competencia de C. alliadora se mantuvieron bajos, se obtuvieron rendimientos medios o altos de café (0,5 - 0,9 kg M.S./planta/año). Estas predicciones del Modelo 5 (Figura

10A), concuerdan con las realizadas anteriormente en la predicción del rendimiento del cultivo en función de las densidades de sombra (Figura 6A), ya que aparentemente los rendimientos altos del cultivo se obtienen cuando las densidades de ambas especies forestales son bajas (lo que implica un efecto de competencia bajo), o cuando las densidades de E. poeppigiana son altas y las de C. alliodora bajas (lo cual puede estar indicando que E. poeppigiana no ha causado mayor efecto de competencia sobre los cafetos).

Por otra parte, con las predicciones del Modelo 5 (Figura 10A) también se detectó que cuando los índices de competencia de E. poeppigiana fueron medios o bajos, y gradualmente se fueron incrementando los índices de competencia de C. alliodora, los rendimientos del café fueron decreciendo hasta llegar a presentar rendimientos mínimos (reducciones desde 1,2 hasta 0,2 kg. M.S./planta/año, aproximadamente). Lo cual probablemente esté indicando que el efecto de competencia de C. alliodora sea el causante principal de la reducción del rendimiento del cultivo, en al menos un 50%, como ya se había señalado anteriormente en la Sección 4.3.3 de este capítulo.

#### 4.5 Efecto de la sombra sobre el rendimiento del café

En las secciones anteriores se encontró que los nutrientes del suelo aparentemente no han estado influyendo en forma significativa sobre la producción de los cafetos, y además se asumió que el agua tampoco es limitante para el rendimiento del cultivo, por las condiciones de precipitación de Turrialba y durante la época desde que se estableció el ensayo.

Bajo estas circunstancias relativamente homogéneas de agua y fertilidad, el factor luz puede convertirse en un elemento importante sujeto a competencia (Donald, 1963).

Por esta razón, en el presente trabajo se simuló la cantidad de horas sombra\* proyectada por los árboles de *E. poeppigiana* y *C. alliodora*, sobre cafetos representativos\*\* de las hileras de evaluación del rendimiento del café.

Las sumatorias de las horas sombra proyectadas sobre los cafetos, se relacionaron con sus respectivos rendimientos para el período de cosecha de 1987, a través de análisis de regresión (Cuadro 11A).

Se esperaba que la sombra proyectada en los sitios de mayor densidad de árboles, provocara un efecto de disminución del rendimiento de los cafetos. La tendencia general mostrada por los modelos de mejor ajuste (Cuadro 11A), indicó que el efecto de la sombra en realidad fue negativo pero con un ajuste muy bajo dentro de los modelos ( $r^2 = 5-9\%$ ), aunque altamente significativa ( $P > 0,01$ ).

Al graficar la relación logarítmica existente entre el rendimiento de los cafetos y las cantidades de horas sombra recibidas por los mismos (Figura 11A), se observó una débil tendencia negativa entre estas variables, y así como una gran dispersión entre los puntos de la curva proyectada.

---

\* Esta simulación se hizo a cada hora (9:00 - 15:00 hrs) y a cada 15 días durante los seis meses del período de cosecha 1987 (julio-diciembre).

\*\*Los cafetos representativos (122 en total) fueron aquellos sobre las coordenadas de los cuales se registró exactamente una cantidad de horas sombra, siguiendo la metodología de Quesada, et al (1987).

Sin embargo, pese a la gran variabilidad detectada por el modelo de mejor ajuste entre ambas variables se encontró que esta débil tendencia de disminución del rendimiento por efectos de sombreamiento, es un indicador de que al menos una parte de la competencia causada por los árboles sobre el cultivo se debe a la interferencia por luz, pues la sombra por sí sola explica 5-9% del rendimiento.

Por otra parte, el gráfico logarítmico de la relación rendimiento-sombra también muestra que no toda la sombra es perjudicial para el cultivo, y que además existe un rango de sombreamiento que pareciera que aumentara el rendimiento de los cafetos (el cual podría estar relacionado con la presencia de *E. poeppigiana*). Sin embargo, dadas las características de este experimento y el estado tan joven de la plantación no se pueden hacer deducciones más consistentes.

## 5. CONCLUSIONES

A pesar de la falta de repeticiones y a la falta de aleatorización de los tratamientos del experimento evaluado en el presente trabajo, las tendencias consistentes observadas en base a los objetivos planteados permitieron arribar a las siguientes conclusiones, que únicamente deben tomarse como preliminares y válidas para el sitio del ensayo:

1) Se encontró que los cafetos presentaron consistentemente altos rendimientos (0,6 - 0,9 kg M.S. café cereza/planta/año) cuando las densidades de E. poeppigiana fueron altas (240 - 266 árboles/ha). Los máximos rendimientos (1,0 - 1,2 kg M.S./planta/año) fueron observados para combinaciones de altas densidades de E. poeppigiana (alrededor de 266 árboles/ha) con densidades bajas de C. alliadora (114 - 150 árboles/ha) y para bajas densidades de ambas especies forestales (131 y 114 árboles/ha, en el mismo orden, respectivamente). Además, los rendimientos mínimos (0,4 - 0,2 kg M.S./planta/año) se presentaron a altas densidades de C. alliadora (300 - 344 árboles/ha) y densidades bajas de E. poeppigiana (131 - 150 árboles/ha).

2) Debido al incremento de los índices de competencia ocasionados por las densidades crecientes de C. alliadora, se observaron reducciones de al menos un 50% en la producción del café. Por otro lado, el incremento de los índices de competencia de E. poeppigiana no mostró un efecto claro de competencia, ya que tanto en los niveles inferiores como superiores de estos índices, se observaron producciones altas.

3) El crecimiento en diámetro a la altura del pecho (dap) de la especie C. alliodora fue significativamente superior ( $P > 0,05$ ) cuando ésta se encontró en un rango de densidades promedio entre 118 y 150 árboles/ha, en comparación con las densidades altas de plantación evaluadas en esta especie (196 - 332 árboles/ha). Las diferencias en altura total en cambio, no fueron estadísticamente significativas, aunque se observó una ligera tendencia de mayor crecimiento en esta variable a densidades medias y bajas, que a densidades altas. Lo cual puede estar reflejando pequeñas diferencias de sitio. Asimismo, se encontró que el crecimiento en diámetro de copa para esta especie presentó un comportamiento similar en todas las densidades evaluadas.

Otras conclusiones relacionadas indirectamente con los objetivos son:

4) Los modelos de regresión que relacionaron el efecto de la sombra proyectada por ambas especies forestales sobre el cultivo, indicaron que en términos generales dicho efecto fue negativo sobre el rendimiento de los cafetos, a pesar de los ajustes tan bajos de los modelos ( $r^2 = 5 - 9\%$ ,  $P > 0,01$ ). Sin embargo, una representación gráfica de la predicción del modelo de mejor ajuste, mostró que no toda la sombra fue perjudicial para el cultivo, pues a bajas cantidades de horas sombra por día, se proyectaron los rendimientos más altos.

5) El método de estimación de densidades a través de la designación de círculos de influencia sobre una planta de referencia, no resultó apropiado para medir los cambios del rendimiento de los cafetos establecidos bajo las diferentes densidades de sombra, en el diseño sistemático del presente estudio.

6) El área basal inicial de los cafetos es una medida adecuada para minimizar las diferencias del rendimiento del café ocasionadas por variaciones entre un cafeto y otro, o por diferencias del sitio.

7) Los métodos utilizados en el presente trabajo para medir las variaciones del rendimiento de los cafetos debidos a las distintas condiciones de fertilidad o pedregosidad del área del ensayo, no detectaron dichas diferencias. Sin embargo, tanto el área basal inicial de los cafetos (medida en 1985), como las tendencias mostradas en el crecimiento en altura de los árboles de C. alliadora, parecen indicar que sí existían pequeñas diferencias de sitio.

8) Es destacable el hecho que hasta este momento de desarrollo del asocio agroforestal evaluado, los máximos rendimientos del cultivo se hallan encontrado cuando estuvo asociado con altas densidades de E. poeppigiana (266 árboles/ha), al mismo tiempo en que la especie maderable (C. alliadora) se encontró a bajas densidades (114 - 150 árboles/ha). Debido a que estos resultados resaltan la tradición agroforestal de los pequeños caficultores de la Vertiente Atlántica de Costa Rica, de asociar siempre a la leguminosa (E. poeppigiana) a altas densidades con el cultivo, y a C. alliadora a bajas densidades, o a prescindir en muchos de casos de esta última especie. Sin embargo, la obtención de altos rendimientos del cultivo con la presencia de ambas especies forestales, es un resultado aún más interesante, que puede ser muy beneficioso para los caficultores de la región Atlántica de Costa Rica, si se llegara a confirmar en futuras investigaciones y a cuantificar en términos económicos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- ADLARD, P. 1973. Development of an empirical model for individual trees within a stand. Oxford, Commonwealth Forestry Institute. 14 p.
- AGUIRRE A., V. 1971. Estudio de los suelos del área del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación, IICA-Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., IICA-CTEI. 139 p.
- ALAVEZ L., S. 1987. Efecto del poró Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook plantado a cuatro espaciamientos, sobre la producción de maíz Zea mays L., en un sistema de cultivo en franjas (alley cropping). Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 87 p.
- ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma, FAO. Vol. 2. 118 p. (Estudios FAO Montes no. 22/2).
- ALPIZAR, L.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J.; FOLSTER, H.; ENRIQUEZ, G. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. 1. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba, (C.R.) 35 (3): 233-242.
- ALVIM, P. 1959. Recientes progresos en nuestro conocimiento del árbol del café. 1. Fisiología. In Progresos en la técnica de la producción de café. Traducción de la edición especial de Coffee and Tea Industries and the Flavor Field. Vol. 81 no. 11. p. 11-23.
- ANDERSON, McLEAN, R. 1974. Design of experiments; a realistic approach. New York, M. Derker. 418 p.
- BEER, J.W. 1985. Experiencias con árboles de sombra en cafetales, en Costa Rica. Turrialba, C.R., CATIE. 8 p. (Trabajo presentado en el seminario de avances en la investigación agroforestal, Turrialba, C.R., set. 1985).
- BEER, J.W. 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. Agroforestry Systems (Holanda) 5 (1): 3-13.

- BELLA, I.E. 1971. A new competition model for individual trees. *Forest Science* (EE.UU.) 17 (3): 364-372.
- BIERHUIZEN, J.F.; NUNEZ, M.A.; PLOEGMAN, C. 1969. Studies on productivity of coffee. 2. Effect of soil moisture on photosynthesis and transpiration of Coffea arabica. *Acta Botánica Neerlandica* (Holanda) 18(2): 367-374.
- BLEASDALE, J. 1967. Systematic designs for spacing experiments. *Experimental Agriculture* (G.B.) 3: 73-85.
- BRAATHE, P. 1978. Los aclareos en rodales coetáneos; un resumen de la literatura europea. Traducido por M.A. Musalem y F. Becerra. 2da. ed. México, Universidad Autónoma de Chapingo. 143 p.
- BROWN, G.S. 1965. Point density in stems per acre. New Zealand Forest Services Research. Note no. 38. p. 1-11.
- CAMPOS, C.F. 1982. El cultivo del café. San José, C.R., Universidad Estatal a Distancia. 79 p. (Serie: Cultivos Mayores no. 5).
- CANNELL, M.; HUXLEY, P.A. 1969. Seasonal difference in the pattern of assimilate movement in branches of Coffea arabica L. *Annals of applied biology* (G.B.) 64 (92): 345-347.
- CANNELL, M.G.R. 1976. Crop physiological aspects of coffee bean yield; a review. *Kenya Coffee* (Kenya) 41(484): 245-253.
- CARRANZA S., J. 1933. Monografía del café. Tomo I. San José, C.R. 398 p.
- CARVAJAL, J.F. 1984. Cafeto, cultivo y fertilización. Berna, Suiza, Instituto Nacional de la Potasa. 254 p.
- CASTILLO, J.E. 1961. Nota sobre el efecto de la intensidad luminica en la floración del cafeto. *CENICAFE* (Col.) 17 (2): 51-60.
- CHAPMAN, H.D. 1965. Cation exchange capacity. In *Methods of Soil Analysis*. Ed. by C.A. Black et al. Madison, Wis., American Society of Agronomy. p. 891-901. (ASA. Agronomy no. 9).

- DANIELS, R.F. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *Forest Science (EE.UU.)* 22 (4): 454-456.
- DE WIT, C.T. 1960. On competition. *Verslagen van landbouwkundige Onderzoekingen (Holanda)* 66: 1-82.
- DHALIWAL, T.S. 1968. Correlations between yield and morphological characters in Puerto Rican and Columbian varieties of Coffea arabica L. *Journal of Agriculture of The University of Puerto Rico (P.R.)* 52 (1): 29-37.
- DIAZ-ROMEY, R.; HUNTER, A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelo y tejido vegetal e investigación en invernadero. Turrialba, C.R., CATIE. 62 p.
- DONALD, C.M. 1963. Competition among crop and pasture plants. *Advances in Agronomy (EE.UU.)* 15: 1-114.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. 1966. Applied regression analysis. New York, J. Willey. 407 p.
- DUQUE, J.P. 1952. La poda racional del cafeto por el sistema Duque. Vol. I. Xalapa, Veracruz, México. 390 p.
- DUQUE, J.P. 1966. Importancia de la luz para el cafetal. *Café de Nicaragua (Nic.)* 179: 21.
- ESCOBAR, M.L. 1979. El crecimiento y el rendimiento del guácimo nogal (Cordia alliodora (Ruiz & Pavon) Sham), asociado con el café en el suroeste de Antioquia. Tesis Ing. For. Medellín, Colombia, Universidad Nacional, Depto. de Recursos Forestales. 158 p.
- EXPERIMENTO NO. 9. Fertilización de café a plena exposición solar y bajo sombra regulada. 1986. In Programa Cooperativo Instituto del Café de Costa Rica/MAG. Informe anual de labores 1986. San José, C.R. p. 32-34.
- FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; HEUVELDOP, J.; ENRIQUEZ, G.; FOLSTER, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. 3. Modelos de la materia orgánica y los elementos nutritivos. Turrialba, (C.R.) 35 (4): 403 - 413.

- FERNANDEZ, C.E. 1963a. Clima y suelos propicios al cultivo del café, propagación del árbol y establecimiento de la plantación. Turrialba, C.R., IICA. 34 p. (Materiales de Enseñanza de Café y Cacao no. 24).
- FERNANDEZ, C.E. 1963b. Prácticas usadas en el cultivo del café. Turrialba, C.R., IICA. p. 1-7. (Materiales de Enseñanza de Café y Cacao no. 25).
- FRANCO, C.M. 1951. A água do solo e o sombreamento dos cafezais na América Central. *Bragantia* (Bra.) 11 (4-6): 99-119.
- GLOVER, N. 1981. Coffee yields in a plantation of Coffea arabica var. Caturra shaded by Erythrina poeppigiana with and without Cordia alliodora. Turrialba, C.R., CATIE. 26 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 17).
- GLOVER, N.; BEER, J. 1984. Spatial and temporal fluctuation of litterfall in the agroforestry associations Coffea arabica - Erythrina poeppigiana and C. arabica - E. poeppigiana - Cordia alliodora. Turrialba, C.R., CATIE. 43 p.
- GONZALEZ, L.E. 1980. Efecto de la asociación de laurel (Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken) con y sin sombra de poró (Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook). Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 110 p.
- GUISCAFRE ARRILLAGA, J. 1959a. Sombra, sol y riego; condiciones generales prevaletientes en las áreas de café en el mundo. *Revista del Café* (P.R.) Nov. 1959: 7-8.
- GUISCAFRE ARRILLAGA, J. 1959b. Sombra, sol y riego; ventajas y desventajas del café cultivado a la sombra. *Revista del Café* (P.R.) Dic. 1959: 7-8,22.
- GUZMAN V., N. 1987. Revisión de literatura sobre fisiología del café; curso de fisiología de la producción. Turrialba, C.R., CATIE. 71 p.
- HAARER, A.E. 1956. Modern coffee production. Londres, L. Hill. p. 1-75.

- HALL, R.L. 1974. Analysis of the nature of interference between plants of different species. 1. Concepts and extension of the De Wit analysis to examine effects. Australian Journal of Agricultural Research (Australia) 25: 739-747.
- HEUVELDOP, J.; FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; ENRIQUEZ, G.; FOLSTER, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. 2. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 35 (4): 347 - 355.
- HOLLIDRIDGE, L.R. 1978. Ecología basada en zonas de vida. Traducido del Inglés por H. Jiménez-Saa. San José, C.R., IICA. 216 p.
- HOLLIDAY, R. 1960. Plant population and plant yield. 1. Field Crop Abstracts (G.B.) 15 (3): 159-167.
- HUERTA, A. 1954. La influencia de la intensidad de la luz en la eficiencia asimilatoria y el crecimiento del cafeto. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., IICA. 69 p.
- HUNTER, J.R. 1959. Límites climáticos del cacao, café y hule. Turrialba, C.R., IICA. 9 p. (Materiales de Enseñanza de Café y Cacao no. 16-E).
- HUXLEY, P.A. 1967. The effects of artificial shading on some growth characteristics of arabica and robusta coffee seedlings. Journal of Applied Ecology (G.B.) 4 (2): 291-308.
- HUXLEY, P.A. 1983. Considerations when experimenting with changes in plant spacing. Nairobi, Kenya, ICRAF. 20 p. (Working paper no. 13).
- JIMENEZ OTAROLA, F. 1986. Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas agroforestales: café-poró y café-laurel, en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa UCR-CATIE. 104 p.
- JOHNSON, P.; MORALES, R.A. 1972. A review of Cordia alliodora (Ruiz and Pav.) Oken.) Turrialba (C.R.) 22 (2): 210-220.

- KEISTER, T.D. 1971. A measure of the intraespecific competition experienced by an individual tree in a planted stand. Louisiana, Agricultural Experiment Station. Bulletin no. 652. 29 p.
- KUMAR, D.; TIESZEN, L. 1976. Some aspects of photosynthesis and related processes in Coffea arabica L. Kenya Coffee (Kenya) 45(486): 309-315.
- MC GILCHRIST, C.A. 1965. Analysis of competition experiments. Biometrics (EE.UU.) 21: 975-985.
- MAESTRI, M.; VIERA, C. 1958. Movimento de estomatos em café, sob condicoes naturais. Ceres (Bra.) 10: 324-331.
- MEAD, R. 1979. Competition experiments. Biometrics (EE.UU.) 35 (1): 41-54.
- MEAD, R.; STERN, R. 1980. Designing experiments for intercropping research. Experimental Agriculture (G.B.) 16: 329 -342.
- MENAS T., O.; FERRER C., G.; GIRARTE D., R.; RODRIGUEZ R., I.; DURAN M., A.; VALDES, M. 1978. Fitotecnia del café. Editado por Elsa María Silva. La Habana, Cuba. Editorial Pueblo y Educación. 221 p.
- NOSTI NAVA, J. 1953. Cacao, café y té. Madrid, España, Salvat. p. 375-457.
- NUNEZ, M.A.; BIERHUIZEN, J.F.; PLOEGMAN, C. 1968. Studies of productivity of coffee. 1. Effect of light, temperature and CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis of Coffea arabica. Acta Botánica Neerlandica (Holanda) 17: 93-102.
- NUTMAN, F.J. 1937a. Studies of the physiology of Coffea arabica. 1. Photosynthesis of coffee leaves under natural conditions. Annals of Botany (New Series) (G.B.) 1(3): 353-367.
- NUTMAN, F.J. 1937b. Studies of the physiology of Coffea arabica. 2. Stomatal movements in relation to photosynthesis under natural conditions. Annals of Botany, (New Series) (G.B.) 1(4): 681-693.
- NUTMAN, F.J. 1941. Studies of the physiology of Coffea arabica. 3. Transpiration rates of whole trees in relation to natural environmental conditions. Annals of Botany (New Series) (G.B.) 5(17): 59-81.

- OPIE, J.E. 1968. Predictability of individual tree growth using various definitions of competing basal area. *Forest Science* (EE.UU.) 14 (3): 314-323.
- ORTIZ, L. 1984. Crecimiento inicial de 18 especies forestales con diseño de espaciamento nelder en tres localidades de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 138 p.
- OSTENDORF, F.W. 1962. The coffee shade problem; review article. *Tropical Abstracts* (Holanda) 17: 577-581.
- PEREZ, C.A. 1954. Estudio forestal del laurel Cordia alliodora (R & P) Cham. Tesis Mag. Agr. Turrialba, C.R., IICA. 182 p.
- QUESADA, F.; SOMARRIBA, E.; VARGAS, E. 1987. Modelo para la simulación de patrones de sombra de árboles. Turrialba, C.R., CATIE. 91 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 118).
- ROMIJN, M.; WILDERINK, E. 1981. Evaluación preliminar de los sistemas agroforestales del ensayo central "La Montaña". Turrialba, C.R., CATIE. 43 p.
- RUSSO, R. 1983. Efecto de la poda de Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook (Poró), sobre la nodulación, la producción de biomasa y contenido de nitrógeno en el suelo en un sistema agroforestal "Café-poró". Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 108 p.
- RUSSO, R.O. 1984. Erythrina: un género versátil en sistemas agroforestales del trópico húmedo. Turrialba, C.R., CATIE. 14 p.
- SAIZ DEL RIO, J.F.; BORNEMISZA, E. 1961. Análisis químico de suelos: método de laboratorio para diagnóstico de fertilidad. Turrialba, C.R., IICA. 107 p.
- SAM, O.; MORALES, D. 1983. Crecimiento de plántulas de cafetos (Coffea arabica L. var. Caturra) al sol y bajo sombra controlada. 1. Viveros en bolsa. *Cultivos Tropicales* (Cuba) 5 (1): 83-93.
- SATTERLUND, D.R. 1977. Shadow patterns located with a programmable calculator. *Journal of Forestry* (EE.UU.) 75: 262-263.
- SATTERLUND, D.R. 1983. Forest shadows: how much shelter in a shelterwood? *Forest Ecology and Management* (Holanda) 5: 27-37.

- SOMARRIBA, E.; BEER, J. 1986. Dimensiones, volúmenes y crecimiento de Cordia alliodora en sistemas agroforestales. Turrialba, C.R., CATIE 23 p. (Serie Técnica. Boletín Técnico no. 16).
- SOTO, F. 1986. The growth of coffee (Coffea arabica L.) seedlings at full sunlight and shade with farm plant densities. Horticultural Abstracts (G.B.) 56 (12): 10138.
- SRINIVASAN, C.S. 1969. Correlation studies in coffee. 1. Preliminary studies on correlation between stem girth and ripe cherry yield in some coffee selections. Indian Coffee (India) 33 (10): 318-320.
- STEVENS, E.J.; ESKRIDGE, K.M.; STEVENS, S.J.; FLOWERDAY, A.D.; GARDNER, C.O. 1986. Phenology of dent corn and popcorn. 1. Analysis of repeated measurements from phenology experiments. Agronomy Journal (EE.UU.) 78: 1081-1088.
- SYLVAIN, P.G. 1958. The photosynthesis of Coffea arabica L. a review of pertinent literature. Turrialba, C.R., IICA. 14 p.
- TIO, M.A. 1962. Effect of light intensity on the rate of apparent photosynthesis in coffee leaves. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico (P.R.) 46 (3): 159-166.
- UGALDE, L.A. 1979. Descripción y evaluación de las prácticas agroforestales en la cuenca piloto de La Suiza, Cantón de Turrialba. Turrialba, C.R., CATIE/UNU. 31 p.
- WEBB, D.B. 1980. Guía y clave para seleccionar especies en ensayos forestales de regiones tropicales y subtropicales. London, Overseas Development Administration. 110 p.
- WILLEY, R.W. 1979. Intercropping its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. Field Crop Abstracts (G.B.) 32 (1): 1-10.
- WILLEY, R.W.; RAO, M.R. 1980. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. Experimental Agriculture (G.B.) 16 (2): 117-125.
- WORMER, T.M.; GITUANGA, J. 1970. Floral initiation and flowering of Coffea arabica L. in Kenya. Experimental Agriculture (G.B.) 6 (2): 157-170.

## 7. APENDICE

Cuadro 1A. Metodologías utilizadas para el análisis químico y textura del suelo.

Determinación	Metodología utilizada	Autor
Materia orgánica	Walkey - Black, usando ácido sulfúrico y dicromato de potasio	Saiz del Río y Bornemiza (1971)
Nitrógeno total	Semi-micro Kjeldall	Díaz-Romeu y Hunter (1978)
Fósforo, Potasio, Cobre, Zinc, Hierro y Manganeseo	Olsen modificado con solución extractiva de $\text{NaHCO}_3$ , pH 8,5, 0,5 N y EDTA disódico	Díaz-Romeu y Hunter (1978)
Calcio y Magnesio	Cloruro de Potasio 1 N determinados por absorción atómica	Díaz-Romeu y Hunter (1978)
Azufre	Solución extractiva de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Díaz-Romeu y Hunter (1978)
Acidez extraíble	Cloruro de potasio 1 N, determinado por distribución de hidróxido de sodio 0.1 N	Díaz-Romeu y Hunter (1978)
pH	Agua con una relación 1:2,5 determinado con potenciómetro	Díaz-Romeu y Hunter (1978)
Capacidad de intercambio catiónico	Acetato de amonio 1N, pH 7,0	Chapman, H.D. (1965)
Textura	Bouyoucos modificado	Díaz-Romeu y Hunter (1978)

## Continúa Cuadro 2A.

Muestra	No.†	Prof. (cm)	N total (%)	P (µg/ml)	K	(aeq/100 ml suelo)				(µ/ml suelo)			
						Ca	Mg	Na	S	Cu	Zn	Mn	Fe
SOL	1	0-15	0,36*	3,5NC	0,43*	4,0*	2,06*	0,51	9,65NC	13,0**	3,6NC	11,7*	335,0**
SOL	1	15-30	0,22*	2,0D	0,18NC	3,5NC	1,96NC	0,36	9,65NC	13,2**	2,5NC	14,7*	276,0**
SOL	2	0-15	0,41**	7,0NC	0,53*	4,6*	2,23*	0,29	6,80NC	13,7**	5,7NC	7,6NC	327,0**
SOL	2	15-30	0,31*	3,5NC	0,38NC	3,5NC	1,87NC	0,34	10,37NC	14,3**	4,0NC	8,3NC	392,0**
SOL	3	0-15	0,29*	2,5NC	0,44*	3,4NC	2,18*	0,33	9,65NC	9,0**	2,2NC	5,8NC	269,0**
SOL	3	15-30	0,21*	2,0D	2,26**	2,9NC	2,14*	0,40	8,22NC	10,9**	2,0NC	8,5NC	301,0**
SOMBRA	4	0-15	0,36*	4,0NC	0,47*	3,9NC	2,00*	0,40	6,80NC	12,2**	3,3NC	10,0*	373,0**
SOMBRA	4	15-30	0,22*	3,5NC	0,23NC	3,3NC	1,92NC	0,30	6,80NC	13,7**	2,9NC	7,6NC	326,0**
SOMBRA	5	0-15	0,35*	4,0NC	0,33NC	4,3*	2,09*	0,31	4,02NC	14,8**	10,1**	10,7*	362,0**
SOMBRA	5	15-30	0,24*	2,0D	0,23NC	3,5NC	2,04*	0,34	4,02NC	14,2**	5,8NC	7,7NC	248,0**
SOMBRA	6	0-15	0,27*	2,0D	0,31NC	3,2NC	1,99NC	0,36	4,02NC	11,3**	3,5NC	11,0*	301,0**
SOMBRA	6	15-30	0,13NC	4,0NC	0,41*	2,6NC	1,94NC	0,49	5,40NC	13,3**	5,7NC	5,1NC	176,0**
SOMBRA	7	0-15	0,29*	2,5NC	0,46*	3,7NC	2,26*	0,33	5,40NC	11,7**	23,4**	12,4*	419,0**
SOMBRA	7	15-30	0,25*	0,5D	0,40*	3,0NC	1,97NC	0,36	8,22NC	14,5**	3,4NC	9,6NC	277,0**

† = Ver Figura 1A para ubicación de las muestras

D = Deficiencia del elemento

NC = Nivel crítico

\* = Contenido medio

\*\* = Contenido alto

Interpretación basada en Díaz-Rovee y Hunter (1978), para cultivos en general.

Cuadro 2A. Análisis de fertilidad del suelo del experimento efectuado al momento de su establecimiento (18-7-83)

Muestra	No. <sup>†</sup>	Profundidad (cm)	Textura	pH	M-O agua (%)	Acidez extraíble C.I.C.	
						(meq/100 ml suelo)	
SOL	1	0-15	Franco arcilloso	5,6	6,5**	0,2	28,45
SOL	1	15-30	Arcilloso	5,7	3,95*	0,5	28,45
SOL	2	0-15	Franco arcilloso	5,8	7,71**	0,1	28,85
SOL	2	15-30	Arcilloso	5,6	6,10**	0,4	29,67
SOL	3	0-15	Franco arcilloso	5,9	5,23**	0,1	26,82
SOL	3	15-30	Arcilloso	5,8	3,95*	0,4	26,82
SOMBRA	4	0-15	Franco arcilloso	5,8	6,50**	0,1	27,84
SOMBRA	4	15-30	Arcilloso	5,6	3,75*	0,4	27,64
SOMBRA	5	0-15	Franco arcilloso	5,8	6,16**	0,1	27,84
SOMBRA	5	15-30	Arcilloso	5,6	4,29**	0,4	28,24
SOMBRA	6	0-15	Arcilloso	5,8	4,76**	0,1	24,38
SOMBRA	6	15-30	Arcilloso	5,8	2,28*	0,5	26,62
SOMBRA	7	0-15	Franco arcilloso	5,8	5,09**	0,1	29,87
SOMBRA	7	15-30	Arcilloso	5,7	4,76**	0,4	28,65

† = Ver Figura 1A para ubicación de las muestras

\* = Contenido medio de materia orgánica

\*\* = Alto contenido de M.O.

Interpretación basada en Díaz-Romeu y Hunter (1978), para cultivos en general.

Cuadro 3A. Segundo análisis de fertilidad del suelo del experimento 169 y contenido de pedregosidad (15-1-88). Profundidad 0-15 cm.

VARIABLE	No. MUESTRA*														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Textura	A.	A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.L.	F.A.	A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.
Contenido piedras (%)	1	19	6	3	9	7	17	6	2	2	7	0	1	17	18
Materia orgánica (%)	5,7**	4,8**	4,0*	5,6**	4,0*	4,0*	4,0*	3,3*	3,6*	3,7*	4,1**	4,2**	3,8*	2,8*	3,7*
Acidez extraíble	0,50	0,70	0,45	0,55	0,60	0,35	0,45	0,55	0,25	0,65	0,40	0,40	0,55	0,35	0,25
(meq/100 ml suelo)															
N total (%)	0,26*	0,23*	0,22*	0,20*	0,21*	0,21*	0,27*	0,16NC	0,18NC	0,15NC	0,21*	0,22*	0,06D	0,15NC	0,17NC
P (µg/ml suelo)	2,9NC	3,2NC	3,5NC	3,2NC	3,5NC	3,5NC	3,2NC	3,2NC	2,6NC	3,5NC	3,5NC	2,3NC	2,9NC	2,0NC	2,0NC
K (meq/100 ml suelo)	0,30NC	0,25NC	0,36NC	0,24NC	0,43*	0,46*	0,29NC	0,31NC	0,61**	0,32NC	0,37NC	0,36NC	0,28NC	0,16NC	0,45*
Ca (meq/100 ml suelo)	6,37*	5,68*	6,54*	6,17*	5,84*	7,14*	6,40*	5,61*	5,86*	5,44*	5,88*	5,84*	5,26*	4,80*	5,42*
Mg (meq/100 ml suelo)	1,76NC	1,49NC	2,14*	1,64NC	1,69NC	2,07NC	1,80NC	1,80NC	2,01*	1,69NC	1,70NC	1,76NC	1,96NC	2,13*	2,33*
S (meq/100 ml suelo)	21,9*	16,2NC	44,8**	16,2NC	19,0NC	16,2NC	0,0D	15,2NC	1,7D	12,4NC	14,3NC	16,2NC	14,3NC	14,3NC	19,0NC
Cu (µg/ml suelo)	1,1NC	1,1NC	0,7NC	0,7NC	0,6NC	0,5NC	0,7NC	0,4NC	0,4NC	0,7NC	0,5NC	0,8NC	0,2NC	0,4NC	0,3NC
Zn (µg/ml suelo)	0,98NC	0,95NC	0,85NC	0,82NC	0,88NC	0,72NC	0,77NC	0,75NC	0,74NC	0,75NC	0,64NC	0,77NC	0,80NC	0,63NC	0,64NC
Mn (µg/ml suelo)	9,9NC	5,9NC	5,0NC	2,7NC	4,1NC	5,1NC	3,2NC	2,8NC	3,9NC	4,9NC	4,7NC	3,5NC	3,2NC	2,4NC	2,0NC

+ = Ver Figura 2A para ubicación de las muestras

- A. = Arcilloso
- F.A. = Franco arcilloso
- F.A.L. = Franco arcilloso limoso
- D. = Deficiencia del elemento
- NC = Nivel Crítico
- \* = Contenido medio
- \*\* = Contenido alto

Interpretación basada en Díaz-Romeu y Hunter (1978), para cultivos en general

Continua Cuadro 3A. Profundidad 15 - 30 cm.

VARIABLE	No. MUESTRA*														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Textura	A.	F.A.	A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	A.	A.	F.A.	F.A.	A.	A.
Contenido piedras (%)	1	19	8	3	9	7	17	2,9*	2	2	2	0	1	17	18
Materia orgánica (%)	4,6**	3,1*	4,4*	4,3**	3,3*	2,9*	2,9*	2,5*	2,7*	3,1*	3,3*	3,3*	3,9*	3,5*	2,4*
Acidez extraíble (meq/100 ml suelo)	0,65	0,65	0,55	0,60	0,60	0,30	0,50	0,60	0,35	0,60	0,70	0,60	0,55	0,40	0,30
N total (%)	0,20*	0,16NC	0,18NC	0,15NC	0,14NC	0,16NC	0,10D	0,13NC	0,16NC	0,06D	0,17*	0,16NC	0,07D	0,13NC	0,12NC
P (µg/ml suelo)	3,5NC	2,6NC	3,2NC	2,9NC	3,2NC	3,5NC	2,6NC	2,9NC	2,3NC	3,2NC	3,2NC	1,7NC	1,7D	1,3D	1,7D
K (meq/100 ml suelo)	0,26NC	0,24NC	0,35NC	0,27NC	0,38*	0,63**	0,25NC	0,33NC	0,58*	0,29NC	0,38NC	0,28NC	0,24NC	0,16NC	0,24NC
Ca (meq/100 ml suelo)	5,77*	5,61*	6,45*	5,76*	5,76*	6,76*	5,89*	4,93*	5,82*	5,31*	5,51*	5,41*	5,03*	4,62*	4,76*
Mg (meq/100 ml suelo)	1,64NC	1,48NC	2,05**	1,58NC	1,71NC	1,94NC	1,64NC	1,56NC	2,07**	1,73NC	1,59NC	1,60NC	1,95NC	2,25**	2,26**
S (meq/100 ml suelo)	21,9*	20,0*	20,9*	18,1NC	18,1NC	14,3NC	1,7D	14,3NC	15,2NC	15,2NC	16,2NC	10,6NC	16,2NC	18,1NC	18,1NC
Cu (µg/ml suelo)	1,3NC	0,7NC	0,5NC	0,7NC	0,4NC	1,2NC	0,5NC	0,5NC	0,5NC	0,7NC	0,8NC	0,3NC	0,2NC	0,3NC	0,5NC
Zn (µg/ml suelo)	0,85NC	0,63NC	0,78NC	0,98NC	0,77NC	0,72NC	0,67NC	0,76NC	0,63NC	0,70NC	0,58NC	0,79NC	0,77NC	0,64NC	0,58NC
Mn (µg/ml suelo)	5,8NC	3,9NC	5,0NC	2,4NC	2,9NC	4,5NC	2,3NC	2,3NC	2,4NC	3,1NC	3,9NC	1,7NC	1,0NC	1,7NC	1,0NC

+ = Ver Figura 2A para ubicación de las muestras

A. = Arcilloso

F.A. = Franco arcilloso

D = Deficiencia del elemento

NC = Nivel crítico

\* = Contenido medio

\*\* = Contenido alto

Interpretación basada en Díaz-Romeu y Hunter (1978), para cultivos en general

Continua Cuadro 3A. Profundidad 30 - 45 cm.

VARIABLE	No. MUESTRA*														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Textura	A. 1	A. 19	A. 8	A. 3	A. 9	A. 7	A. 17	A. 8	A. 2	A. 2	A. 7	F.A. 0	F.A. 1	A. 17	A. 18
Contenido piedras (%)	0,87D	1,14D	0,80D	1,00D	0,33D	0,40D	1,34D	0,47D	0,40D	0,87D	0,33D	0,67D	0,74D	0,47D	0,33D
Materia orgánica (%)	0,30	0,45	0,30	0,25	0,20	0,45	0,65	0,50	0,25	0,45	0,35	0,35	0,30	0,50	0,30
Acidez extraíble (meq/100 ml suelo)	0,06D	0,06D	0,06D	0,02D	0,05D	0,05D	0,11D	0,06D	0,04D	0,03D	0,07D	0,05D	0,02D	0,05D	0,06D
N total (%)	20,03*	11,58NC	21,40*	4,79NC	4,08NC	44,85**	20,03*	22,79*	12,78NC	2,67NC	4,43NC	78,05**	122,16**	64,48**	4,29NC
P (µg/ml suelo)	0,14NC	0,06NC	0,06NC	0,13NC	0,35NC	0,19NC	0,08NC	0,04NC	0,07NC	0,15NC	0,25NC	0,12NC	0,67**	0,07NC	0,05NC
K (meq/100 ml suelo)	3,85NC	5,24*	6,12*	5,87*	5,14*	3,49NC	3,82NC	3,68NC	5,75*	4,90*	5,30*	6,64*	4,31*	6,25*	5,90*
Ca (meq/100 ml suelo)	1,30NC	1,57NC	1,85NC	1,51NC	2,10*	0,93NC	1,99NC	1,72NC	1,45NC	1,45NC	2,12*	1,40NC	1,78NC	1,42NC	1,93NC
Mg (meq/100 ml suelo)	29,9*	20,9*	20,0*	19,0NC	14,3NC	12,4NC	0,0D	18,1NC	15,2NC	18,1NC	18,1NC	3,5NC	16,2NC	13,4NC	7,9NC
S (meq/100 ml suelo)	3,9**	10,0**	5,2**	9,9**	8,0**	8,0**	10,1**	14,1**	7,8**	7,4**	10,5**	7,3**	6,1**	4,0**	9,3**
Cu (µg/ml suelo)	1,23NC	1,40NC	0,65NC	1,60NC	1,16NC	1,13NC	1,20NC	1,13NC	1,03NC	1,17NC	1,17NC	1,90NC	1,24NC	1,29NC	1,57NC
Zn (µg/ml suelo)	6,9NC	4,8NC	7,1NC	5,1NC	4,6NC	9,9NC	4,9NC	9,9NC	3,6NC	5,3NC	4,7NC	7,9NC	3,4NC	4,5NC	7,8NC

+ = Ver Figura 2A para ubicación de las muestras  
A. = Arcilloso  
F.A. = Franco arcilloso  
D = Deficiencia del elemento  
NC = Nivel crítico  
\* = Contenido medio  
\*\* = Contenido alto

Interpretación basada en Diaz-Romeu y Hunter (1976), para cultivos en general

Continua Cuadro 3A. Profundidad 45 - 60 cm.

VARIABLE	No. MUESTRA*																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Textura	A.	A.	A.	A.	A.	A.	A.	A.	A.	F.A.L.	A.	F.A.	F.A.	A.	A.	A.		
Contenido piedras (%)	1	19	6	3	9	7	17	8	2	2	7	0	1	17	18			
Materia orgánica (%)	0,54D	0,40D	0,47D	0,33D	0,13D	0,20D	0,87D	0,20D	0,54D	0,27D	1,00D	0,0D	0,0D	0,80D	0,20D			
Acidez extraíble (meq/100 ml suelo)	0,80	0,45	0,35	0,25	0,25	0,35	0,65	0,60	0,30	0,40	0,35	0,25	0,25	0,55	0,30			
N total (%)	0,06D	0,04d	0,04d	0,04d	0,03D	0,05D	0,06D	0,04D	0,06D	0,04D	0,05D	0,02D	0,03D	0,07D	0,05D			
P (µg/ml suelo)	22,32*	17,38NC	14,00NC	5,51NC	4,79NC	19,14NC	20,03*	27,66*	4,08NC	4,08NC	3,37NC	97,96**	73,88**	37,49**	4,43NC			
K (meq/100 ml suelo)	0,06NC	0,05NC	0,09NC	0,06NC	0,21NC	0,08NC	0,05NC	0,04NC	0,15NC	0,09NC	0,16NC	0,27NC	0,22NC	0,08NC	0,07NC			
Ca (meq/100 ml suelo)	3,17NC	4,22*	5,99*	5,14*	4,87*	2,99NC	3,42NC	3,09NC	6,09*	4,10*	5,29*	5,21*	4,71*	5,54*	4,87*			
Mg (meq/100 ml suelo)	1,01NC	1,63NC	2,15NC	1,26NC	2,05*	2,08*	0,81NC	1,91NC	1,52NC	1,61NC	2,14*	1,57NC	1,97NC	1,58NC	1,91NC			
S (meq/100 ml suelo)	20,9*	25,9*	28,9*	14,3NC	11,5NC	19,0NC	12,4NC	22,9NC	16,2NC	14,3NC	14,3NC	15,2NC	17,1NC	14,3NC	16,2NC			
Cu (µg/ml suelo)	5,7**	13,2**	5,3**	8,6**	10,3**	12,2**	6,2**	18,0**	7,5**	6,5**	10,1**	7,8**	6,5**	3,3**	13,2**			
Zn (µg/ml suelo)	1,29NC	1,53NC	0,77NC	1,59NC	1,42NC	1,85NC	0,96NC	1,79NC	1,20NC	1,58NC	2,76NC	2,66NC	1,26NC	0,92NC	1,98NC			
Mn (µg/ml suelo)	4,4NC	4,2NC	6,7NC	3,5NC	4,8NC	6,7NC	5,5NC	9,0NC	3,8NC	3,2NC	9,2NC	1,4NC	3,5NC	3,1NC	4,9NC			

\* Ver Figura 2A para ubicación de las muestras

- A. = Arcilloso
- F.A. = Franco arcilloso
- F.A.L. = Franco Arcillo limoso
- D = Deficiencia del elemento
- NC = Nivel Crítico
- \* = Contenido medio
- \*\* = Contenido alto

Interpretación basada en Díaz-Romeu y Hunter (1978), para cultivos en general

Cuadro 4A. Crecimiento promedio de *C. alliodora* por densidades de evaluación durante el periodo del estudio

Medición No.	Edad (Años)	Densidad (Arb/ha)	Altura (h) (m)	IMAh (m)	dap (cm)	IMAdap (cm)	Diámetro copa (Dc) (m)	IMA Dc (m)	N (No. arb.)
1	2,4	118	5,3	-	9,9	-	1,8	-	11
		150	5,1	-	9,4	-	1,7	-	11
		196	4,8	-	7,6	-	1,5	-	12
		263	4,7	-	7,8	-	1,5	-	12
		332	4,8	-	8,4	-	1,7	-	12
2	3,0	118	6,5	-	12,0	-	4,5	-	11
		150	6,3	-	11,1	-	4,5	-	11
		196	6,0	-	9,8	-	4,0	-	12
		263	5,6	-	9,4	-	3,9	-	12
		332	5,7	-	10,4	-	4,3	-	12
3	3,4	118	7,5	-	15,5	-	5,3	-	11
		150	7,1	-	14,4	-	5,2	-	11
		196	7,2	-	13,2	-	4,7	-	12
		263	6,8	-	12,4	-	4,6	-	12
		332	7,1	-	13,3	-	4,9	-	12
4	3,9	118	8,4	2,1	17,3	4,4	5,4	1,4	11
		150	7,8	2,0	15,8	4,0	5,4	1,4	11
		196	8,0	2,0	14,7	3,7	5,0	1,3	12
		263	7,3	1,8	13,8	3,5	4,9	1,3	12
		332	7,8	1,8	14,5	3,7	4,9	1,2	12

Cuadro 5A. Modelos de regresión que describen la relación existente entre la biomasa podada de los cafetos con los diámetros o áreas basales de los tallos podados por planta de café

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	C.V. (%)	F	F1	F2
BP = 17,47 + 58,27 (DIAMBAS)	57,9	36,6	2416,3**	2416,3**	
BP = 25,70 + 55,15 (DIAMBAS) + 0,25 (DIAMBAS) <sup>2</sup>	57,9	36,6	1208,2**	2415,8**	0,6 <sup>N.S.</sup>
ln BP = 4,29 + 0,86 (DIAMBAS)	62,1	6,3	2879,2**	2879,2**	
ln BP = 2,67 + 2,22 (DIAMBAS) -0,27 (DIAMBAS) <sup>2</sup>	67,4	5,9	1815,5**	3345,4**	285,5**
ln BP = 4,02 + 1,03 (LN ARBAS)	67,9	6,7	3724,1**	3724,1**	
ln BP = 3,92 + 1,24 (LN ARBAS) -0,08 (ln ARBAS) <sup>2</sup>	68,3	6,7	1897,5**	3771,6**	23,4**

\*\* = Significativo al 1%

N.S. = No significativo

BP =  $\Sigma$  Biomasa podada de los cafetos (g M.S.) de todos los ejes podados/planta de café

DIAMBAS =  $\Sigma$  Diámetros basales (mm) de todos los ejes podados/planta de café

ARBAS =  $\Sigma$  Areas basales (mm<sup>2</sup>) de todos los ejes podados/planta de café

F, F1, F2 = Estadísticas F de Fisher para el modelo y para los coeficientes lineales y cuadráticos, respectivamente.

Cuadro 6A. Modelos de regresión que describen el rendimiento de café en grano (g M.B./planta) en función de las diferentes densidades de *E. poeppigiana* y *C. alliodora* (árboles/ha)

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	C.V (%)	F	F1	F2	F3	F4	F5
LN (REND) = 9,02 - 5,4 x 10 <sup>-4</sup> (DENERS) - 6,1 x 10 <sup>-4</sup> (DENCOS) + 2,0 x 10 <sup>-7</sup> (DENERS*DENCOS) + 2,0 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS) <sup>2</sup> - 1,5 x 10 <sup>-6</sup> (DENCOS) <sup>2</sup>	8,1	6,0	9,2**	9,5**	34,8**	0,0**	0,3**	1,4**
LN (REND) = 9,87 - 5,1 x 10 <sup>-3</sup> (DENERS) - 4,8 x 10 <sup>-3</sup> (DENCOS) + 5,5 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS*DENCOS) + 1,2 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS) <sup>2</sup> + 3,7 x 10 <sup>-6</sup> (DENCOS) <sup>2</sup>	14,9	5,8	18,4**	10,9**	72,5**	1,4**	5,7*	1,3**
LN (REND) = 8,96 + 1,6 x 10 <sup>-3</sup> (DENERS) - 1,2 x 10 <sup>-3</sup> (DENCOS) + 1,4 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS*DENCOS) - 7,3 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS) <sup>2</sup> - 1,1 x 10 <sup>-6</sup> (DENCOS) <sup>2</sup>	22,4	5,5	30,3**	17,7**	116,8**	4,6*	1,0**	11,5**
LN (REND) = 10,42 - 7,6 x 10 <sup>-3</sup> (DENERS) - 5,2 x 10 <sup>-3</sup> (DENCOS) + 2,2 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS*DENCOS) + 7,2 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS) <sup>2</sup> - 6,4 x 10 <sup>-6</sup> (DENCOS) <sup>2</sup>	24,3	5,5	33,9**	0,2**	159,0**	7,0**	0,2**	2,8**
LN (REND) = 11,62 - 3,2 x 10 <sup>-2</sup> (DENERS) - 9,3 x 10 <sup>-3</sup> (DENCOS) + 3,3 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS*DENCOS) + 6,8 x 10 <sup>-6</sup> (DENERS) <sup>2</sup> + 8,0 x 10 <sup>-7</sup> (DENCOS) <sup>2</sup>	43,7	12,4	16,6**	23,7**	44,6**	11,9**	2,7**	0,1**

\*\* = Significativo al 1%

\* = Significativo al 5%

N.S. = No significativo

REND = Rendimiento total de café en grano por planta para los 4 periodos de cosecha  
 DENERS = DENSIDAD = Densidades circulares de *E. poeppigiana* con radios de 5 - 15 m.  
 DENCOS = DENSIDAD = Densidades circulares de *C. alliodora* con radios de 5 - 15 m.  
 DENERS \* DENCOS = Densidades de *E. poeppigiana* estimadas a través de los polígonos regulares  
 DENCOS \* DENERS = Densidades de *C. alliodora* estimadas a través de los polígonos regulares  
 F, F1, F2, F3, F4, F5 = Estadísticas F de Fisher para el modelo y para los coeficientes de regresión de 1° a 5°, respectivamente.

CUADRO 7A. Correlaciones entre el logaritmo natural del rendimiento del café, densidades de E. poeppigiana y C. alliodora, diámetro de copa y diámetros basales de los cafetos (medidos en 1985), cosecha precoz 84-85 y pedregosidad del sitio

	LNREND	DENER	DENCO	DIAMCOPA	DIAMBAS	COS8485	PEDR
LNREND	1,00	-0,50	0,29	0,40	0,43	0,15	-0,03
DENER		1,00	-0,11	0,08	-0,06	-0,07	0,06
DENCO			1,00	-0,11	-0,12	0,21	0,55
DIAMCOPA				1,00	0,36	0,33	0,03
DIAMBAS					1,00	0,25	0,00
COS8485						1,00	0,19
PEDR							1,00

- REND = Rendimiento total de café para los tres últimos períodos de cosecha (g MS/planta)
- DENER y DENCO = Densidades de ambas especies forestales estimadas a través de los polígonos regulares
- DIAMCOPA = Diámetro de copa por planta de café (m) medido en febrero de 1985
- DIAMBAS =  $\Sigma$  Diámetros basales de los ejes de cada planta medidos a 10 cm sobre el suelo en febrero de 1985
- COS8485 = Cosecha precoz del período 84-85 (g MS/planta)
- PEDR = Porcentaje de pedregosidad del sitio

Cuadro 8A. Correlaciones entre el rendimiento del café, las densidades de sombra de E. poeppigiana y C. alliodora, y todas las variables del suelo tomadas a 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm de profundidad.

Profun- didad	MO	N	P	K	Ca	Mg	Ac	Cu	Zn	Mn	S	
0 - 15	LNREND	0,13n.e.	0,03n.e.	-0,24*	-0,18n.e.	-0,33**	-0,23*	0,10n.e.	0,21*	0,03n.e.	-0,03n.e.	0,08n.e.
	DENER	-0,42**	-0,46**	-0,57**	-0,14n.e.	-0,55**	-0,33**	-0,32**	-0,46**	-0,50**	-0,46**	-0,06n.e.
	DENCO	-0,17n.e.	0,09n.e.	-0,14n.e.	0,09n.e.	0,21*	0,57**	-0,44**	-0,31**	-0,23*	-0,33*	-0,07n.e.
15 - 30	LNREND	0,16n.e.	0,10n.e.	-0,26**	-0,37**	-0,31**	-0,12n.e.	0,37**	-0,32**	0,00n.e.	-0,16n.e.	0,09n.e.
	DENER	-0,03n.e.	-0,21*	-0,68**	-0,38**	-0,57**	0,32**	-0,05n.e.	-0,47**	-0,40**	-0,58**	0,02n.e.
	DENCO	-0,30**	-0,04n.e.	-0,04n.e.	0,08n.e.	0,23*	0,47**	-0,16n.e.	0,16n.e.	-0,12n.e.	-0,11n.e.	-0,03n.e.
30 - 45	LNREND	0,14n.e.	0,04n.e.	-0,08n.e.	-0,14n.e.	0,47**	0,40**	-0,19*	0,01n.e.	0,26**	-0,28**	0,06n.e.
	DENER	-0,30**	-0,12n.e.	0,51**	0,26**	0,40**	-0,15n.e.	0,00n.e.	-0,23*	0,44**	-0,19*	-0,25**
	DENCO	-0,24**	0,19*	-0,10n.e.	-0,10n.e.	-0,15n.e.	0,38**	0,18*	-0,01n.e.	0,04n.e.	0,32**	-0,37**
45 - 60	LNREND	0,15n.e.	-0,13n.e.	-0,13n.e.	0,12n.e.	-0,20*	-0,03n.e.	-0,03n.e.	-0,14n.e.	0,20*	-0,17n.e.	0,04n.e.
	DENER	0,04n.e.	-0,04n.e.	-0,04n.e.	0,49**	0,08n.e.	-0,25**	-0,25**	-0,20*	0,33**	-0,22*	-0,30**
	DENCO	-0,06n.e.	0,30**	0,30**	-0,27**	0,21*	-0,04n.e.	-0,04n.e.	0,19*	-0,22*	0,11n.e.	-0,18n.e.

REND = Rendimiento total de café (g M.S./planta)

DENER Y DENCO = Densidades de ambas especies forestales estimadas a través de los polígonos regulares

\* = Significativo al 5%

\*\* = Significativo al 1%

Cuadro 9A. Modelos de regresión que describen el rendimiento de café en grano (g M.S./planta) en función de las densidades de E. Poeppigiana y C. alliodora (árboles/ha), y todas las covariables seleccionadas.

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	R=AJ (%)	C.V. (%)	F	F1	F2	F3	F4	FS	F6	F7	F8	F9	F10	F11
LN (REND) = 10,37 - 0,03 (DENER) - 1,7 x 10 <sup>-5</sup> (DENCO) + 4,1 x 10 <sup>-5</sup> (DENER * DENCO) + 5,97 x 10 <sup>-5</sup> (DENER) + 1,6 x 10 <sup>-5</sup> (DENCO) + 3,7 x 10 <sup>-4</sup> (COS8485) + 0,01 (DIAMCOFA) + 0,02 (DIAMBAS) + 0,13 (Cad5) - 0,03 (Mg30) + 0,11 (Mnd5)	60,5	56,1	10,8	13,8**	22,2**	67,6**	15,9**	3,7N.P.	0,1N.P.	15,3**	13,4**	4,5**	0,2N.P.	2,5N.P.	5,8*
LN (PEND) = 8,88 - 0,02 (DENER) - 0,01 (DENCO) + 2,5 x 10 <sup>-5</sup> (DENER * DENCO) + 4,3 x 10 <sup>-5</sup> (DENER) + 2,4 x 10 <sup>-5</sup> (DENCO) + 4,0 x 10 <sup>-4</sup> (COS8485) + 0,01 (DIAMCOFA) + 0,02 (DIAMBAS)	57,1	54,7	11,1	16,9**	21,1**	64,1**	15,1**	3,6N.P.	0,1N.P.	14,5**	12,7**	4,3*			
LN (REND) = 9,26 - 0,02 (DENER) - 0,01 (DENCO) + 2,9 x 10 <sup>-5</sup> (DENER * DENCO) + 3,8 x 10 <sup>-5</sup> (DENER) + 2,4 x 10 <sup>-5</sup> (DENCO) + 5,4 x 10 <sup>-4</sup> (AREAS)	60,4	58,1	7,8	26,4**	28,9**	63,0**	18,2**	3,5N.P.	0,1N.P.	44,6**					

REND = Rendimiento total de café en grano por planta  
 DENER y DENCO = Densidades de ambas especies forestales estimadas a través de los polígonos regulares  
 COS8485 = Cosecha precoz del grano (g M.S./planta) obtenida en el periodo 84-85.  
 DIAMCOFA = Diámetro de copa por planta de café (m) medido en 1985  
 DIAMBAS = Diámetros basales de los ejes de cada planta medidos a 10 cm sobre el suelo en 1985 (mm)  
 AREAS = Sumatoria de las Áreas basales de los ejes de cada planta (mm) medidas en 1985  
 Cad5 = Niveles de fertilidad del calcio medidos a una profundidad de 30-45 cm  
 Mg30 = Niveles de fertilidad del magnesio medidos a una profundidad de 15-30 cm  
 Mnd5 = Niveles de fertilidad del manganeso medidos a una profundidad de 30-45 cm  
 F, F1-F11 = Estadísticas F de Fisher para el modelo y para cada coeficiente en el orden respectivo en que aparece en el modelo.

Cuadro 10A. Modelos de regresión de mejor ajuste entre el rendimiento del café (g M.S./planta), los diferentes índices de competencia y la covariable Área basal

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	C.V. (%)	F	F <sup>1</sup>	F <sup>2</sup>	F <sup>3</sup>	F <sup>4</sup>	F <sup>5</sup>	F <sup>6</sup>
LN (REND) = 7,17993638 + 0,17996292 (IC <sub>1</sub> ER) -0,13212135 (IC <sub>1</sub> CO) + 0,07759133 (IC <sub>1</sub> ER X IC <sub>1</sub> CO) - 0,1068877 (IC <sub>1</sub> ER) <sup>2</sup> - 0,99706341 (IC <sub>1</sub> CO) <sup>2</sup> + 0,00030242 (ARBAS)	29,86	5,12	22,63**	0,18N.p.	58,26**	0,26N.p.	0,46N.p.	1,5N.p.	75,13**
LN (REND) = 7,963414 - 0,0000836 (IC <sub>2</sub> ER) -0,0080033 (IC <sub>2</sub> CO) + 0,00 (IC <sub>2</sub> ER) <sup>2</sup> + 0,0000082 (IC <sub>2</sub> CO) <sup>2</sup> + 0,00029478 (ARBAS)	34,26	4,96	27,71**	18,57**	42,93**	20,13**	3,21N.p.	0,07N.p.	81,32**

IC<sub>1</sub> ó IC<sub>2</sub> = Índices de competencia de E. Poeppigiana ó C. alliodora estimados en base a un radio de 9 m (ver Cuadro 3)  
ARBAS = Sumatoria de las áreas basales de los ejes de cada café (mm)

Cuadro 11A. Modelos de regresión que describen la relación existente entre el rendimiento de los cafetos y las cantidades de horas sombra recibidas por los mismos en el período de cosecha de 1987 (julio-diciembre).

Modelo	$R^2$ (%)	R2AJ (%)	C.V. (%)	F
REN = 2925,0043 - 15,3249 (HSOM)	5,56	4,77	56,03	7,06**
ln REN = 8,3257 - 0,2433 (ln HSOM)	9,88	9,13	9,42	13,16**

REN = Rendimiento por planta de café (g peso fresco)

HSOM = Sumatoria de horas sombra recibidas por cafeto

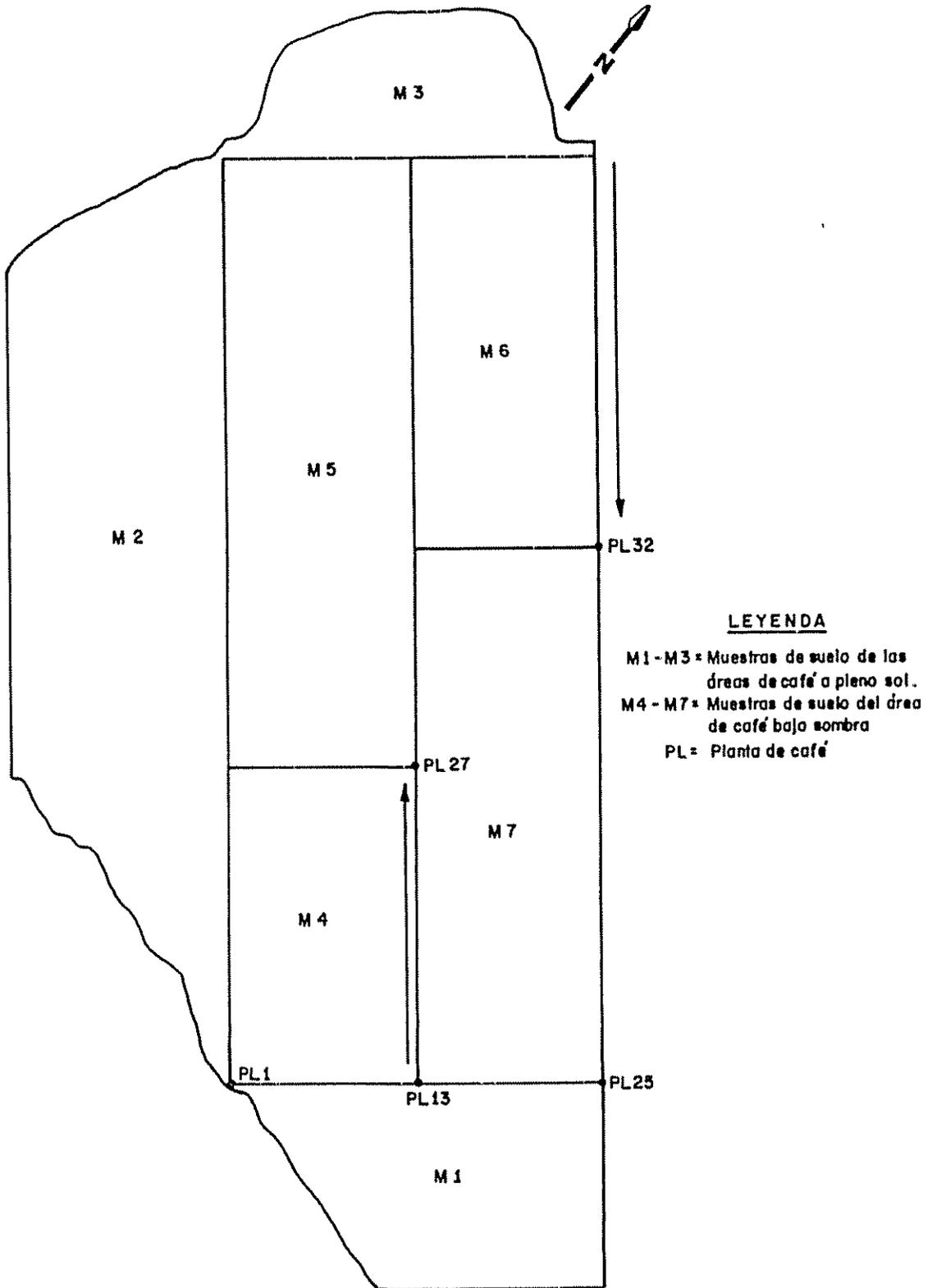


Figura 1A Croquis del área correspondiente a cada muestra de suelo tomada durante el establecimiento del ensayo

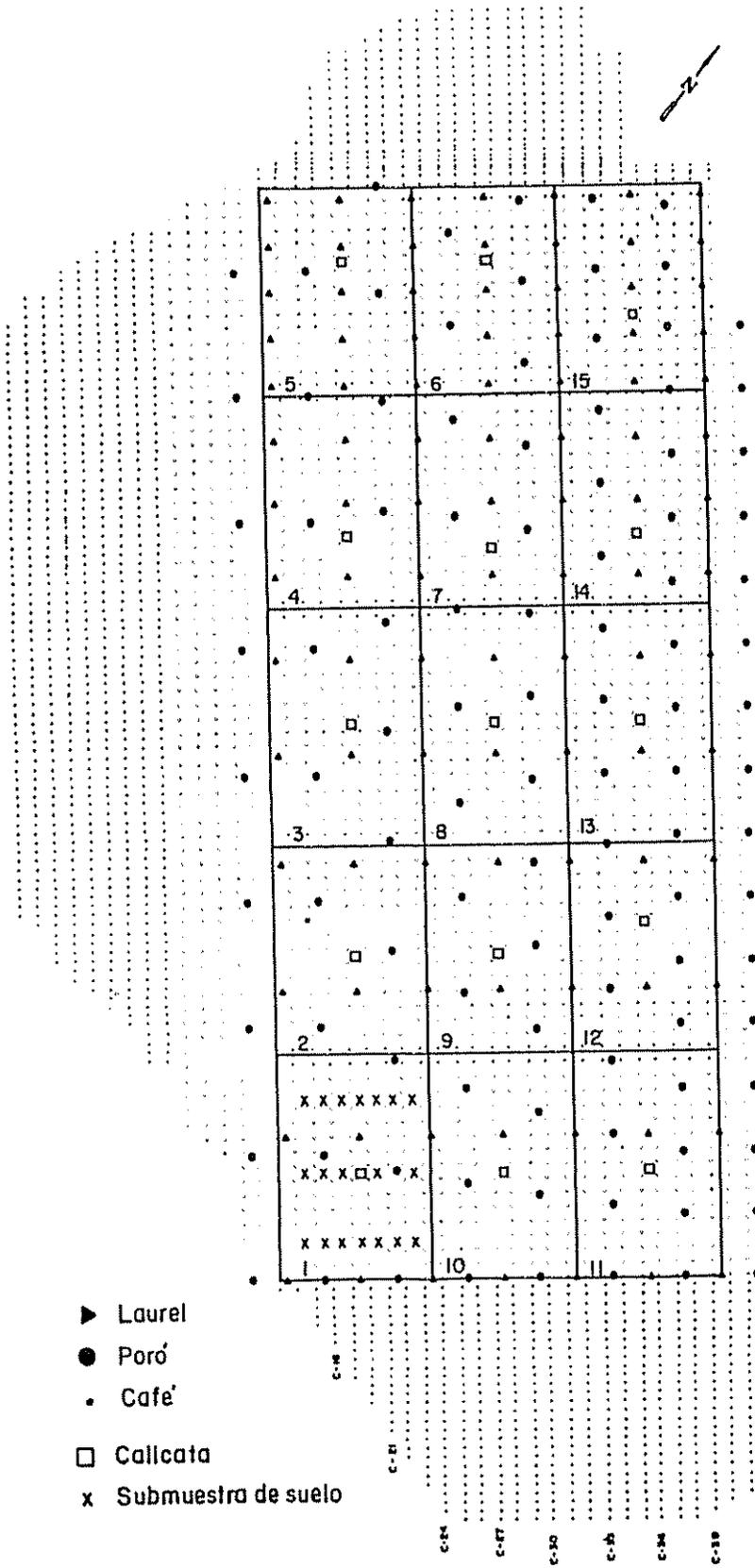


Figura 2A Ubicación de las calicatas y los sitios donde se tomaron las submuestras de suelo por subparcela del área de café bajo sombra

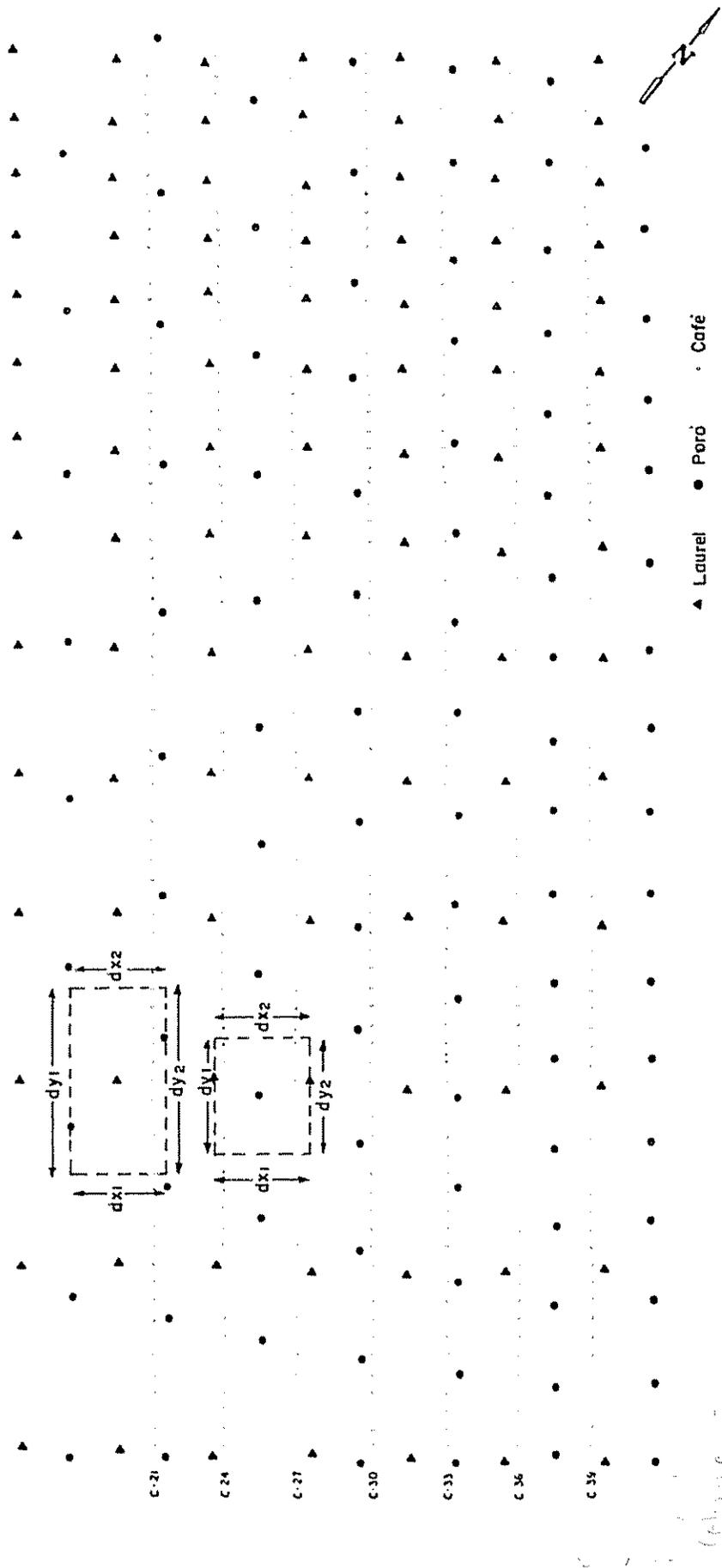


Figura 3A Esquema representativo de la determinación del área disponible por árbol por el método de polígonos regulares

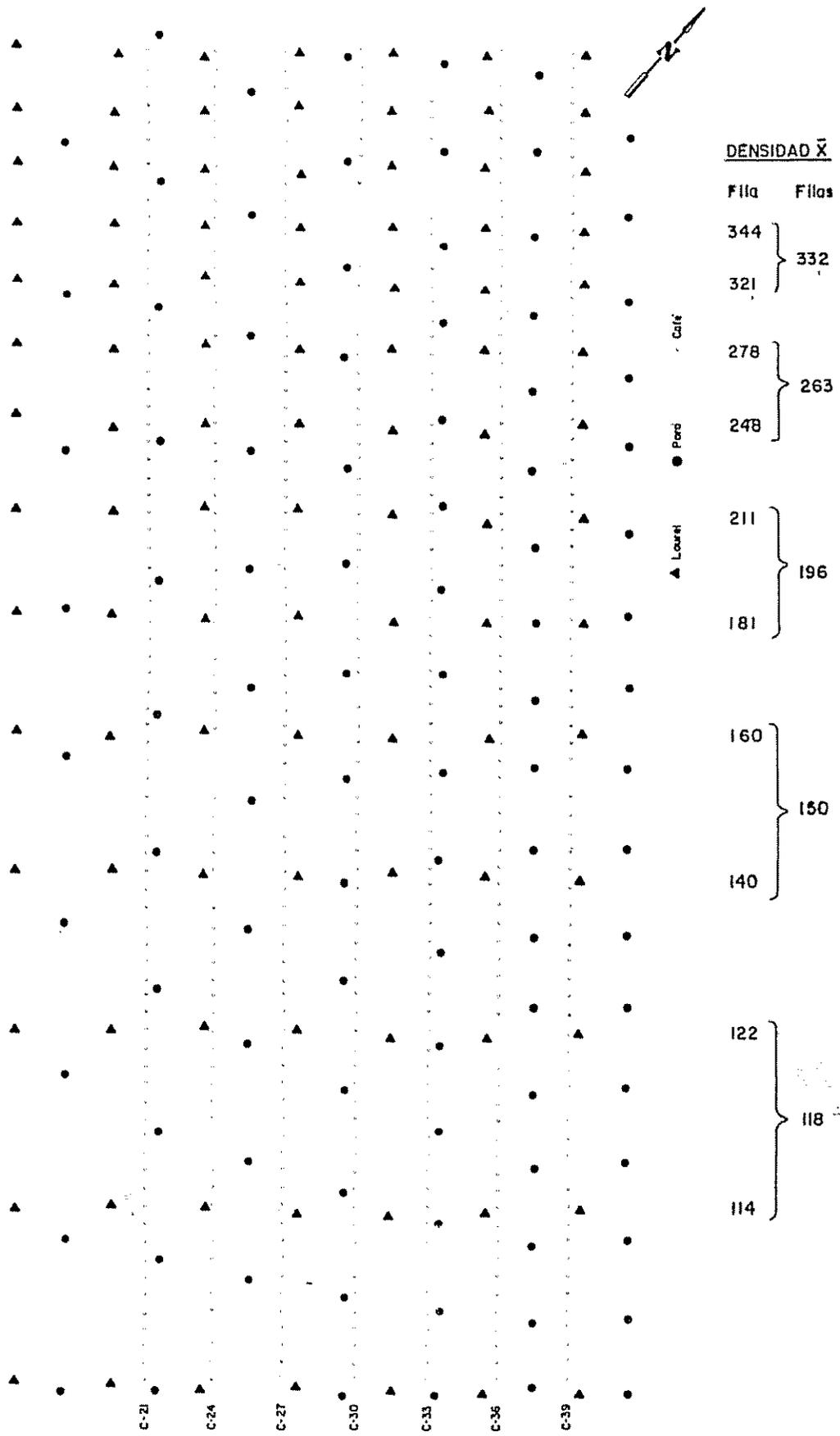


Figura 4A Densidades promedio por cada fila de árboles de C. alliodora (árboles/ha) y por filas de densidades similares

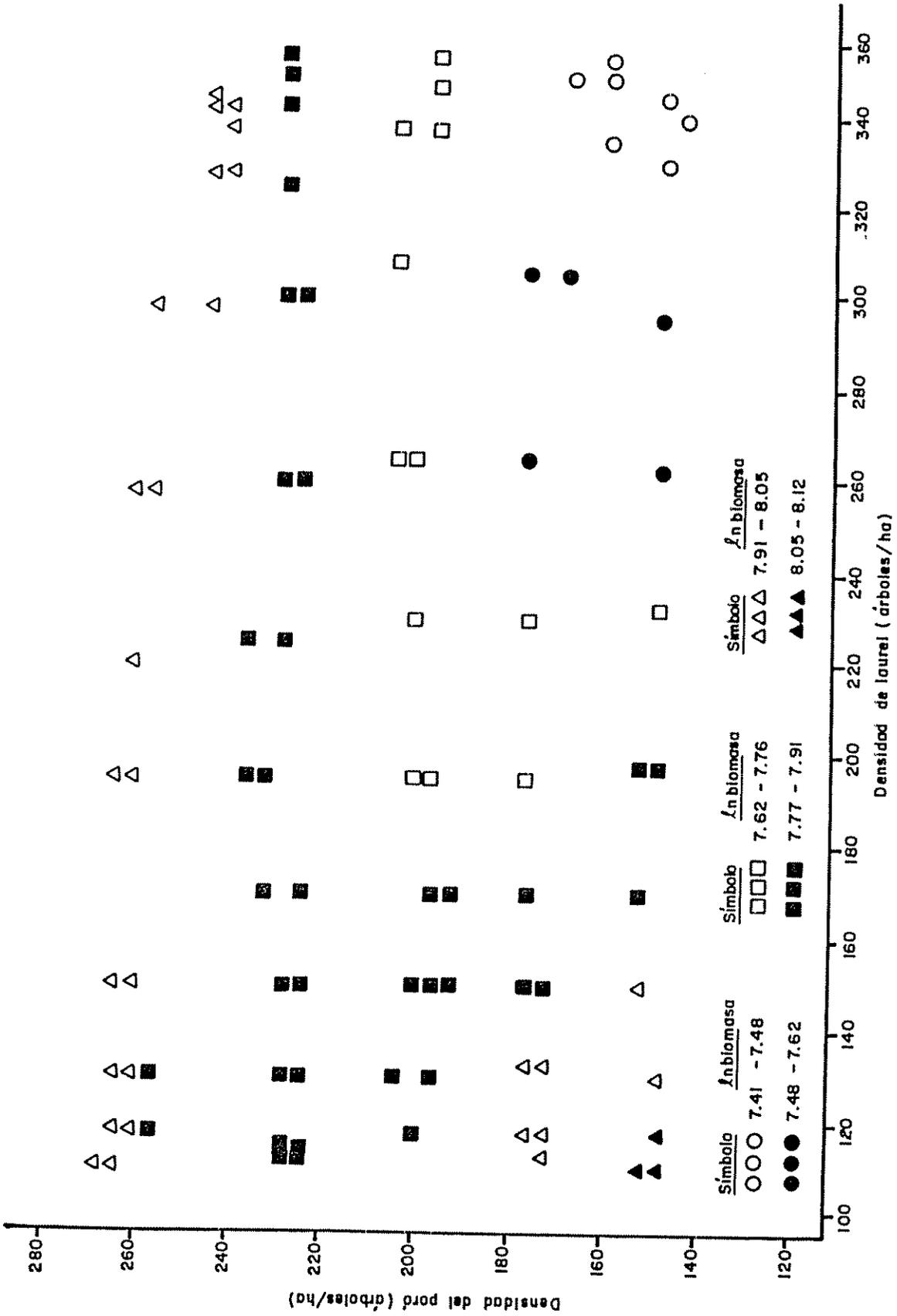


Figura 5A Predicción de la biomasa total del café (tallos+hojas) en función de las densidades de sombra

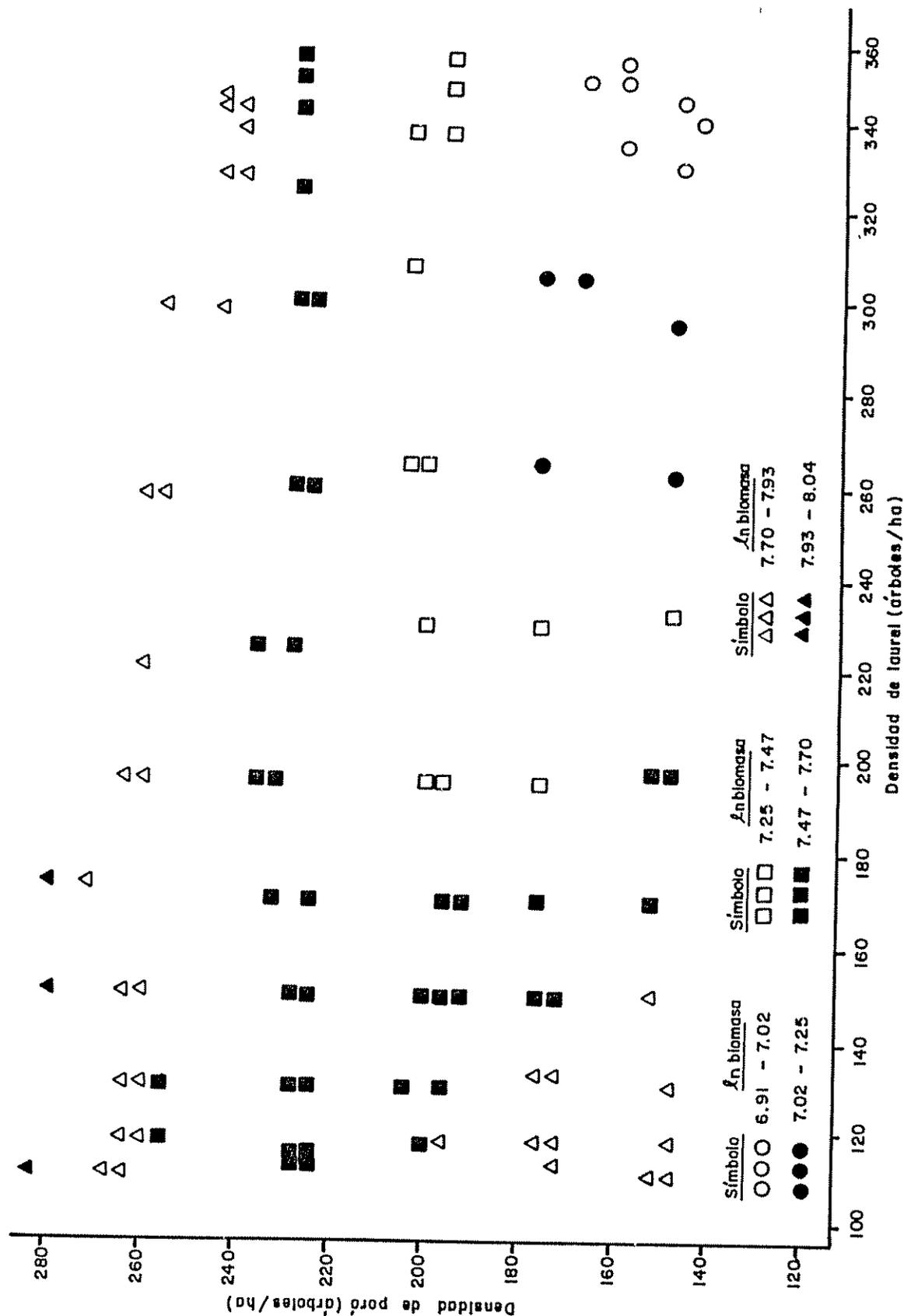


Figura 6A Predicción del rendimiento del café en función de las densidades de poró y laurel

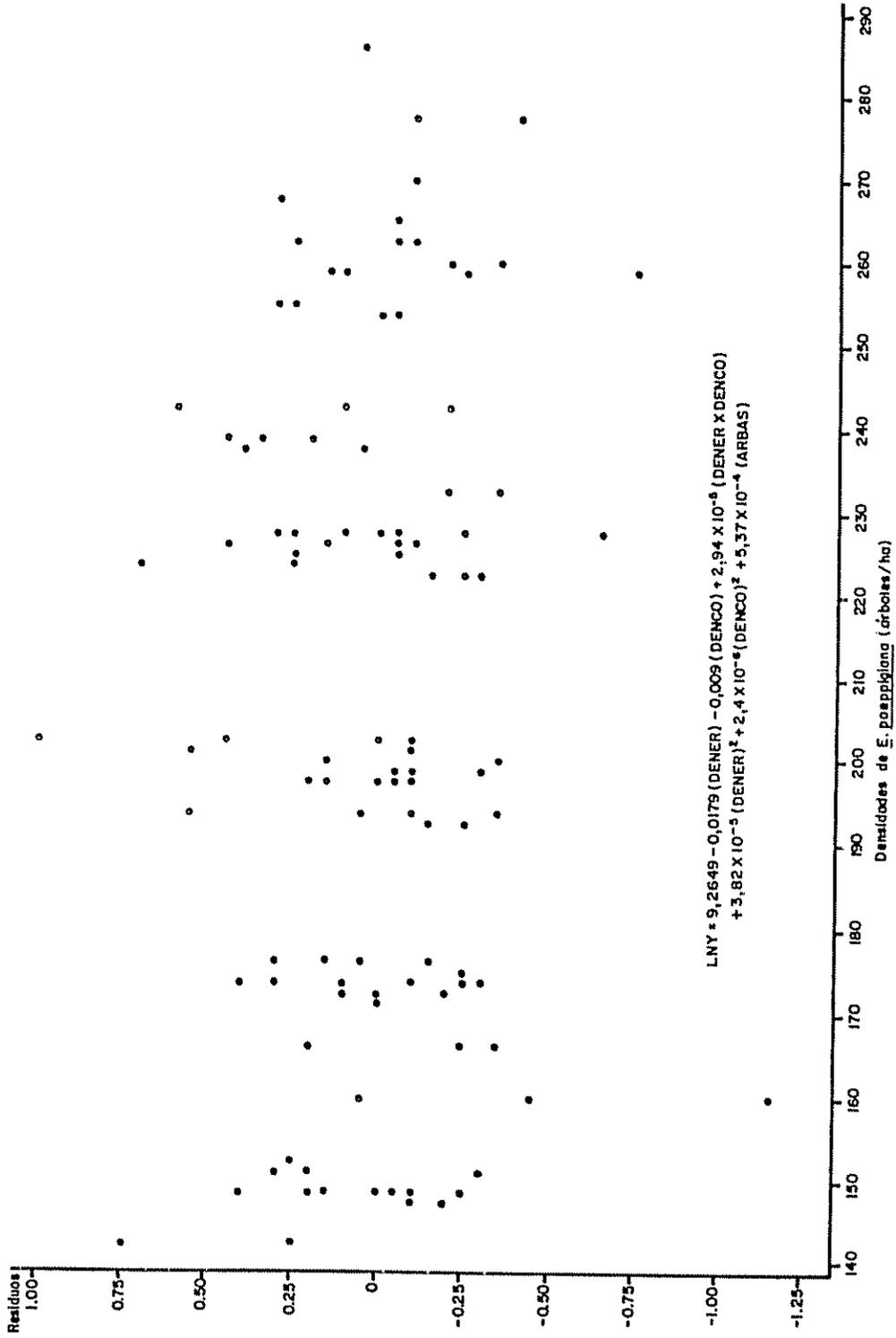


Figura 7A Gráfico de los residuos del error del modelo de regresión del rendimiento de café contra las densidades de *E. poeppigiana*

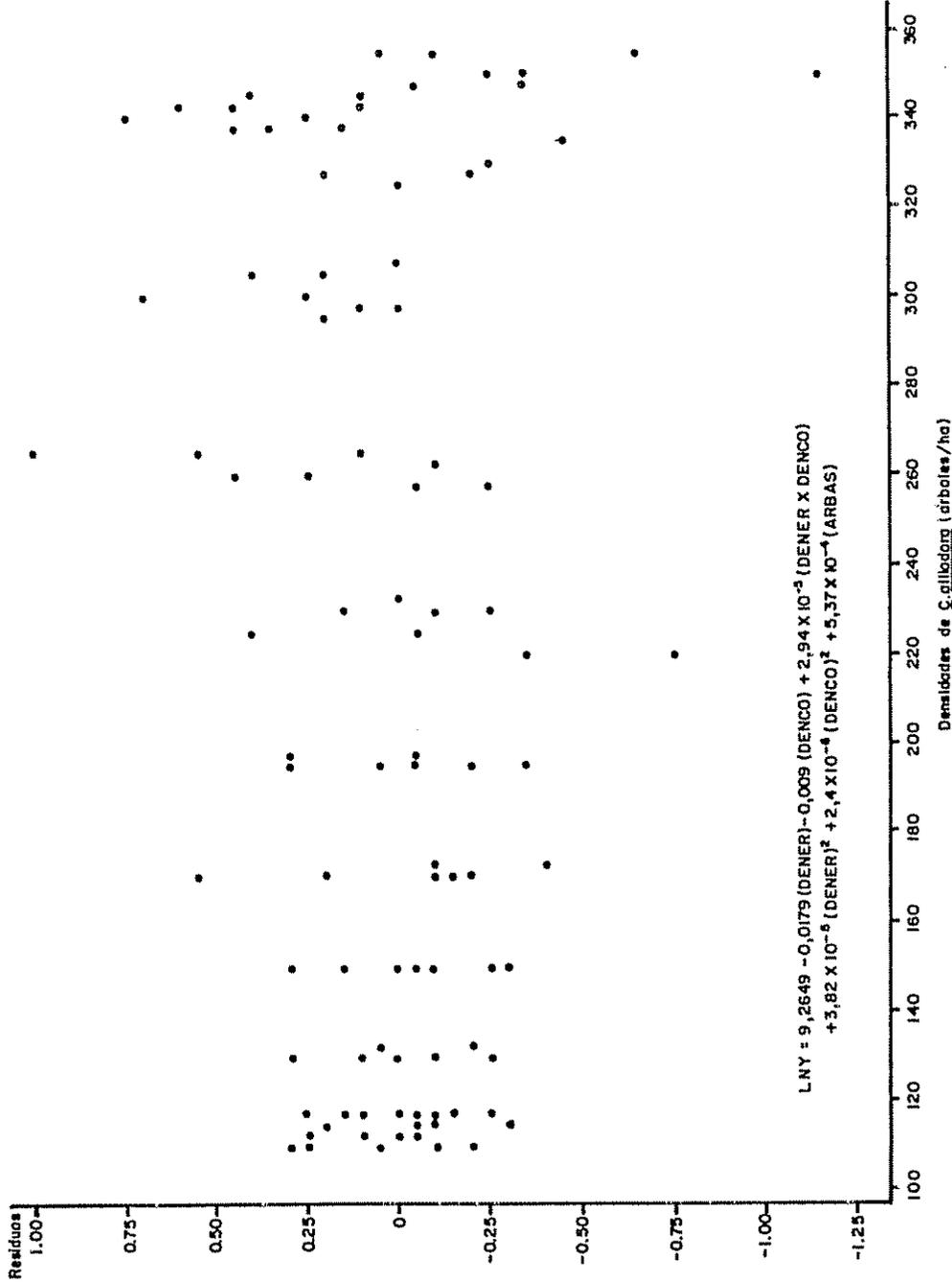


Figura 8A Gráfico de los residuos del error del modelo de regresión del rendimiento de café contra las densidades de *C. alliodora*

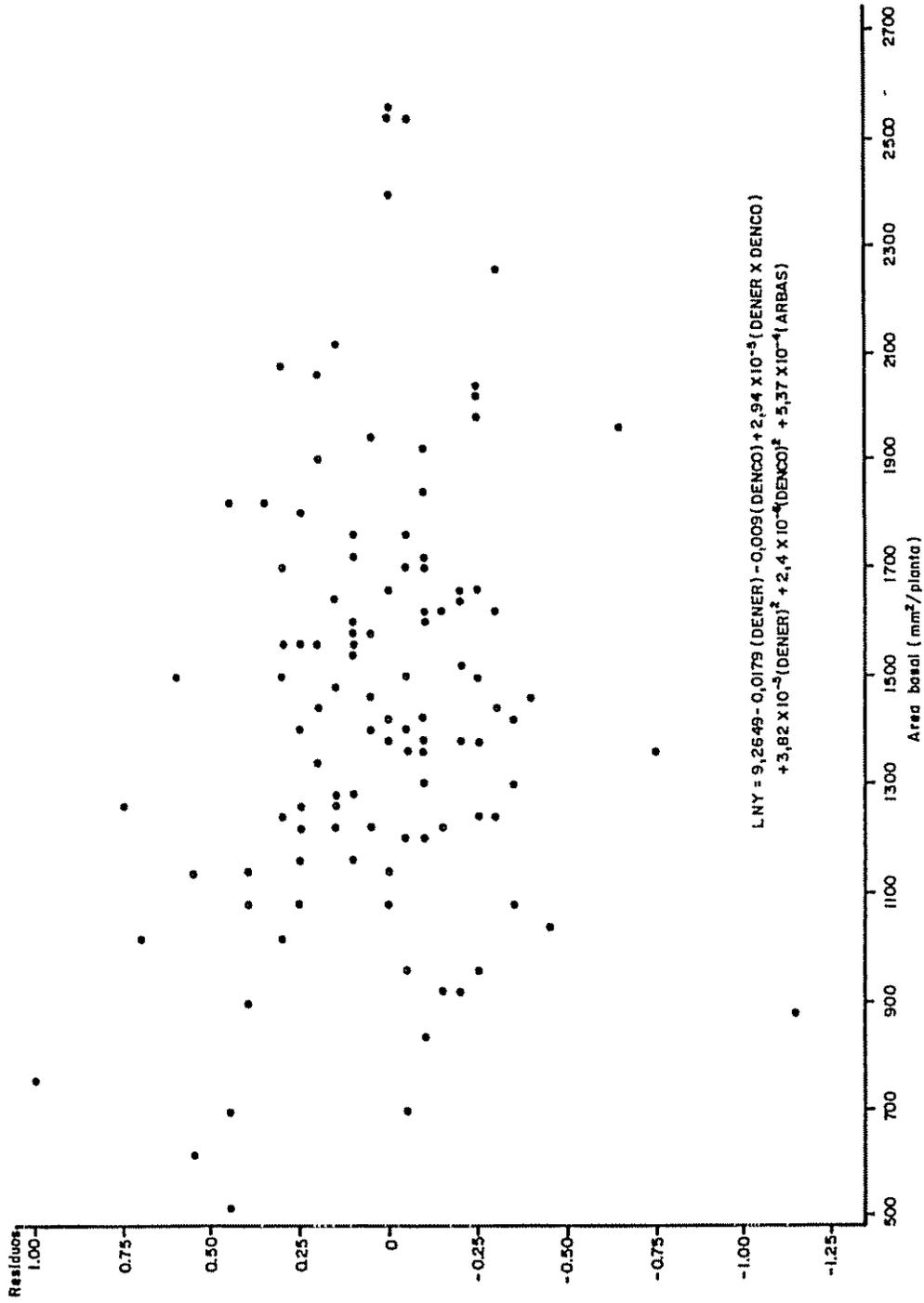


Figura 9A Gráfico de los residuos del modelo de regresión del rendimiento de café contra las áreas basales de los cafetos

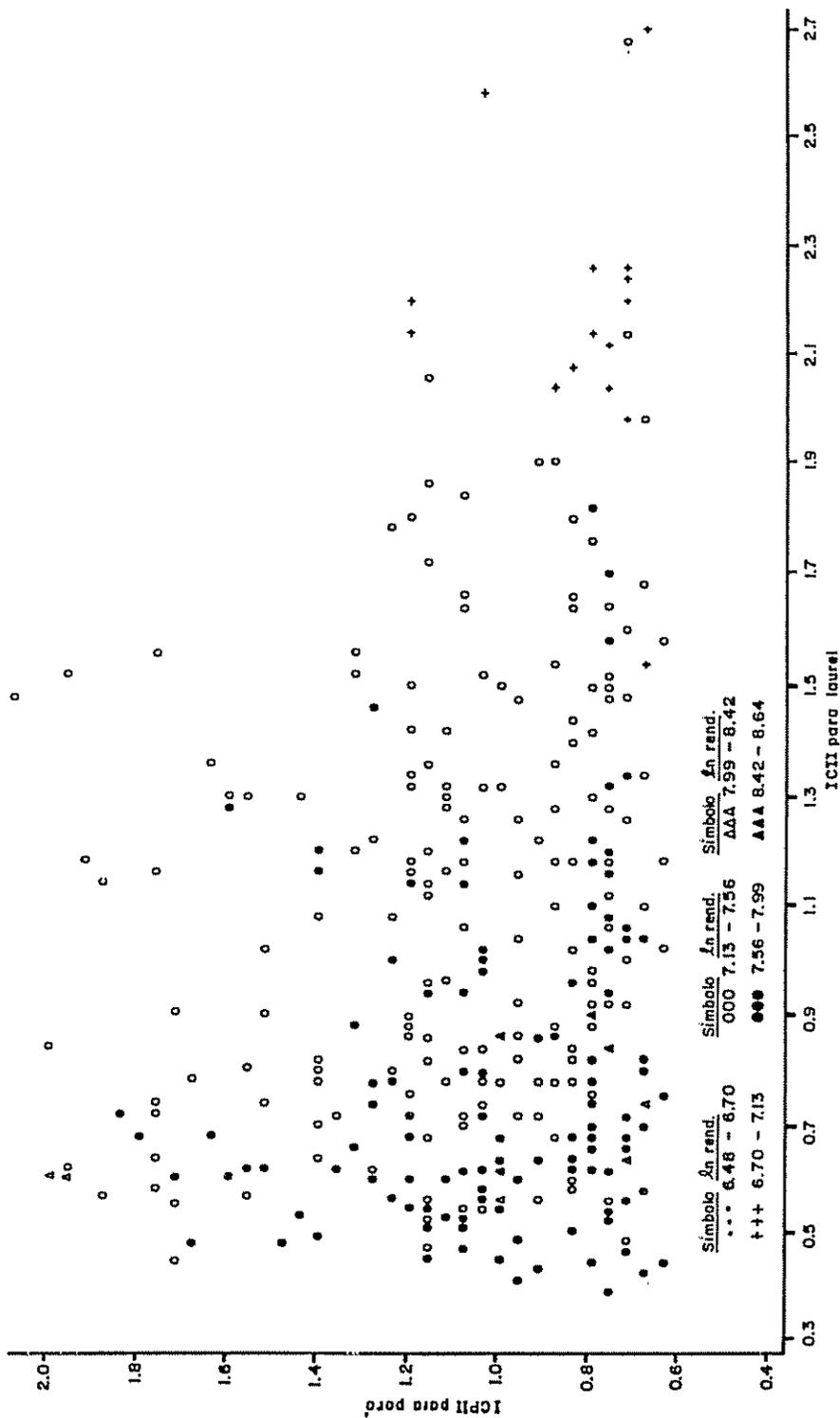


Figura 10A Predicciones del rendimiento del café en función del índice de competencia II

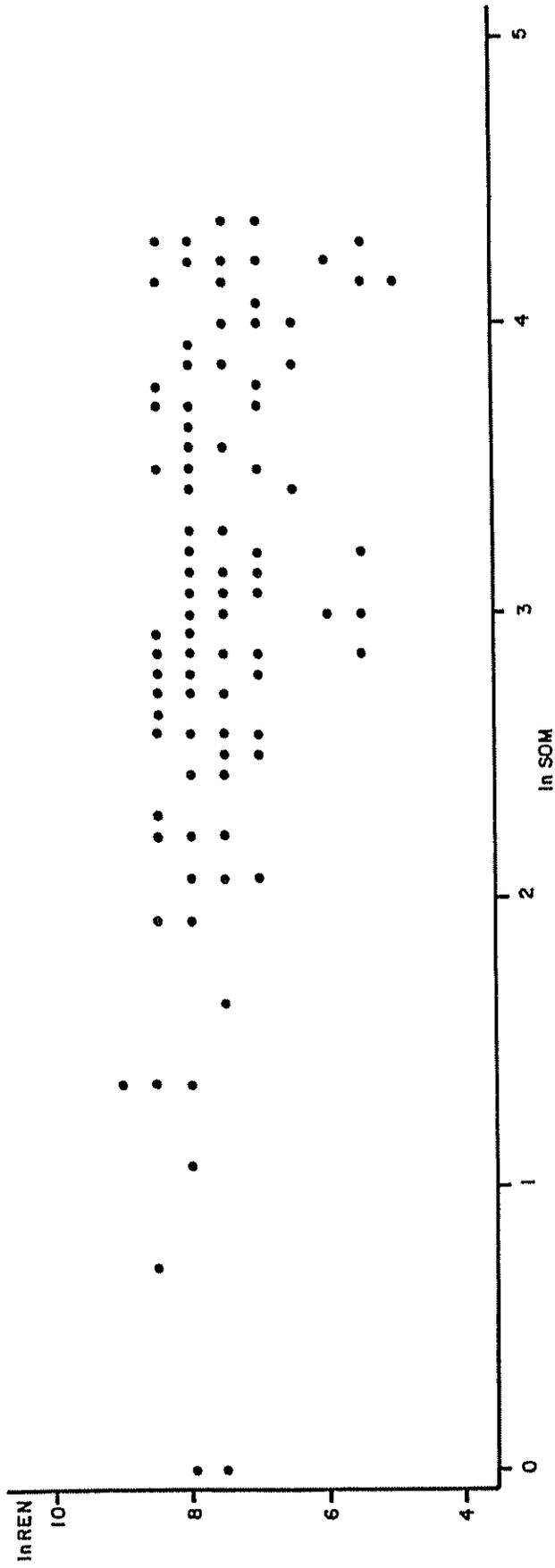


Figura 11 A Relación logarífmica entre el rendimiento de los cafetos y las cantidades de horas sombra recibidas por los mismos

## B. ANEXOS

ANEXO 1. Programa en SAS para el cálculo de las densidades circulares de laurel (C. alliodora) y poró (E. piceppigiana) para cada cafeto, utilizando radios de 5, 7, 10, Y 15 m.

```

DATA A; *SECCION PARA DENSIDADES DE LAUREL;

CMS FILEDEF UNO DISK DATA A; *ARCHIVO CON COORD DE LOS
                                CAFETOS;
CMS FILEDEF DOS DISK LAUREL DATOS A; *ARCHIVO CON COORD DE
                                LAUREL;
CMS FILEDEF TRES DISK DEN LAUREL A (LRECL 128 RECFM F BLOCK
128;

ARRAY C(*)C1-C336 *ARREGLO PARA LOS NOS. DE CALLE;
ARRAY P(*)P1-P336; *ARREGLO PARA LOS NOS. DE PLANTAS;
ARRAY XPL (*) XPL1- XPL336*ARREGLO PARA LA COORD. X DE
                                FLANTAS;
ARRAY YPL (*) YPL1-YPL336;*ARREGLO PARA LAS COORD. Y DE
                                FLANTAS;
ARRAY ANL (*) ANL1--ANL98; *ARREGLO PARAS LOS NOS. DE ARBOL
                                DE LAUREL;
ARRAY XL (*) XL1-XL98; *ARREGLO PARA LA COORD. X DE LOS
                                ARBOLES;
ARRAY YL (*) YL1-YL98; *ARREGLO PARA LA COORD. Y DE LOS
                                ARBOLES;

INFILE UNO;
DO I = 1 TO 336; *LEE LAS COORD. DE LAS 336 PLANTAS
                                DE CAFE;

    INPUT CA PL XFLA YFLA;
    C {I} = CA;
    P {I} = PL;
    XPL {I} = XFLA;
    YPL {I} = YFLA;
END;
INFILE DOS;
DO I = 1 TO 98; *LEE LAS COORD. DE LOS 84 ARBOLES
                                DE LAUREL;

    INPUT ANU XPRR YPRR;
    ANL {I} = ANU;
    XL {I} = XPRR;
    YL {I} = YPRR;
END;

```

-----  
Escrito por: Ing. Javier López, Centro de Cómputo, CATIE.  
1988

## Continúa ANEXO 1

```

FILE TRES;
DO (I) = 1 TO 336;
  CONT15 = 0;          *NUM. DE ARBOLES EN UN RADIO DE
                      15 METROS;
  CONT10 = 0;        *IDEM 10 METROS;
  CONT7 = 0;         *IDEM 7 METROS;
  CONT5 = 0;         *IDEM 5 METROS;
  DO J = 1 TO 98;
  DIS = SQRT(((XPL (I) -XL (J) )**2 + (YPL (I) -YL (J))**2));
  IF DIS <= 15 THEN
    CONT15 = CONT + 1;
  IF DIS <= 10 THEN
    CONT9 = CONT + 1;
  IF DIS <= 7 THEN
    CONT7 = CONT + 1;
  IF DIS <= 5 THEN
    CONT5 = CONT + 1;
END;

*GRABA LA IDENTIFICACION DE CADA PLANTA Y SUS DENSIDADES;
PUT C (I) 2. P (I) 3. CONT15 CONT10 CONT7 CONT5;
END;

*****          SECCION PARA DENSIDADES DE PORO;

DATA A;

CMS FILEDEF UNO DISK DATA A;          *ARCHIVO CON COORD.
                                         DE CAFE;
CMS FILEDEF DOS DISK PORO DATOS A;     *ARCHIVO CON COORD.
                                         DE PORO;
CMS FILEDEF TRES DISK DEN PORO A (LRECL 128 RECFM F BLOCK
128;

ARRAY C (*) C1-C336;
ARRAY P (*) P1-P336;
ARRAY XPL (*) XPL1- XPL336;  *IDENTIFICA A LA SECCION DE
                              LAUREL;
ARRAY YPL (*) YPL1-YPL336;  *PERO CON SOLO 97 ARBOLES DE
                              PORO;

ARRAY AB (*) AB1-AB97;
ARRAY XP (*) XPR1-YPR97;
ARRAY YP (*) YPR1 - YPR97;

```

## Continúa ANEXO 1

```

INFILE UNO;
DO I = 1 TO 336;                                *LEE LAS COORDENADAS DE LOS
                                                CAFETOS;

  INPUT CA PL XPLA YPLA;
  C {I} = CA;
  P {I} = PL;
  YPL {I} = XPLA;
  YPL {I} = YPLA;
END;

INFILE DOS;
DO I = 1 TO 98;                                  *LEE LAS CORDENADAS DE LOS
                                                ARBOLES FORO;

  INPUT ANU XPRR YPRR;
  AB {I} = ANU;
  XP {I} = XPRR;
  YP {I} = YPRR;
END;
DO I = 1 TO 336;                                  *CALCULA LAS DENSIDADES
                                                CIRCULARES DEL;
                                                *FORO PARA CADA PLANTA DE
                                                CAFE;

  CONT15 = 0;
  CONT10 = 0;
  CONT7 = 0;
  CONT5 = 0;
  DO J = 1 TO 97;
  DIS = SQRT(((XPL{I} -XP {J} )**2 + ( YPL {I} -YP {J} )**2));
  IF DIS <= 15 THEN
    CONT15 = CONT15 + 1;
  IF DIS <= 10 THEN
    CONT10 = CONT10 + 1;
  IF DIS <= 7 THEN
    CONT7 = CONT7 + 1;
  IF DIS <= 5 THEN
    CONT5 = CONT5 + 1;
  END;
END;

FILE TRES;

*GRABA LAS DENSIDADES DE FORO DE CADA PLANTA DE CAFE;
PUT C {I} 2. P {I} 3. CONT15 CONT10 CONT7 CONT5;

END;

```

ANEXO 2. Programa en SAS para el cálculo de los índices de competencia entre C. arabica, E. paeppigiana y C. alliodora utilizando radios de 5, 7 y 9 m.

```

DATA A; *LAUREL;
CMS FILEDEF UNO DISK PLANTAS DATA A;
CMS FILEDEF DOS DISK DAPDEN LAUREL A;
CMS FILEDEF TRES DISK COMPET LAUREL A (LRECL 128 RECFM F
BLOCK 128;
ARRAY C (*) C1-C336;
ARRAY F (*) F1-F336;
ARRAY XPL (*) XPL1-XPL336;
ARRAY YPL (*) YPL1-YPL336;
ARRAY ANL (*) ANL1-ANL84;
ARRAY XL (*) XL1 -XL84;
ARRAY YL (*) YL1-YL84;
ARRAY DAP (*) DAP1-DAP84;
ARRAY DENL (*) DENL1-DENL84;
INFILE UNO;
DO I = 1 TO 336;
  INPUT CA PL XPLA YPLA;
  C {I} = CA;
  F {I} = PL;
  XPL {I} = XPLA;
  YPL {I} = YPLA;
END;
INFILE DOS;
DO I = 1 TO 84;
  INPUT ANU XPRR YPRR DENS DIA;
  ANL {I} = ANU;
  XL {I} = XPRR;
  YL {I} = YPRR;
  DENL {I} = DENS;
  DAP {I} = DIA;
END;
FILE TRES;
DO I = 1 TO 336;
  COMI9 = 0;
  COMIII9 = 0;
  COMI7 = 0;
  COMIII7 = 0;
  COMI5 = 0;
  COMIII5 = 0;
  DO J = 1 TO 84;

```

-----

Escrito por: Ing. Javier López, Centro de Cómputo, CATIE.  
1988

## Continúa ANEXO 2

```

DIS = SQRT(((XPL (I) -XL (J) )**2 + (YPL (I) -YL (J) )**2));
  IF DIS <= 9 THEN DO;
    COMI9 = COMI9 + 1/DIS;
    COMIII9 = COMIII9 + DAP (J) /(DIS);
  END;
IF DIS <= 7 THEN DO;
  COMI7 = COMI7 + 1/DIS;
  COMIII7 = COMIII7 + DAP (J) /(DIS);
END;
IF DIS <= 5 THEN DO;
  COMI5 = COMI5 + 1/DIS;
  COMIII5 = COMIII5 + DAP (J)/(DIS);
  END;
  END;

PUT C (I) 2. F (I) 3. COMI9 5.2 COMI7 5.2 COMI5 5.2
      COMIII9 7.2 COMIII7 7.2 COMIII5 7.2;

END;
DATA A; *FORO;
CMS FILEDEF UNO DISK PLANTAS DATA A;
CMS FILEDEF DOS DISK DENBIOM FORO A;
CMS FILEDEF TRES DISK COMPET FORO A (LRECL 128 RECFM F BLOCK
128;
ARRAY C (*) C1-C336;
ARRAY F (*) F1-F336;
ARRAY XPL (*) XPL1-XPL336;
ARRAY YPL (*) YPL1-YPL336;
ARRAY AB (*) AB1-AB68;
ARRAY XP (*) XPR1-XPR68;
ARRAY YP (*) YPR1-YPR68;
ARRAY BIOM (*) BIOM1-BIOM68;
ARRAY DENP (*) DENP1-DENP68;
INFILE UNO;
DO I = 1 TO 336;
  INPUT CA PL XPLA YPLA;
  C (I) = CA;
  F (I) = PL;
  XPL (I) = XPLA;
  YPL (I) = YPLA;
END;
INFILE DOS;
DO I 1 TO 68;
  INPUT ANU XPRR YPRR DENS BIO;
  AB (I) = ANU;
  XP (I) = XPRR;
  YP (I) = YPRR;
  DEPN (I) = DENS;
  BIOM (I) = BIO;
END;

```

## Continúa ANEXO 2

```

DO I = 1 TO 336;
  COMI9 = 0;
  COMIII9 = 0;
  COMI7 = 0;
  COMIII7 = 0;
  COMI5 = 0;
  COMIII5 = 0;
  DO J = 1 TO 68;

DIS = SQRT(((XFL {I} -XP {J})**2 + ( YFL {I} -YF {J})**2));
  IF DIS LE 9 THEN DO;
    COMI9 = COMI9 + 1/DIS;
    COMIII9 = COMIII9 + BIOM {J} /(DIS);
  END;
  IF DIS LE 7 THEN DO;
    COMI7 = COMI7 + 1/DIS;
    COMIII7 = COMIII7 + BIOM {J} /(DIS);
  END;
  IF DIS LE 7 THEN DO;
    COMI5 = COMI5 + 1/DIS;
    COMIII5 = COMIII5 + BIOM {J} /(DIS);
  END;
  END;
END;
FILE TRES;
PUT C {I} 2. F {I} 3. COMI9 6.2 COMI7 6.2 COMI5 6.2
      COMIII9 10.2 COMIII7 10.2 COMIII5 10.2;
END;

```