

ANALISIS DEL CRECIMIENTO Y EFICIENCIA FOTOSINTETICA DEL FRIJOL
(Phaseolus vulgaris L. var "Turrialba-4") CULTIVADO EN
SOLUCION NUTRITIVA

Tesis de grado
para
Magister Scientiae

Jocelyne Ascencio Chancy



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales
Turrialba, Costa Rica
Octubre, 1972

ANALISIS DEL CRECIMIENTO Y EFICIENCIA FOTOSINTETICA DEL FRIJOL
(Phaseolus vulgaris L. var 'Turrialba-4') CULTIVADO EN
SOLUCION NUTRITIVA

tesis

Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados
como requisito parcial para optar al grado

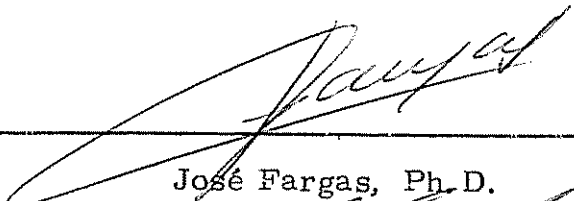
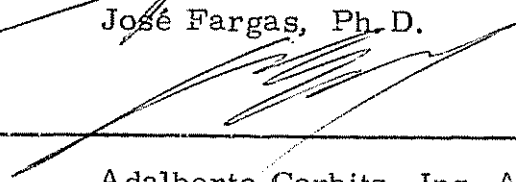
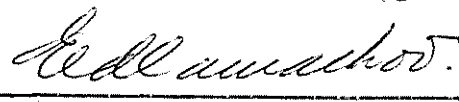

de

Magister Scientiae

en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O. E. A.

APROBADA:

 _____ José Fargas, Ph. D.	Consejero
 _____ Adalberto Gorbitz, Ing. Agr.	Comité
 _____ Edilberto Camacho, M. S.	Comité
 _____ Pablo Rosero, M. S.	Comité

Octubre, 1972

DEDICATORIA

A mi querido padre

AGRADECIMIENTO

El autor desea dejar constancia de su agradecimiento al Dr. José Fargas, Consejero Principal, por su colaboración invaluable y la orientación prestada en la realización del presente trabajo.

A los miembros del Comité, especialmente al Ing. Adalberto Gorbitz sus consejos y el interés que demostró por este trabajo.

A. Dr. Pierre Sylvain quien tuvo la amabilidad de leer y corregir el manuscrito original de esta tesis.

Al Ing. Víctor Quiroga, del Centro de Estadística y Computación del CTEI, por la eficiente colaboración en el análisis estadístico de los resultados.

Al Sr. Joaquin Salazar del Laboratorio de Fisiología Vegetal del CTEI por la ayuda prestada en la realización de los análisis químicos.

Al IICA - Zona Andina por la beca otorgada para continuar estos estudios de postgrado. Al Dr. Gilberto Páez su estímulo porque estos culminaran satisfactoriamente.

A la Srta. Lidiette Marín quien realizó el trabajo de mecanografía y al Sr. Emilio Ortiz por la realización de las gráficas.

BIOGRAFIA

Marie Jocelyne Ascencio Chancy, de nacionalidad venezolana, nació en Puerto Príncipe, Haití. Realizó sus estudios primarios, secundarios y superiores en Caracas donde, en el año 1963, obtuvo el título de Bachiller en Ciencias ingresando ese mismo año a la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela. En octubre de 1968 se graduó de Licenciado en Biología.

Durante su permanencia en la Facultad de Ciencias, desempeñó el cargo de preparador docente en Botánica y Anatomía Vegetal y de Auxiliar de Investigación en el Jardín Botánico de la Universidad Central de Venezuela. En octubre de 1968 fué contratada por la Universidad Católica Andrés Bello como profesora de la cátedra de Fisiología Vegetal en la Sección de Biología de la Escuela de Educación y, en febrero de 1969, ganó por concurso el cargo de Instructor de la cátedra de Fisiología Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela con sede en Maracay.

En setiembre de 1971 ingresó a la Escuela para Graduados del IICA, obteniendo el grado de Magister Scientiae en octubre de 1972.

Actualmente ocupa el cargo de Profesor Asistente en la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela.

CONTENIDO

	Página
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	2
2.1 Análisis del Crecimiento	2
2.1.1 Índice de Crecimiento Relativo	4
2.1.2 Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar	5
2.1.3 Índice de Asimilación Neta	5
2.1.4 Índice de Area Foliar	9
2.1.5 Razón de Peso Foliar	12
2.1.6 Razón de Area Foliar	13
2.2 Relación entre el Contenido de Nutrimientos y el Crecimiento de la planta	14
3. MATERIALES Y METODOS	19
3.1 Localización del Experimento	19
3.2 Condiciones Climáticas dentro del Invernadero	19
3.2.1 Temperatura	19
3.2.2 Humedad Relativa	19
3.2.3 Radiación Solar	19
3.2.4 Intensidad de la Luz	20
3.3 Material Vegetal Utilizado	20
3.4 Cultivo de las Plantas en Solución Nutritiva	21
3.5 Diseño Experimental	23
3.6 Análisis del Crecimiento	23
3.7 Determinación de Area Foliar	23
3.8 Resumen y clasificación de los Indices Empleados en el Experimento	24
3.8.1 Características generales del Crecimiento	24
3.8.2 Componentes Fisiológicos del Crecimiento	26
3.8.3 Componentes Morfológicos del Crecimiento	26
3.9 Toma de muestras para el Análisis Químico de la Solución Nutritiva	26

	Página
3.10 Toma de Muestras para al Análisis Químico del Mate- rial Vegetal.....	26
3.11 Análisis Químicos.....	27
3.11.1 Determinación de Nitrógeno.....	27
3.11.2 Determinación de Fósforo.....	27
3.11.3 Determinación de Azufre.....	27
3.11.4 Determinación de Potasio, Calcio y Magnesio.	27
3.12 Medición de la Absorción de Agua.....	28
3.13 Determinación de los Componentes del Rendimiento....	28
4. RESULTADOS.....	30
4.1 Condiciones Climáticas dentro del Invernadero.....	30
4.1.1 Temperatura.....	30
4.1.2 Humedad Relativa.....	30
4.1.3 Radiación Solar.....	30
4.1.4 Intensidad de luz.....	30
4.2 Características generales del Crecimiento.....	32
4.2.1 Índice de Crecimiento Relativo.....	37
4.2.2 Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar	42
4.2.3 Índice de Asimilación Neta.....	45
4.2.4 Parámetro Alfa (α).....	46
4.2.5 Razón de Peso Foliar.....	51
4.2.6 Razón de Area Foliar.....	51
4.2.7 Índice de Area Foliar.....	53
4.2.8 Area Foliar Específica (AFE).....	53
4.3 Absorción de Nutrimentos.....	55
4.3.1 Absorción de Nitrógeno.....	55
4.3.2 Absorción de Potasio y Calcio.....	57
4.3.3 Absorción de Fósforo y Magnesio.....	57
4.3.4 Absorción de Azufre.....	63
4.4 Análisis de Tejidos.....	63
4.4.1 Nitrógeno.....	63
4.4.2 Fósforo.....	63
4.4.3 Potasio.....	66
4.4.4 Calcio.....	66
4.4.5 Magnesio.....	66
4.4.6 Azufre.....	68

	Página
4.5 Relación entre la Producción de Materia Seca y la Absorción de Nutrimentos.....	68
4.6 Relación entre la Producción de Materia Seca y el Porcentaje de Nutrimentos en la Planta.....	71
4.7 Componentes del Rendimiento.....	71
4.7.1 Número de frutos por Planta.....	71
4.7.2 Número de Semillas por Fruto.....	75
4.7.3 Peso de 100 Semillas.....	75
4.7.4 Peso de Semillas por Planta.....	75
4.8 Absorción de Agua.....	77
5. DISCUSION.....	80
5.1 Relaciones entre los Indices y el Crecimiento.....	80
5.2 Relaciones entre el Crecimiento y la Nutrición Mineral	84
6. CONCLUSIONES.....	90
7. RESUMEN.....	91
7a. SUMMARY.....	93
8. LITERATURA CITADA.....	95

LISTA DE CUADROS

Cuadro No.		Página
1	Orden cronológico de las etapas del desarrollo de las plantas de frijol var 'Turrialba-4' y de algunas labores realizadas durante su ciclo de vida.	33
2	Contenido de materia seca (g) a diferentes edades y órganos de plantas de frijol var 'Turrialba-4' (valores promedio de cinco plantas)	34
3	Valores obtenidos para número de hojas por planta, contenido de materia seca en las hojas área foliar y espesor de las hojas en plantas de frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades (valores promedio de cinco plantas)	35
4	Valores calculados para los índices usados en el estudio del crecimiento y eficiencia fotosintética del frijol var 'Turrialba-4' a diferentes períodos de su crecimiento (promedios de cinco plantas)	44
5	Matriz de correlación entre los diferentes índices de crecimiento calculados para el frijol var 'Turrialba-4'.	56
6	Absorción de macroelementos en mg/planta para los diferentes períodos de crecimiento del frijol var 'Turrialba-4' (datos promedio de cinco plantas)	58
7	Porcentajes de macroelementos en base a materia seca contenidos en Raíces (R), Tallos (T), Hojas (H) y Frutos (F) de frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades (datos promedio de cinco plantas)	64
8	Matriz de correlación para índices de crecimientos y porcentajes de nutrimentos en las hojas de frijol var 'Turrialba-4'.	74
9	Componentes del rendimiento para plantas de frijol var 'Turrialba-4' cultivado en solución nutritiva (valores promedio de 28 plantas)	76
10.	Contenido de macroelementos en porciento de materia seca total y porcentajes relativos a sus valores máximos. (Se incluyen los totales de materia seca (M. S.) y sus correspondientes porcentajes relativos)	79

LISTA DE FIGURAS

Figura No.		Página
1	Curva que relaciona el ancho del foliolo central con el área foliar para el frijol var 'Turrialba-4'.....	25
2	Promedio de Temperatura, Humedad Relativa y Radiación Solar ocurridos durante el experimento. Los datos se ubican en la mitad de los períodos entre muestreos por ser valores promedio de cada período	31
3	Materia seca (g) encontrada en los órganos de las plantas de frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades.....	36
4	Peso en gramos de materia seca total encontrada en el frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades.....	38
5	Aspecto general del cultivo del frijol var 'Turrialba-4' en solución nutritiva. Edad 27 días.....	39
6	Plantas de frijol var 'Turrialba-4' comenzando a desarrollar la guía a los 27 días de edad.....	39
7	Zona basal de la planta de frijol var 'Turrialba-4' en donde se presentó mayor ramificación.....	40
8	Plantas adultas de frijol var 'Turrialba-4' en el período de crecimiento de los frutos. Nótese el gran número de hojas y la forma cónica de las plantas..	40
9	Frutos de frijol var 'Turrialba-4' en proceso de maduración en la región basal de la planta.....	41
10	Secamiento de frutos en una planta de frijol var 'Turrialba-4'. Nótese la acumulación de vainas en la región basal.....	41
11	Variación del área foliar total por planta en relación con la materia seca total durante el ciclo de vida del frijol var 'Turrialba-4'.....	43
12	Variación del Índice de Crecimiento Relativo con edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	47
13	Variación del ICR con la edad (curva ajustada) en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	47

Figura No.		Página
14	Variación del Índice de Crecimiento Relativo del Área Foliar con la edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	48
15	Variación del Índice de Asimilación Neta con la edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	48
16	Variación en los valores de α para plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	50
17	Variación de la Razón de Peso Foliar con la edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	52
18	Variación de la Razón de Área Foliar con la edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	52
19	Variación del Índice de Área Foliar con la edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	54
20	Relación entre el Índice de Crecimiento Relativo y el Índice de Área Foliar para el ciclo de vida del frijol var 'Turrialba-4'.....	54
21	Absorción de Nitrógeno y Potasio (mg/planta) por el frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades.....	59
22	Absorción de Calcio y Magnesio (mg/planta) por el frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades.....	59
23	Absorción de Fósforo y Azufre (mg/planta) por el frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades.....	60
24	Relación entre la absorción de Nitrógeno, Potasio y Calcio, en mg por gramo de materia seca de raíces y la edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	60
25	Relación entre la absorción de Fósforo, Magnesio y Azufre en mg por gramo de materia seca de raíces, y la edad en plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	61
26	Variación de la absorción de Nitrógeno por gramo de materia seca de raíces durante el ciclo de vida de plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	61
27	Variación de la absorción de Azufre por gramo de materia seca de raíces durante el ciclo de vida de plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	62

Figura No.		Página
28	Variación en el porcentaje de Nitrógeno en raíces, tallos y hojas de frijol var 'Turrialba-4' en relación con la edad.....	65
29	Variación en el porcentaje de Fósforo en raíces, tallos y hojas de frijol var 'Turrialba-4' en relación con la edad.....	65
30	Variación en el porcentaje de Potasio en raíces, tallos y hojas de frijol var 'Turrialba-4' en relación con la edad.....	67
31	Variación en el porcentaje de Calcio en raíces, tallos y hojas de frijol var 'Turrialba-4' en relación con la edad.....	67
32	Variación en el porcentaje de Magnesio en raíces, tallos y hojas de frijol var 'Turrialba-4' en relación con la edad.....	69
33	Variación en el porcentaje de Azufre en raíces, tallos y hojas de frijol var 'Turrialba-4' en relación con la edad.....	69
34	Variación en el porcentaje de Nitrógeno, Potasio y Calcio en los frutos de frijol var 'Turrialba en relación con la edad.....	70
35	Variación en el porcentaje de Fósforo, Azufre y Magnesio en los frutos de frijol var 'Turrialba-4' en relación con la edad.....	70
36	Variación de la materia seca total en relación con la cantidad de Nitrógeno, Potasio, Calcio absorbidos por plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	72
37	Variación de la materia seca total en relación con la cantidad de Fósforo, Azufre y Magnesio absorbidos por plantas de frijol var 'Turrialba-4'.....	72
38	Relación entre la concentración relativa de N, P, y K y el contenido relativo de materia seca a varias edades en el frijol var 'Turrialba-4'.....	73
39	Relación entre la concentración relativa de Ca, Mg y S y el contenido relativo de materia seca a varias edades en el frijol var 'Turrialba-4'.....	73
40	Absorción de agua por el frijol var 'Turrialba-4' durante su ciclo de vida (valores promedio de siete días y obtenidos de cinco plantas por día).....	78

1. INTRODUCCION

Las prácticas culturales recomendadas para el éxito en un cultivo están dirigidas a conseguir un mejor crecimiento y rendimiento de las plantas.

Debido a los altos rendimientos que actualmente se desea obtener de los cultivos económicos y a que el efecto de los fertilizantes es limitado, entre otros factores, por la capacidad genética de la planta para hacer uso de la energía solar, se ha despertado el interés por determinar la eficiencia fotosintética de dichos cultivos con el objeto de seleccionar las variedades que posean alta eficiencia y posteriormente transferir esta característica con fines de mejoramiento genético.

La eficiencia fotosintética determina en última instancia las características potenciales de la productividad de un cultivo, por lo tanto el conocimiento de este parámetro ecofisiológico así como de la dinámica del crecimiento son informaciones de gran repercusión económica.

Al consultar la literatura existente sobre el frijol (18) se encontró que existe poca información sobre análisis de crecimiento y eficiencia fotosintética en este cultivo tan importante, por lo que se consideró justificado realizar un trabajo de investigación con los siguientes objetivos:

- a) Determinar los índices de productividad primaria, crecimiento y eficiencia fotosintética del frijol (Phaseolus vulgaris L. var 'Turrialba-4').
- b) Relacionar dichos índices con la absorción y concentración de nutrientes en los tejidos de las plantas.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Análisis del Crecimiento

El estudio del crecimiento de un cultivo mediante la cuantificación de los factores responsables del mismo en un período de tiempo determinado se inició con los trabajos de Blackman (1919), Briggs, West y Kidd (1920), quienes demostraron la posibilidad de efectuar un análisis detallado mediante la interpretación de datos primarios simples, tales como el peso seco total de la planta, el área foliar, el peso de las hojas, etc. En esta forma el problema de explicar las variaciones en el crecimiento de un cultivo en relación con el tiempo pudo simplificarse al considerar dos componentes básicos de una comunidad vegetal: la ganancia neta en peso seco y el área foliar. Basándose en estos dos componentes se ha desarrollado una técnica conocida como Análisis del Crecimiento (38), la cual es una forma de medir con precisión el crecimiento de un cultivo, utilizando la planta entera como una macroestructura y enfocar directamente el problema del rendimiento, el cual es el punto clave en el estudio de las plantas cultivadas.

Después de los trabajos iniciados en 1919, diversos autores han tratado de determinar los parámetros más apropiados que puedan reflejar el estado del desarrollo de la planta en un momento determinado y durante todo el período de crecimiento; la revisión bibliográfica que presentamos en este trabajo incluirá únicamente aquellos que han tenido mayor aceptación entre los investigadores dedicados al estudio de este problema.

En términos agronómicos, el rendimiento de un cultivo es el peso del producto económico cosechado por unidad de superficie de terreno, por lo

que el análisis del crecimiento debe fundamentarse en el registro de las variaciones en peso seco y no en cambios ocurridos en los caracteres morfológicos de la planta o en la enumeración de órganos neoformados, los cuales aunque dan una idea de la dinámica del proceso no ofrecen ninguna información acerca de las causas fisiológicas que motivan el mismo.

Blasckman, citado por Hammond y Kirkham (13) y Watson (38), desarrollaron un procedimiento de análisis al establecer la similitud entre la marcha del crecimiento y la ley del interés compuesto; de acuerdo con este autor el incremento en peso seco puede considerarse como un proceso contínuo de interés compuesto en el cual el producto (nueva materia seca), originado como consecuencia del progreso del crecimiento, se adiciona constantemente al 'capital' de que dispone la planta. Este 'capital' es el peso seco medido cuando se inicia el registro. De acuerdo con Hammond y Kirkham (13) la teoría del interés compuesto se aplica satisfactoriamente en los estadios tempranos del crecimiento cuando tanto el peso seco total de la planta como el área foliar aumentan en forma lineal. En estadios tardíos, la disminución en la rata de crecimiento no permite aplicar esta teoría para interpretar satisfactoriamente la totalidad de la curva obtenida, de aquí que Williams (41) propone utilizar el incremento en proteína foliar, y no en peso seco y en área foliar, como punto de referencia en el cálculo de los índices que reflejan la fisiología de la planta.

A continuación analizaremos algunos conceptos que nos permiten interpretar la dinámica del crecimiento mediante la utilización de los siguientes índices:

Indice de Crecimiento Relativo

Indice de Crecimiento Relativo del Area Foliar

Indice de Asimilación Neta

Indice de Area Foliar

Razón de Area Foliar

2.1.1 Indice de Crecimiento Relativo (ICR)

El Indice de Crecimiento Relativo (ICR) expresa el aumento en materia seca por unidad de materia seca presente o inicial en un periodo de tiempo determinado. Generalmente se utilizan las unidades de gramos/gramo/semana o sea g/g/t.

Según Blackman, citado por Watson (38), el valor del ICR en un instante dado del crecimiento de la planta se calcula utilizando la siguiente ecuación diferencial:

$$\text{ICR} = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \frac{d \log W}{dt}$$

donde W representa el peso seco de la planta.

Para un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$ tendremos:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d \log W}{dt} dt = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

planteamiento que corresponde a la fórmula utilizada más frecuentemente en los cálculos del ICR. Hablando en términos de rendimiento la producción de materia seca dependerá de los siguientes factores:

- a) Materia seca disponible por la planta para su crecimiento (capital inicial de Blackman)
- b) Índice de Crecimiento Relativo del cultivo
- c) Duración del período de crecimiento

2.1.2 Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar (ICR_L)

Empleando el mismo razonamiento anterior, el Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar (ICR_L) (40), se considera como el aumento de superficie foliar por unidad de área foliar ya existente en la unidad de tiempo. Esto se expresa mediante la fórmula:

$$ICR_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt}$$

donde L es el área foliar.

Para un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$ el ICR_L se calcula de la siguiente manera

$$ICR_L = \frac{\ln L_2 - \ln L_1}{t_2 - t_1}$$

Generalmente se utilizan las unidades $dm^2/dm^2/semana$ para indicar el crecimiento del área foliar por decímetro cuadrado de superficie foliar en una semana.

2.1.3 Índice de Asimilación Neta (IAN)

Sin embargo, el peso seco de una planta no representa la totalidad de su capital productivo ya que una parte considerable de la misma está formada por material de sostén y por lo tanto no activo en el crecimiento. Como nuestro objetivo principal es determinar la eficiencia en el crecimiento de un determinado cultivo y como el incremento en materia seca

puede atribuirse en su mayor parte a la fotosíntesis, Blackman propuso el cálculo del incremento en materia seca por unidad de área foliar ya que ésta representa la unidad fotosintética activa de la planta.

El concepto de Índice de Asimilación Neta (IAN) se originó tratando de establecer la forma más adecuada para el registro cuantitativo del crecimiento a través del tiempo y puede definirse como: la rata de incremento en peso seco de la planta por unidad de material activo en el crecimiento. Por material activo en el crecimiento se entiende cualquier componente de la planta relacionado fundamentalmente con la asimilación del carbono, y es aplicable en aquellas fases del crecimiento en las cuales ésta es responsable del mayor aumento en el peso seco de la planta (24). Por ser una medida de la eficiencia en la transformación de la energía radiante por las hojas, el IAN es el índice más importante en los estudios de productividad y rendimiento de los cultivos.

Para un instante t el IAN se obtiene de:

$$\text{IAN} = \frac{1}{L} \frac{dW}{dt}$$

donde L es el área foliar y W el peso seco.

Para un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$ esta ecuación toma la forma de:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{L} \frac{dW}{dt} dt$$

Considerando que la relación de W con L fuera lineal, al integrar esta función obtenemos la ecuación que nos permite calcular el IAN para ese intervalo de tiempo como sigue:

$$\text{IAN} = \frac{W_2 - W_1}{L_2 - L_1} \quad \frac{\ln L_2 - \ln L_1}{t_2 - t_1}$$

Normalmente el IAN se expresa en gramos de materia seca producida por dm^2 de área foliar por semana, o sea $\text{g}/\text{dm}^2/\text{semana}$.

Williams (41) utiliza valores de nitrógeno protéico foliar en lugar de superficie foliar para expresar el IAN durante el crecimiento del cultivo. De acuerdo con este investigador, sobre la base de nitrógeno protéico se elimina el error que se comete al utilizar el área foliar en aquellos estadios del crecimiento en que no se observa una relación lineal de éste con el peso seco, lo cual sucede en los estadios tardíos del crecimiento. Sin embargo, se ha seguido utilizando generalmente el cálculo del IAN tal como Blackman lo propuso inicialmente.

Posteriormente Whitehead y Myerscough (40), con base en investigaciones realizadas sobre el crecimiento de diferentes especies en un amplio rango de condiciones ambientales, demostraron que la relación entre el ICR y el ICR_L era de gran significación biológica y podía utilizarse para determinaciones más precisas del IAN. El cociente ICR/ICR_L lo denominaron Coeficiente Alfa, el cual es el exponente de la función exponencial que relaciona el peso seco (W) y el área foliar (L) de la siguiente forma:

$$W = KL^\alpha + c$$

en esta ecuación K representa la constante de proporcionalidad y c el error. Pasando a la forma logarítmica podemos calcular el valor para el coeficiente α , el cual para un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$ es igual a

$$\alpha = \frac{\log W_2 - \log W_1}{\log L_2 - \log L_1} = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{\ln L_2 - \ln L_1} = \frac{ICR}{ICR_L}$$

La utilización de este coeficiente para interpretar los resultados del análisis del crecimiento en plantas en diferentes condiciones ambientales, es mucho más exacta según los autores citados (43) que el ICR y el ICR_L como índices separados. En realidad, si consideramos que la adaptación de una planta a una condición ambiental determinada depende por una parte de la producción total de materia seca y por otra del aumento en superficie foliar, los valores de este coeficiente son índices de esta adaptación para el cultivo estudiado en las condiciones seleccionadas.

Como el ICR se refiere al incremento en materia seca por unidad de peso seco y el ICR_L al incremento en materia seca por unidad de área foliar un valor de $\alpha = 1$ indica que la materia seca se está utilizando en mantener la planta como una unidad fotosintéticamente activa; si el valor de α es menor que 1 se está utilizando una mayor proporción de asimilados en aumentar el área foliar con relación al peso seco total de la planta. Empleando este razonamiento es evidente que los valores promedio del coeficiente α en los diferentes estados de desarrollo de un cultivo deben ser iguales o mayores que 1. Un valor de α mayor que 1 indica la existencia de un exceso de asimilados disponibles para otros procesos del crecimiento como son floración, formación de órganos de acumulación, etc.; en estas condiciones la comunidad de plantas funciona como una unidad fotosintéticamente eficiente. Jain (20) presenta un análisis considerando este aspecto y utiliza el coeficiente α para estudiar la adaptabilidad de plantas de maíz

en diferentes condiciones de ambiente.

Utilizando el coeficiente α Whitehead y Myercough desarrollaron una fórmula para calcular el Índice de Asimilación Neta (IAN) de un cultivo para un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$, como sigue:

$$\text{IAN} = \frac{(W_2 - W_1) (L_2^{\alpha - 1} - L_1^{\alpha - 1})}{(L_2 - L_1) (\alpha - 1)}$$

sin embargo, estos autores no discuten esta fórmula con relación a la empleada para calcular el IAN desarrollada por Blackman y ésta sigue siendo la más ampliamente utilizada.

Jain (20) reúne los tres índices que hemos estudiado (ICR, ICR_L , IAN) en lo que él llama 'Componentes Fisiológicos del Crecimiento' para diferenciarlos de los 'Componentes Morfológicos del Crecimiento' que son aquellos índices que se relacionan fundamentalmente con el follaje de la planta, considerado únicamente como superficie de intercepción de la energía radiante. Estudiaremos a continuación los tres índices más importantes incluidos en este último grupo que son:

Índice de Área Foliar (IAF)

Razón de Peso Foliar (RPF)

Razón de Área Foliar (RAF)

2.1.4 Índice de Área Foliar (IAF)

La capacidad fotosintética de un cultivo está determinada por su área foliar total. Al analizar las causas de la variación en el rendimiento de los diferentes cultivos y para un mismo cultivo en diferentes condiciones,

es conveniente tomar en cuenta el área foliar del mismo sobre la misma base en que se expresa el rendimiento para establecer comparaciones más exactas. Watson en 1947, citado por Watson (38) introdujo el término de Índice de Área Foliar para expresar la relación superficie foliar y la superficie de suelo ocupada por la planta.

El Índice de Área Foliar (IAF) puede ser diferente para un mismo cultivo en las mismas condiciones ambientales, lo cual depende de la densidad de siembra y del área foliar total por planta de aquí la necesidad de experimentar con diferentes densidades de siembra para encontrar aquella con un IAF que produzca los mayores rendimientos, ya que a medida que aumenta el número y el tamaño de las hojas aumentan también el IAF, la absorción de luz y la rata de producción de material seco dentro de ciertos límites en los cuales el autosombreamiento no se transforme en un factor limitante para el crecimiento del cultivo. Para obtener rendimientos elevados, las hojas deben de fotosintetizar al máximo y translocar los productos fotosintetizados a las partes de la planta que representen el producto económico de la misma; por lo tanto es importante alcanzar un área foliar óptima en los primeros estadios de desarrollo del cultivo. Brougham (?) define el Índice de Área Foliar Crítico como la superficie foliar necesaria para interceptar un 95% de la radiación solar incidente a mediodía y representa el área foliar mínima necesaria para alcanzar un índice de crecimiento relativo máximo y varía con las diferentes especies y condiciones ambientales, especialmente con la intensidad de luz. Este Índice de Área Foliar Crítico corresponde al que Watson llama Índice Óptimo de Área Foliar (37).

Una de las mayores limitaciones para alcanzar altos rendimientos en cultivos anuales es el período de tiempo necesario, a partir de la siembra para obtener un IAF que sea óptimo; las plántulas aumentan lentamente su área foliar total de modo que una elevada proporción de la radiación incidente no es interceptada por el cultivo. A densidades normales de siembra las plántulas no compiten por luz y la rata de crecimiento del cultivo depende del número de plantas y del área foliar inicial por planta. Con cultivos en hileras el aumento en la densidad de plantas por hilera no compensa el espacio, a veces excesivo, entre hileras de manera que es necesario tomar en cuenta tanto la distribución de las plantas como el número total de las mismas al considerar el Índice de Área Foliar de un cultivo (19). Con cultivos cuyo producto económico utilizable es la parte vegetativa de la planta pueden utilizarse altas densidades de siembra ya que como consecuencia del autosombreamiento se favorece la expansión foliar, lo cual para cultivos anuales, resulta en una disminución de la productividad económica.

Al estudiar el rendimiento de un cultivo deben considerarse conjuntamente el IAF y el índice de asimilación neta (IAN) relacionados con la duración del período de crecimiento a través de la variación y persistencia del área foliar en tiempo y en magnitud. En base a estas consideraciones Niciporovic (29) indica que en un cultivo se obtienen rendimientos elevados en las siguientes condiciones:

- 1) Índice de Área Foliar óptimo
- 2) Máxima duración de la actividad fotosintética
- 3) Máxima rata de fotosíntesis y por lo tanto de producción de materia seca por unidad de área foliar (IAN)

- 4) Distribución y utilización óptima de los productos fotosintetizados por las plantas.

Se entiende que éstas son condiciones intrínsecas de la planta, relacionadas exclusivamente con su fisiología y su comportamiento cuando se encuentran formando parte de una comunidad.

2.1.5 Razón de Peso Foliar (RPF)

En relación con la distribución de productos fotosintetizados a que refiere Niciporovi, Jackson (19) propuso el cálculo de un índice que relaciona el crecimiento del área foliar, en gramos de materia seca, con el crecimiento total de la planta medido también en gramos. Para un período de tiempo $t_2 - t_1$ se expresa como:

$$RPF = \frac{\text{Peso seco hojas (g)}}{\text{Peso seco total (g)}}$$

Este índice se conoce como relación del crecimiento del área foliar en gramos con el peso total de la planta, o simplemente Razón de Peso Foliar. La utilidad de este índice está en que conociendo los valores del mismo para períodos sucesivos de tiempo dentro del ciclo de vida del cultivo, podemos determinar en que momento las variaciones en el ICR y en ICR_L pueden atribuirse fundamentalmente al aumento en peso seco total de la planta o al crecimiento del área foliar y por lo tanto considerar al IAN como el principal marcador del progreso del crecimiento. Esto es muy importante ya que las curvas para el ICR_L y el IAN no siempre siguen o tienen la misma tendencia.

2.1.6 Razón de Area Foliar (RAF)

Para expresar la relación aumento de superficie foliar con el peso seco total, se utiliza la Razón de Area Foliar el cual es un índice similar al anterior, pero relaciona el área foliar con el peso seco total, teniendo por lo tanto las unidades de dm^2 (o cm^2) / g. Se calcula para un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$ en la forma siguiente:

$$\text{RAF} = \frac{\text{Area foliar total (cm}^2\text{)}}{\text{Peso seco total (g)}}$$

Los índices que hemos estudiado someramente en este trabajo representan la forma más exacta de medir el crecimiento de una comunidad de plantas considerándolas en conjunto y no en forma aislada. Es interesante recalcar que la precisión del análisis depende de la interpretación de los índices y no del simple cálculo de ellos, el cual es por demás sencillo. Esta técnica es una de las herramientas más valiosas en el estudio de la fisiología y productividad de los cultivos.

Los estudios de análisis de crecimiento y productividad en frijol son muy escasos hasta la fecha y no hemos podido encontrar ninguna referencia que hable de su eficiencia fotosintética como tal.

En este orden de ideas las observaciones de montojos y Magalhaes (27) son valiosas porque hicieron un estudio comparativo de la influencia de la intensidad de luz y fertilización nitrogenada en el ICR, IAF y RAF del frijol var 'Pintado'. Los resultados indican un aumento en el ICR y en la producción de semillas con la intensidad de luz dada el efecto de este factor sobre el área foliar. La fertilización nitrogenada fraccionada en

2 o 3 aplicaciones durante el período vegetativo del cultivo originó modificaciones en los índices de crecimiento estudiados lo cual fue más aparente a bajas condiciones de luz.

Wallace y Munger (36) estudiaron la relación del ICR, IAN e IAF con el rendimiento económico (grano) de seis variedades de frijol. De acuerdo con sus resultados las variedades que presentaron altos rendimientos fueron aquellas que alcanzaron una mayor área foliar; estos investigadores establecen que las diferencias intervarietales en los valores de ICR e IAN pueden atribuirse en su mayor parte a su relación con la Razón de Área Foliar la cual puede considerarse como el factor principal responsable de las diferencias en los índices de crecimiento.

2.2. Relación entre el Contenido de Nutrimientos y el Crecimiento de la Planta.

Debido a la complejidad de los factores que determinan la rata de crecimiento de un cultivo es muy difícil establecer relaciones específicas con algún factor nutricional sin tener en cuenta la totalidad de los factores que determinan el crecimiento. Schwabe (33) indica que el área foliar promedio de un cultivo es mayor cuando existen niveles altos de potasio y fósforo y nitrógeno en presencia de un alto contenido de calcio y bajo de sodio.

Gregory y Richards (12) y Richards (32), trabajando con diferentes cultivos en condiciones de campo, encontraron que la deficiencia de potasio disminuía el IAN a través de su efecto negativo sobre la rata de fotosíntesis y aumento en la respiración. Por otra parte la deficiencia de nitrógeno afectaba principalmente la rata de respiración la cual disminuía considerablemente, pero las variaciones en el IAN estaban condicionadas

fundamentalmente por la intensidad de luz: a altas intensidades de luz los valores eran normales, pero muy bajos a intensidades bajas de luz. Sin embargo el efecto de la deficiencia de nitrógeno sobre el IAN es muy complejo y no depende únicamente de la luz. Experimentos realizados en cebada por el mismo autor (10) indican que las deficiencias nutricionales reducen el área foliar; el efecto fue mayor con el nitrógeno seguido por el fósforo y el potasio. Gregory y Baptiste (11), trabajando con cebada y trigo encontraron que el efecto del sodio y el magnesio eran similares al efecto que producía el potasio sobre el IAN y que los aumentos en rendimiento como resultado de la fertilización potásica se deben a un aumento en la tasa de asimilación de las hojas. En general los niveles variantes de los principales nutrimentos afecta más el área foliar que el IAN y las variaciones en la producción de materia seca se deben principalmente a cambios ocurridos en el área foliar siendo de importancia secundaria la variación en el IAN .

Lastuvka y Minar (22), estudiando el efecto de diferentes concentraciones de la solución nutritiva sobre el crecimiento de plantas de arveja (Pisum sativum), establecieron que la absorción de nutrimentos por la raíz no era proporcional a la concentración de los mismos en la solución nutritiva y que a medida que ésta aumentaba disminuía la utilización de nitrógeno, fósforo y potasio (medida en términos de producción de materia seca por unidad del elemento suministrado a la solución); el crecimiento máximo de las plantas estuvo relacionado con una tasa de absorción que fue característica para cada elemento. En este mismo trabajo se estableció la relación

entre el ICR y la rata de absorción relativa para cada nutrimento la cual tiene un valor determinado para cada período del ciclo del cultivo con pocas variaciones dentro de las mismas condiciones ambientales.

El crecimiento es función de dos variables de nutrición: intensidad, medida a través de la concentración total de nutrimentos en la hoja, y balance de nutrimentos los cuales se reflejan fundamentalmente en la composición química de las hojas. En cualquier nivel de intensidad nutricional existen diferentes relaciones entre los nutrimentos (balance) y el crecimiento y rendimientos máximos se obtienen cuando tanto el balance como la intensidad son óptimos para el cultivo considerado.

Cuando un cultivo está sujeto a las variaciones del medio ambiente la producción de materia seca por unidad de área y la composición química de la planta están estrechamente vinculados. De acuerdo con Shear (34) la composición química de la hoja es el único criterio válido para juzgar el status nutricional de la planta.

Steenbjerg (35) hace hincapié en la importancia de analizar la curva de rendimiento de un cultivo en relación con el contenido de nutrimentos en la planta; si los nutrimentos no están presentes en cantidades limitantes la forma de la curva será una sigmoide y el porcentaje de nutrimentos disminuirá conforme aumente la edad de la planta. Esto es especialmente importante en el estudio de concentraciones limitantes ya que pueden determinarse, a través de comparaciones, las concentraciones que resultarán en una disminución del crecimiento de la planta.

El análisis de la movilización y utilización de los nutrimentos dentro de la planta complejo y depende, entre otras cosas, del tipo de planta.

Gregory citado por Williams (42) determinó que en cereales el 90% del nitrógeno y el fósforo total se absorbía en el período de crecimiento en que se había alcanzado el 25% del peso seco final y que los nutrimentos absorbidos eran utilizados en primer lugar por las hojas iniciales, movilizadas a las hojas jóvenes durante la senescencia, y luego utilizados por la inflorescencia en formación. Por otra parte, el nitrógeno y el fósforo que se absorbió en las etapas iniciales del crecimiento fue determinante en el mantenimiento del desarrollo posterior de la planta y en el rendimiento final obtenido. Williams (42) indica que la rata de incorporación del nitrógeno y el fósforo dependen: a) del suministro externo y b) de la demanda interna para el crecimiento y funcionamiento normal de la planta. En el caso de Avena sativa esta demanda interna se refleja muy bien cuando se desarrolla la inflorescencia ya que hasta el 93% del fósforo presente proviene de los demás órganos de la planta cuando existe un suministrado externo adecuado del nutrimento mientras que en plantas deficientes en fósforo, sólo el 30% proviene de otras partes de la planta. Esto indica que la disponibilidad de nutrimentos está condicionada por un suministro apropiado de los mismos en el medio de cultivo.

El maíz (14) durante la formación del grano las partes vegetativas contribuyen con el 60% del nitrógeno total que se moviliza hacia el grano, solo el 40% se obtiene del suelo y por movilización desde las raíces.

En el caso de deficiencia de fósforo se ha podido demostrar en muchos casos que éste es retenido por las raíces lo cual contribuye a acentuar la deficiencia. En plántulas de frijol cuando se desarrollan en un

medio deficiente en azufre las raíces pueden extraer este nutrimento de los cotiledones y de las hojas en desarrollo (42). Gallo y Miyasaka (9), estudiando la acumulación de nutrimentos en los diferentes órganos de la planta de frijol en condiciones de campo, encontraron que las plantas acumulaban los elementos nutritivos a velocidades variables a lo largo del ciclo. Masaya (26) al estudiar la relación entre la absorción de nutrimentos y el crecimiento de las raíces de frijol en solución nutritiva encontró asociación entre la rata de absorción de nutrimentos por gramo de peso seco de raíz y el contenido de carbohidratos en los tejidos radicales.

Poco se sabe sobre el control de la movilización de elementos nutritivos dentro de la planta. En cultivos anuales como el frijol se sabe que existe una movilización de reservas hacia las estructuras reproductivas, pero se desconocen los patrones característicos de cada variedad. Esto junto con la absorción diferencial de nutrimentos a lo largo del ciclo de vida de la planta constituyen los puntos básicos a considerar en la resolución de cualquier problema nutricional. El crecimiento y el desarrollo de un organismo es el resultado de un gran número de procesos ontogenéticos entre los cuales existen interrelaciones complejas. La interpretación de las mismas y la forma en que estos procesos se integran para originar la planta es un problema fundamental en el estudio del crecimiento.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Localización del experimento.

El presente trabajo se llevó a cabo en los invernaderos y laboratorios de Fisiología Vegetal del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA (IICA -CTEI) en Turrialba, Costa Rica. Los invernaderos utilizados son del tipo apropiado para el trópico, con techo de láminas corrugadas de plástico transparente y paredes laterales de malla plástica fina que permite una ventilación adecuada e impide la entrada de insectos.

3.2. Condiciones climáticas dentro del invernadero.

Con objeto de precisar el microclima dentro del invernadero y de establecer las relaciones entre el medio ambiente y la planta se realizaron observaciones continuas de los principales factores climáticos mediante instrumentos apropiados para ello. Los factores observados fueron:

3.2.1 Temperatura.

Para la observación de este factor se dispuso de un termógrafo de registro semanal corregido y constatado mediante un termómetro patrón.

3.2.2. Humedad Relativa.

La detección de este factor se realizó con un higrógrafo de registro semanal.

3.2.3. Radiación Solar.

Mediante un Actinómetro de alcohol de lectura directa se procedió a efectuar las observaciones de la radiación solar acumulada en

cal/cm²/día. El instrumento fue puesto en cero diariamente y con el dato de la altura de la columna de alcohol al finalizar el día se calculó la radiación solar mediante la fórmula siguiente:

$$Q = h \times K$$

donde:

Q = Radiación solar en cal/cm²/intervalo de tiempo

h = Altura de la columna de alcohol en cm

K = 18,8 (constante instrumental)

3.2.4. Intensidad de la Luz.

Durante el experimento se efectuaron algunas mediciones con fotómetros para establecer el porcentaje de la luz incidente sobre las plantas dentro del invernadero en relación con la del exterior.

3.3. Material Vegetal Utilizado.

Se utilizó variedad de frijol 'Turrialba-4' de grano negro y hábito de crecimiento indeterminado. Las semillas se obtuvieron del Banco de germoplasma del CTEI. Antes de germinar, las semillas se desinfectaron con una solución de Clorox al 15% v/v durante un minuto, lavándolas a continuación con agua destilada varias veces. Para su germinación las semillas se colocaron en forma individual en hojas de papel absorbente de 18 x 18 cm, las cuales se humedecieron y colocaron sobre hojas de polietileno negro del mismo tamaño, y luego se arrollaron formando cilindros, los cuales se colocaron verticalmente en sendos recipientes de vidrio de 130 ml de capacidad con agua destilada hasta la mitad.

Utilizando este sistema de germinación se obtuvieron plantas sanas con el hipocotilo recto y raíces abundantes y normales, características muy importantes para la colocación de las plantas en los recipientes con la solución nutritiva.

3.4. Cultivo de las Plantas en Solución Nutritiva.

Seis días después de sembradas, las plantas tenían aproximadamente 8 cm de longitud y fueron colocadas en recipientes de plástico oscuro de 8 litros de capacidad que contenían solución nutritiva Hoagland No. 2 (17) a un 25% de la concentración normal. A los 9 días de sembradas se las transfirió a solución Hoagland con concentración completa. La aereación de la solución se hizo mediante un sistema de tuberías alimentado por un compresor que hacía burbujear aire dentro de cada recipiente mediante capilares individuales. Los recipientes se pusieron en mesones de madera a una distancia de 32 x 63 cm, colocando 12 recipientes por mesón. El área ocupada por cada planta fué de $0,20 \text{ m}^2$ (20 dm^2).

La solución Hoagland No. 2 empleada en este experimento fué modificada en su contenido de micronutrientes. Su composición fue la siguiente:

Elementos	ppm	mg/8 litros
Nitrógeno (nitratos)	196	1568
Nitrógeno (amoniacal)	14	112
Fósforo	31	248
Potasio	245	1960
Calcio	160	1280

Elementos	ppm	mg/8 litros
Magnesio	43	384
Azufre	64	512
Hierro	5, 0	40, 0
Boro	0, 5	4, 0
Manganeso	0, 5	4, 0
Zinc	0, 05	0, 40
Cobre	0, 02	0, 16
Molibdeno	0, 01	0, 08
Sodio	1, 95	15, 60
Cloro	3, 33	26, 64
Cobalto	0, 005	0, 04

Durante el experimento se realizaron dos cambios de la solución nutritiva: el primero a los 36 días y el segundo a los 58 días de edad de la planta. Los microelementos se adicionaron por separado cada 7 días. El pH se midió regularmente y se mantuvo en el rango de 5, 5 - 6, 5.

El volumen de los recipientes se mantuvo en 8 litros mediante adición diaria de agua. Tanto para la preparación de la solución nutritiva como para las reposiciones periódicas de volumen se utilizó agua de lluvia cuya conductividad iónica correspondió 2, 0 ppm de sales lo cual es aceptable para este tipo de investigaciones (16).

3.5. Diseño Experimental.

Se utilizaron un total de 73 plantas dispuestas al azar. Los tratamientos consistieron en el número de días que las plantas permanecieron en la solución nutritiva hasta el momento de retirarlas para efectuar los análisis correspondientes.

Para los análisis periódicos de peso seco, área foliar y nutrición mineral se emplearon 45 plantas que fueron retiradas de los mesones a razón de cinco cada siete días. Las 28 plantas restantes se utilizaron para ocupar los espacios vacíos con el fin de conservar el espaciamiento original. Al finalizar el ciclo de vida, estas 28 plantas sirvieron para obtener los componentes del rendimiento.

3.6. Análisis del Crecimiento.

El análisis del crecimiento se hizo por los métodos usuales para el cálculo de los Índices de Crecimiento (38) y mediante análisis de regresión y correlación. En todos los casos las determinaciones corresponden a un promedio de 5 plantas seleccionadas por sorteo a intervalos de 7 días durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo.

Una vez que las plantas se retiraban de la solución nutritiva se separaban las raíces, los tallos, las hojas y los frutos. Este material se pesaba por separado y las hojas se dibujaban en papel para hacer la determinación del área foliar total por planta. Posteriormente las muestras se ponían en una estufa a 70°C hasta obtener peso constante.

3.7 Determinación de Área Foliar.

Para medir el área foliar total por planta se utilizó la relación entre el peso de un área conocida de papel, previamente seleccionada como patrón,

y el peso del papel correspondiente a las hojas de las plantas cuyo perímetro fue previamente dibujado en papel del mismo tipo y recortado. Paralelamente se tomaron datos del ancho del foliolo central de las hojas los cuales junto con las áreas totales correspondientes permitieron establecer la función matemática de relación entre estos dos parámetros; esto se hizo con 250 hojas con el fin de simplificar las determinaciones posteriores de área foliar en esta variedad. Se encontró un ajuste del 98% para la función logarítmica $y = 2,19 x^{1,965}$ donde $y =$ área foliar en cm^2 y $x =$ ancho del foliolo central en cm (Fig. 1). La ecuación calculada por Loayza (23) para estos mismos fines ajusta con un $R^2 = 0,88$ a una curva cuadrática, sin embargo, creemos que es más conveniente utilizar la función logarítmica porque el coeficiente de confiabilidad fue mucho mejor ($R^2 = 0.98$). Por otra parte, y desde un punto de vista estadístico, la función logarítmica tiene un parámetro menos que la cuadrática por lo que resulta más eficiente. Desde un punto de vista fisiológico es más real la función logarítmica ya que no contempla valores negativos para la variable x (ancho foliolo central).

3.8. Resumen y clasificación de los índices empleados en el experimento.

Para evaluar el crecimiento de las plantas se realizaron las mediciones y se calcularon los índices que se exponen a continuación.

3.8.1. Características generales del crecimiento.

- 1a. Peso materia seca de raíces
- 1b. Peso materia seca de tallos
- 1c. Peso materia seca de hojas
- 1d. Area foliar

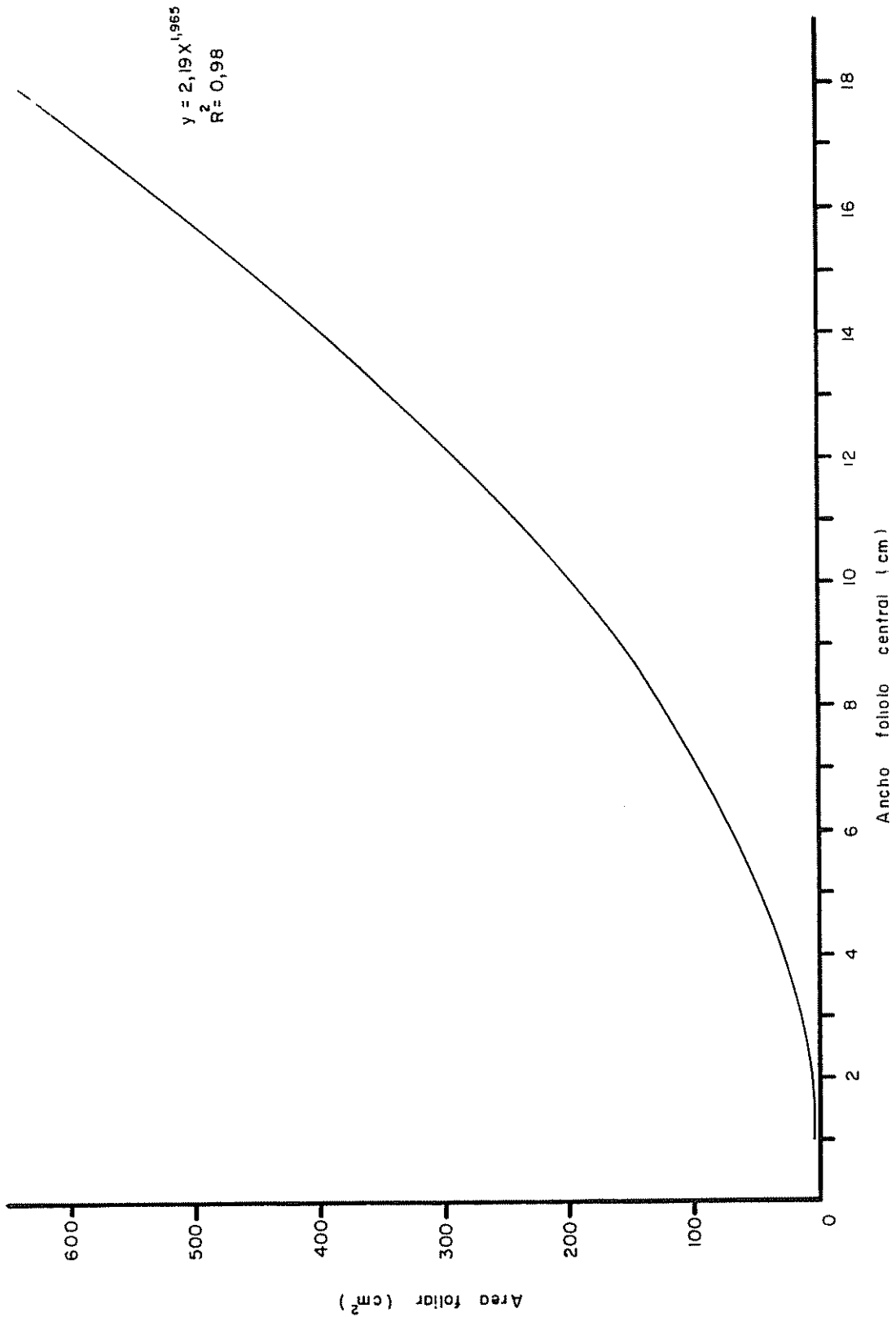


Fig. 1 Curva que relaciona el ancho del foliolo central con el área foliar para el frijol var. "Turrialba -4"

3.8.2. Componentes Fisiológicos del Crecimiento.

- 2a. Índice de Crecimiento Relativo (ICR)
- 2b. Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar (ICR_L)
- 2c. Índice de Asimilación Neta (IAN)
- 2d. Parámetro alfa ($\alpha = ICR/ICR_L$)

3.8.3. Componentes Morfológicos del Crecimiento.

- 3a. Razón de Area Foliar (RAF)
- 3b. Razón de Peso Foliar (RPF)
- 3c. Índice de Area Foliar (IAF)
- 3d. Area Foliar Específica (AFE)

3.9 Toma de muestras para el análisis químico de la solución nutritiva.

A intervalos de 14 días se analizó la solución nutritiva de cada uno de los recipientes correspondientes a las 5 plantas muestreadas para ese período. Para realizar los análisis primeramente se llevó a volumen original (8 litros) y se tomó una alícuota de 50 ml desechándose el resto de la solución. En dicha alícuota se analizó el contenido de N, P, K, Ca, Mg y S de las soluciones calculándose el consumo por planta por diferencia con el análisis de la solución recién preparada. Los dos últimos análisis se efectuaron a intervalos de 7 días.

3.10 Toma de Muestras para el Análisis Químico del material vegetal.

También al final de cada 15 días se determinó el contenido de N, P, K, Ca, Mg y S en raíces, tallos, hojas y frutos de la planta. Se utilizó el material vegetal, previamente secado en la estufa, de la muestra compuesta resultante de las 5 plantas muestreadas que fue homogeneizado en bolsas individuales para los totales de raíces, tallos, hojas y frutos moliéndose

cada una de las partes por separado en un molino Willey con malla 40 (40 mesh).

El polvo resultante de la molienda se muestreó al azar dos veces guardándose las muestras en frascos separados hasta el momento de realizar la digestión previa al análisis químico. En cada muestra se hicieron dos determinaciones siendo la resultante el promedio de 4 determinaciones.

3.11 Análisis Químicos.

3.11.1 Determinación de Nitrógeno.

El nitrógeno total se determinó por el método micro-Kjeldhal, utilizando destiladores del tipo propuesto por Müller (28). Para el análisis del material vegetal se sometió la muestra a digestión con ácido sulfúrico.

3.11.2 Determinación del Fósforo.

Se utilizó el método colorimétrico de Fiske-Subarrow modificado (2). Dicha modificación consistió en el uso de HCl en vez de H_2SO_4 como agente acidificante. Las lecturas se efectuaron en un colorímetro Coleman Modelo 6-A con una longitud de onda de 525 nanómetros.

3.11.3 Determinación de Azufre.

La determinación de Azufre se llevó a cabo por turbimetría utilizándose el método de la AOAC (2) basado en la formación de un precipitado insoluble de $BaSO_4$ estabilizado en goma arábiga.

3.11.4 Determinación de Potasio, Calcio y Magnesio.

Mediante diluciones apropiadas de los extractos se determinaron el K, el Ca, y el Mg en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin-Elmer Modelo 303.

3.12 Medición de la Absorción de Agua.

Las pérdidas de agua de los recipientes en relación con el volumen original de 8 litros fueron repuestas todos los días por la noche adicionando agua de lluvia en todos los recipientes con el fin de no variar la concentración osmótica de la solución e impedir la exposición de las raíces al aire. En seis plantas, que ocupaban posiciones distanciadas dentro del diseño, se determinó la pérdida diaria de agua por medio de un cilindro graduado. Para controlar las variaciones de volumen originadas por factores tales como evaporación de agua de la superficie y el efecto de la aereación se colocó un recipiente en condiciones idénticas a las demás pero sin planta.

3.13 Determinación de los Componentes del Rendimiento.

Como se explicó previamente, para evaluar el rendimiento que se puede obtener de plantas de frijol en condiciones de cultivo en solución nutritiva se dejaron 28 plantas hasta el final de su ciclo de vida, las cuales fueron utilizadas para la obtención de los siguientes datos:

- 1) Número de frutos/planta
- 2) Número de semillas/fruto
- 3) Peso de 100 semillas
- 4) Peso total de semillas/planta
- 5) Número total de semillas/planta

El número de vainas por planta se determinó en forma individual para cada planta y luego se hizo un promedio. Posteriormente se tomaron al azar muestras de vainas de todas las plantas para determinar el número de semillas por vaina y el peso de 100 semillas. El peso total de semillas

por planta (rendimiento) se determinó también en forma individual obteniéndose luego un promedio.

El peso de las semillas fué ajustado en todos los casos sobre la base del 12% de humedad. La determinación del contenido de humedad se realizó con un medidor dieléctrico marca Steite Modelo G.

4. RESULTADOS

4.1. Condiciones Climáticas dentro del Invernadero.

4.1.1 Temperatura.

La temperatura media durante el período del ensayo fue de 26°C. La media máxima fue 32,8°C y la media mínima 19,6 (Fig. 2). Los valores extremos así como el valor promedio presentan un alza aproximada de 3,0°C con respecto a la temperatura exterior registrada en una Estación Agroclimatólogica de primer orden situada a 30 metros del invernadero. Los valores de estas temperaturas son semejantes a los de muchas regiones tropicales cálidas y húmedas.

4.1.2 Humedad Relativa.

El valor promedio observado durante el ciclo fue de 82% con máximos y mínimos promedios, para intervalos de 7 días, de 86% y 79% respectivamente (Fig. 2). Estos valores de humedad relativa son inferiores a los registrados en la Estación Agroclimatológica en un 5%.

4.1.3 Radiación Solar.

La radiación solar promedio recibida a la altura de las plantas fue de 185 cal/cm²/día con máximo de 225 y mínimo de 145 cal/cm²/día (Fig. 2). Estos valores correspondieron aproximadamente al 50% de los obtenidos en la Estación Agroclimatológica.

4.1.4 Intensidad de Luz.

Con respecto al exterior, el porcentaje de intensidad de luz dentro del invernadero osciló entre el 25 y el 30%, llegando al valor máximo de 29.000 Lux al medio día y con cielo despejado.

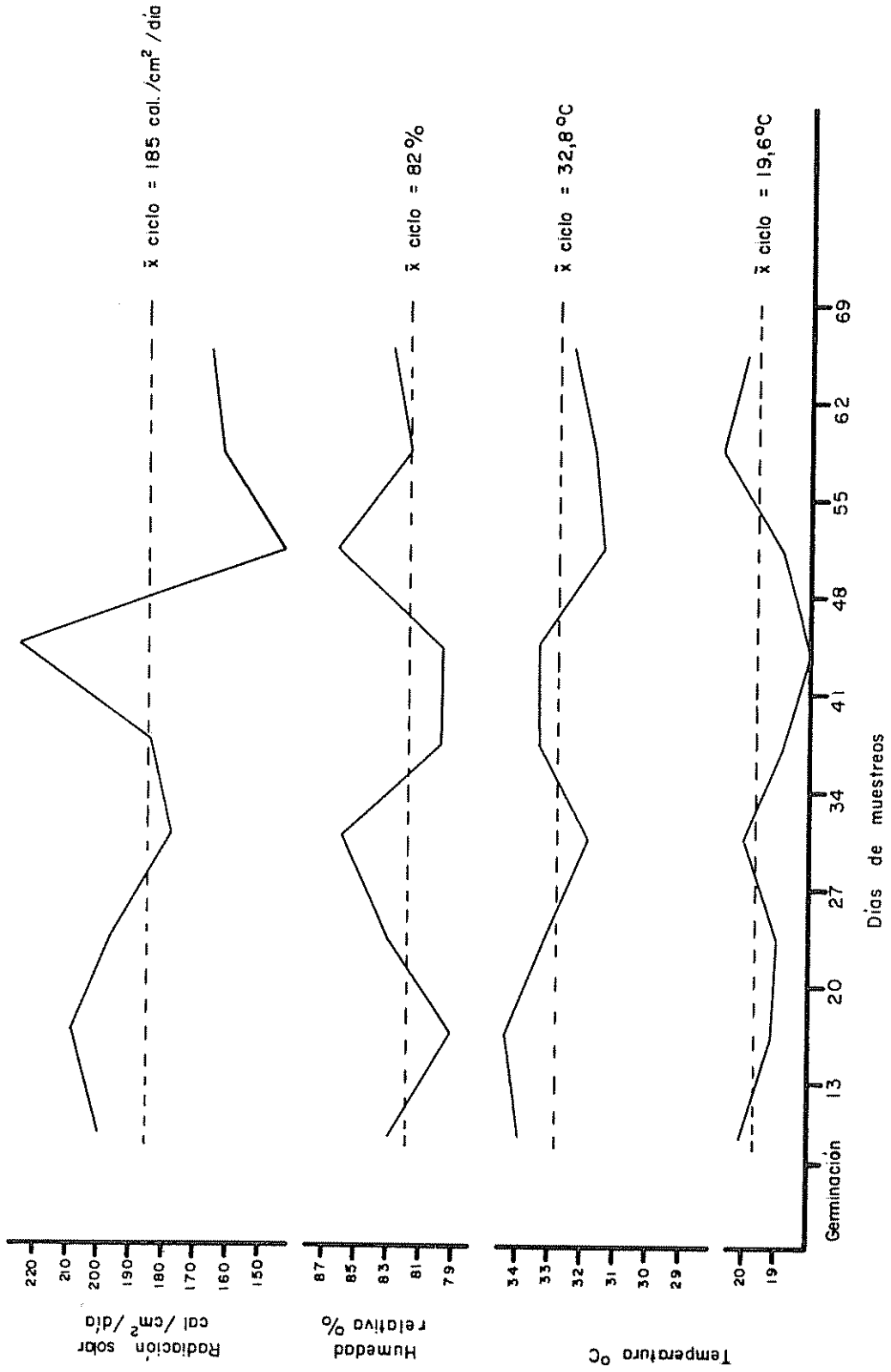


Fig. 2 Promedio de temperatura, humedad relativa y radiación solar ocurridos durante el experimento. Los datos se ubican en la mitad de los periodos entre muestreos por ser valores promedio de cada periodo.

4.2. Características Generales del Crecimiento.

En el Cuadro 1 se presenta el orden cronológico de las etapas del desarrollo del cultivo y en el Cuadro 2 el contenido de materia seca en los diferentes órganos de la planta durante los distintos períodos de crecimiento. Estos resultados se grafican en la Fig. 3 donde se muestran las curvas de crecimiento obtenidas en función de la edad. El máximo en peso seco de raíces se alcanzó aproximadamente a los 48 días de edad manteniéndose con pocas variaciones hasta final del ciclo de vida. En el caso de los tallos y las hojas los pesos secos máximos se lograron a los 62 días. El peso seco de raíces, tallos y hojas sufrió una disminución en el período 48-55 días que correspondió con la iniciación del crecimiento activo de los frutos.

Considerando en forma global, el aumento de peso seco sigue una curva logarítmica de ecuación $\ln y = -10,093 + 3.66 \ln x$ con un $R^2 = 0.99$ (Fig. 4) durante casi todo el ciclo debido a la contribución que hacen los frutos al peso seco total a partir de los 48 días cuando se produjo una disminución temporal en peso seco de la parte vegetativa; por otro lado la caída de las hojas no se realizó sino después de los 62 días permaneciendo en su mayor parte adheridas a la planta, senescentes, a medida que los frutos avanzaban en madurez. El período de máximo macollamiento cesó aproximadamente a los 27 días cuando las plantas empezaron a desarrollar la guña (Figs. 5 y 6) de manera que la mayor ramificación y aglomeración de hojas ocurrió en la base de la planta disminuyendo hacia el ápice (Figs 7 y 8). Esta zona basal fue también la de mayor contenido de frutos ya que en ella se concentró aproximadamente el 60% de ellos (Figs. 9 y 10).

Cuadro 1. Orden cronológico de las etapas del desarrollo de las plantas de frijol var 'Turrialba-4' y de algunas labores realizadas durante su ciclo de vida.

Días	Eventos
Día cero	Siembra de semillas en conos de papel absorbente (5-5-72)
4	Germinación de las semillas.
6	Hojas cotiledonarias expandidas. Las plantas se transfirieron en recipientes individuales con solución nutritiva Hoagland a $\frac{1}{4}$ de la concentración original.
9	Se pusieron las plantas en solución Hoagland a concentración original.
20	Plantas presentaron ramificación profusa y una altura promedio de 17 cm.
27	Plantas comenzaron a desarrollar la guía (Fig. 6)
31	Aparecen botones florales especialmente en la parte basal de la planta donde se presenta la mayor ramificación (Fig. 7).
35	Inicio de la antesis.
36	Primer cambio de la solución nutritiva.
44	Gran número de frutos formados.
48	Cesó la producción de hojas. Las plantas tienen una altura aproximada de 170 cm (Fig. 8).
54	Cesó la floración. Crecimiento activo de los frutos.
58	Segundo cambio de la solución nutritiva. Empiezan a amarillear las hojas de la planta y a madurar los frutos.
60	Período de maduración activa de los frutos evidenciada por los cambios de color en las vainas.
76	Hojas de la planta en senescencia casi total. Se inició la cosecha de los frutos. (20-7-72)

Cuadro 2. Contenido de materia seca (g) a diferentes edades y órganos de plantas de frijol var 'Turrialba-4' (valores promedio de 5 plantas).

Edades (Días)	Raíces (g)	Tallos (g)	Hojas (g)	Frutos (g)	Total (g)	%
13	0,11	0,08	0,34	-	0,53	0,33
20	0,38	0,32	1,28	-	1,98	1,21
27	1,05	1,20	3,93	-	6,18	3,78
34	2,28	3,67	8,51	-	14,46	8,86
41	3,13	13,80	23,36	-	49,29	30,22
48	8,38	27,06	32,78	11,36	79,85	48,96
55	6,66	28,63	30,50	30,29	96,08	58,91
62	9,92	37,24	39,24	69,60	154,74	94,92
69	10,42	35,20	29,20	88,25	163,07	100,00

Cuadro 3. Valores obtenidos para número de hojas por planta, contenido de materia seca en las hojas, área foliar y espesor de las hojas en plantas de frijol var 'Turrialba-4' a diferentes edades (valores promedio de cinco plantas).

Edades (Días)	Número de Hojas por Planta	Peso de Materia Seca de Hojas(g)	Area Foliar (dm ²)	Espesor de Hojas g/dm ²
13	3	0,34	1,31	0,264
20	5	1,28	5,14	0,249
27	13	3,93	14,88	0,264
34	26	8,51	40,89	0,208
41	53	23,36	105,30	0,221
48	71	32,78	142,50	0,229
55	69	30,50	141,00	0,216
62	75	39,60	140,44	0,282
69	68	29,20	138,15	0,211

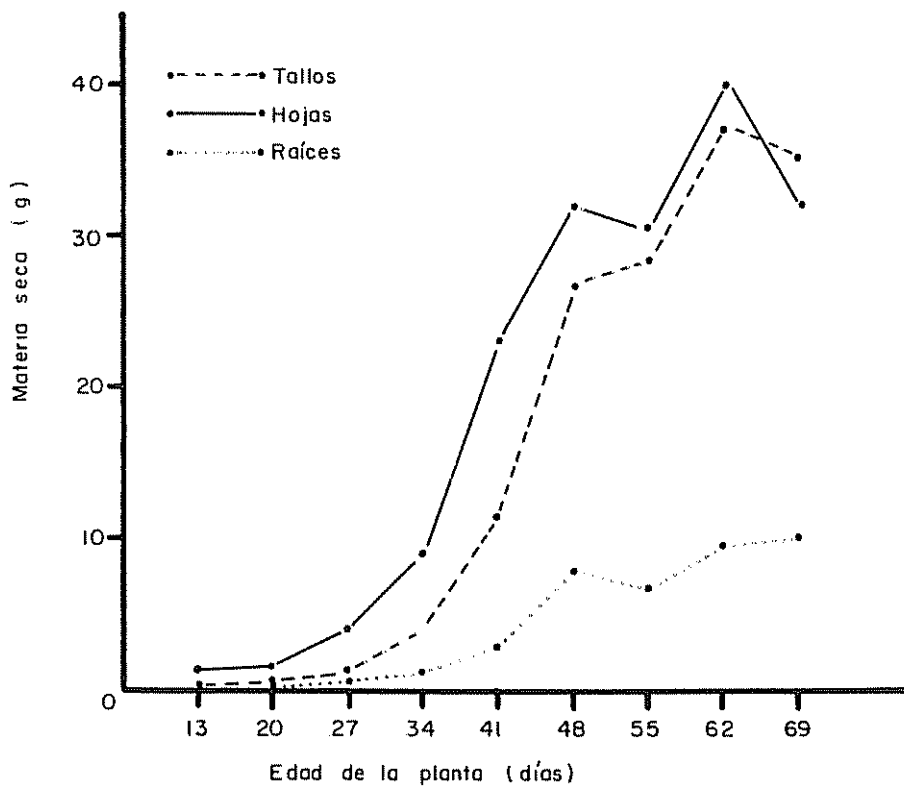


Fig. 3 Materia seca (g) encontrada en los órganos de las plantas de frijol var. "Turrialba-4" a diferentes edades

Las plantas alcanzaron una altura final de aproximadamente 2 metros (medido hasta el final de la guña principal) y en la mayoría de los casos desarrollaron 3-4 guñas. El número máximo de hojas por planta fue de 75 (Cuadro 3). El período de máximo crecimiento del cultivo fue entre los 34 y los 41 días, coincidiendo con la floración (Cuadro 2).

El cultivo manifestó una exuberancia que no es usual en las plantas de frijol desarrolladas en el campo y los órganos de la planta se caracterizaron por un mayor tamaño. La relación entre el área foliar y el peso seco total de la planta es altamente significativa ajustándose a un modelo de regresión logarítmico $\ln y = 1,080 + 0,836 \ln x$ con un $R^2 = 0,84$ (Fig. 11). Esto indica que la ganancia en peso seco está íntimamente relacionada con el área foliar.

4.2.1 Índice de Crecimiento Relativo (ICR).

Utilizando los métodos tradicionales de cálculo (20, 38) en la curva de variación del ICR con la edad se pueden distinguir cinco fases (Fig. 12), las cuales corresponden con las etapas del desarrollo del mismo. El ICR disminuye desde la germinación hasta el inicio de la floración (fase I) aumenta al producirse el crecimiento de los frutos (fase II) disminuye hasta el inicio de la maduración de las vainas (fase III), aumenta al completarse la maduración de las vainas (fase IV) y finalmente disminuye con la senescencia del cultivo (fase V).

Haciendo uso de Análisis de Regresión, la variación del ICR con la edad de la planta se ajusta a un modelo lineal de ecuación $y = 1,78 - 0,025 x$ con $R^2 = 0,79$ el cual indica que la producción de materia seca por unidad

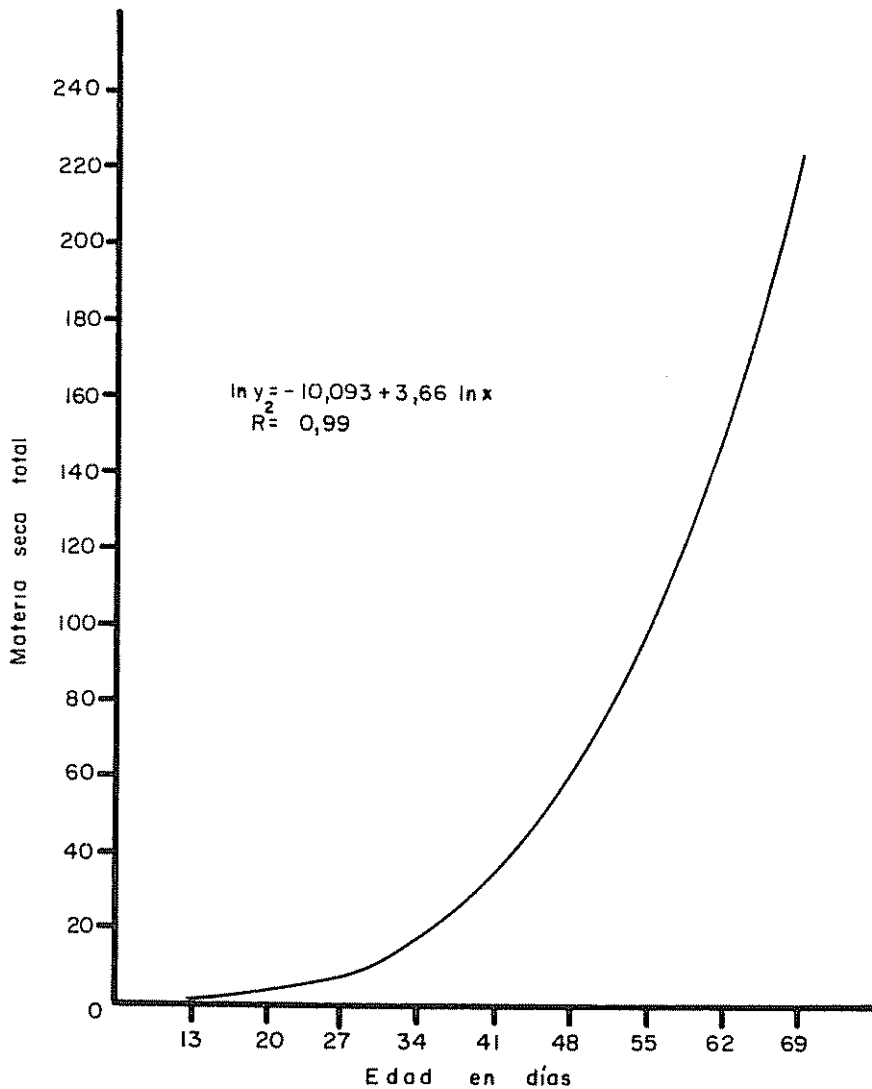


Fig 4. Peso en gramos de materia seca total encontrada en el frijol var "Turrialba-4" a diferentes edades



Fig 5. Aspecto general del cultivo del frijol var 'Turrialba-4' cultivado en solución nutritiva. Edad 27 días



Fig 6. Plantas de frijol var 'Turrialba-4' comenzando a desarrollar la guía a los 27 días de edad.



Fig 7. Zona basal de la planta de frijol var 'Turrialba-4' en donde se presentó mayor ramificación.

Fig 8. Plantas adultas de frijol var 'Turrialba-4' en el período de crecimiento de los frutos. Nótese el gran número de hojas y la forma cónica de las plantas.

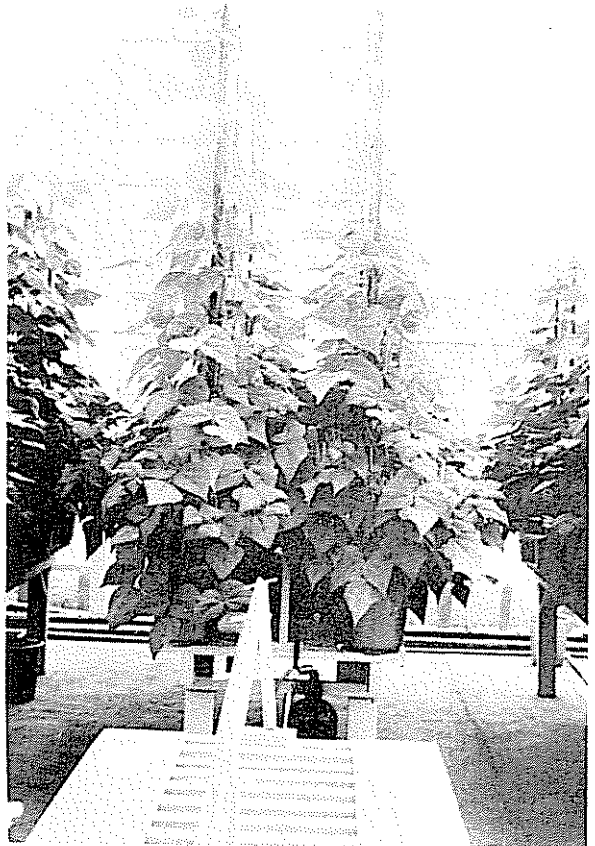




Fig 9. Frutos de frijol var 'Turrialba-4' en proceso de maduración en la región basal de la planta.

Fig 10. Secamiento de frutos en una planta de frijol var 'Turrialba-4'. Nótese la acumulación de vainas en la región basal.



de peso disminuye a un ritmo constante con el tiempo, es decir, la eficiencia en la incorporación de nuevo material disminuye a una tasa de 0,025 g/g/día. Sin embargo, aunque esto es correcto desde un punto de vista estadístico, la expresión para el índice relativo contiene la variable de cantidad $1/W$ la cual no se considera si el crecimiento es lineal y por lo tanto la tasa dW/dt debe cambiar continuamente con el tiempo y proporcional al peso (W) si ha de cumplirse la ley de Interés Compuesto (38). La forma de la curva y la ecuación para expresar el fenómeno como corresponde a la realidad en la interpretación cuantitativa del crecimiento, será una función exponencial, aunque el ajuste sea menor que para la función lineal, y la ecuación que define fisiológicamente la variación del ICR con la edad en estas condiciones es igual a $y = 5,15 \cdot 0,946^x$ con $R^2 = 0,71$ (Fig. 13).

En el frijol var 'Turrialba 4' el ICR promedio fue de 0,712 g/g/sem durante el ciclo del cultivo con un valor máximo de 1,30 g/g/sem para el período comprendido entre cero y 20 días de edad (Cuadro 4).

4.2.2 Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar (ICR_L).

El aumento en superficie foliar por dm^2 de hoja es máximo en las primeras semanas del crecimiento del cultivo, disminuye a medida que se acerca la época de floración y cesa casi por completo cuando empiezan a formarse los primeros frutos (Cuadro 4).

El ICR_L promedio para el ciclo de vida del cultivo fue de 0,582 dm^2 por dm^2 de área foliar por semana. Para la expresión matemática del fenómeno se prefiere la función exponencial calculada en función de los datos que se presentan en el Cuadro 4, la cual es igual a $y = 8,88 \cdot 0,956^x$ con $R^2 = 0,82$ (Fig. 14). Sin embargo, el ajuste para una función lineal

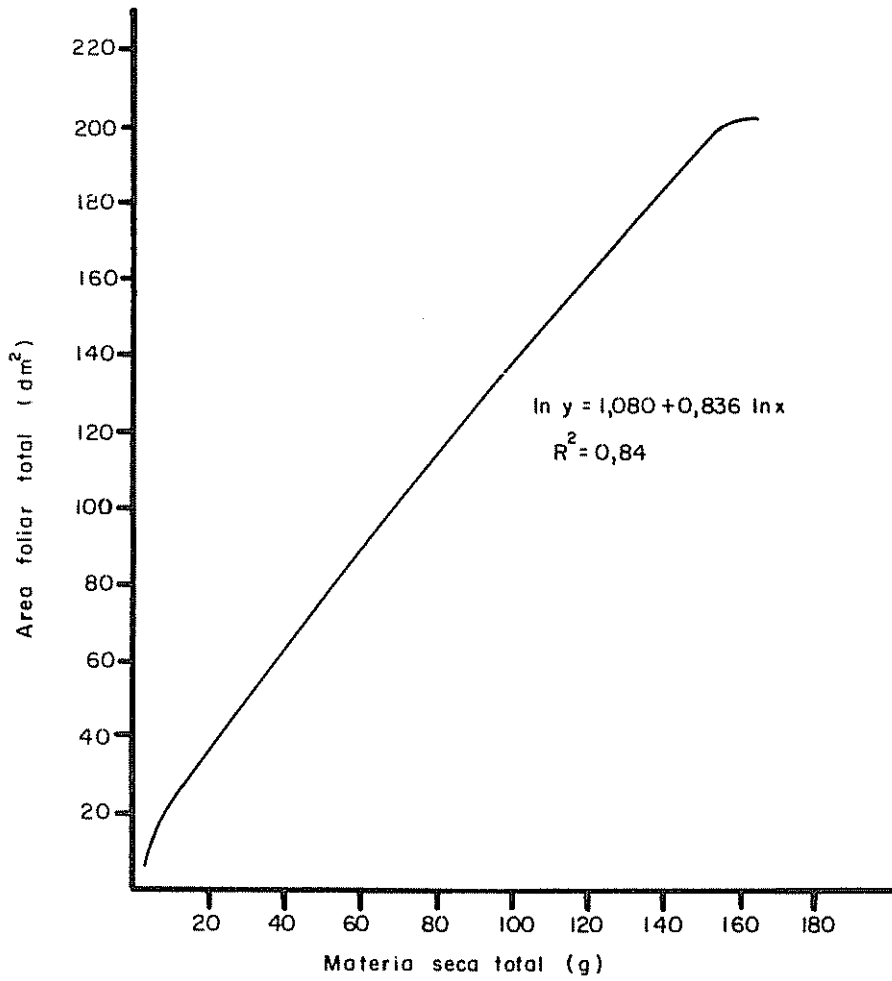


Fig. II Variación del área foliar total por planta en relación con la materia seca total durante el ciclo de vida del frijol var "Turrialba - 4"

Cuadro 4. Valores calculados para los índices usados en el estudio del crecimiento y eficiencia fotosintética del frijol var 'Turrialba-4' a diferentes períodos de su crecimiento (promedios de cinco plantas).

Períodos (Días)	ICR	ICRL	IAN	Parametro α	RPF	RAF	IAF	AFE
0 - 20	1,30	1,37	0,50	0,95	0,64	2,58	0,25	4,006
20 - 27	1,13	1,06	0,42	1,06	0,63	2,40	0,73	3,786
27 - 34	0,85	1,01	0,25	0,84	0,58	2,82	2,02	4,804
34 - 41	1,23	0,95	0,35	1,30	0,47	2,13	5,22	4,507
41 - 48	0,48	0,30	0,24	1,60	0,41	1,78	7,06	4,350
48 - 55	0,19	-0,01	-0,33	-19,00	0,31	1,40	6,90	4,622
55 - 62	0,47	-0,01	0,41	-47,00	0,25	0,90	6,96	3,546
62 - 69	0,05	-0,01	0,05	- 5,00	0,17	0,84	6,85	4,731
Promedio Semanal	0,712	0,582	0,237	-	0,454	1,915	-	4,237
Promedio Diario	0,097	0,080	0,034	-	0,064	0,273	-	0,605

ICR = Índice de Crecimiento Relativo g/g/sem
 ICRL = Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar $\text{dm}^2/\text{dm}^2/\text{sem}$
 IAN = Índice de Asimilación Neta $\text{g}/\text{dm}^2/\text{sem}$
 Parámetro α = ICR/ICRL
 RPF = Razón de Peso Foliar g hojas/g total
 RAF = Razón de Area Foliar dm^2 hojas/g total
 IAF = Índice de Area Foliar dm^2 hojas/ dm^2 suelo
 AFE = Area Foliar Específica dm^2 hoja/g hoja

es del 91% y para un modelo de regresión $y = 1,94 - 0,032x$ la cual podría definir el fenómeno biológico si la rata de aumento en superficie foliar por dm^2 fuera constante. Esto, al igual que para el caso del ICR considerado anteriormente, no define la condición fisiológica del crecimiento de variar proporcionalmente con el aumento de materia seca disponible para la continuación del proceso.

4.2.3 Índice de Asimilación Neta (IAN).

El Cuadro 4 y la Fig. 15 muestran los datos de la eficiencia en la conversión de la energía radiante por dm^2 de área foliar medida a través del IAN. Se pueden distinguir tres máximos en la curva, que coinciden con los períodos máximos encontrados para el ICR (Fig. 12) siendo la correlación entre estos dos índices significativa e igual a 0,73 (Cuadro 5). El IAN, por ser una medida de la ganancia neta en materia seca en una comunidad de plantas en relación con el área foliar, es un indicador de la eficiencia fotosintética promedio; tiene un valor máximo en las primeras semanas de crecimiento cuando hay un menor número de hojas y disminuye a medida que este número aumenta (Cuadro 3 y 4). El aumento del IAN que se observa a los 62 días (Fig. 15), es una consecuencia del aumento en actividad de algunas hojas aun jóvenes debido probablemente al traslado de sustancias metabólicas desde las hojas basales las cuales están en proceso de senescencia. El IAN promedio para el ciclo de vida de frijol en las condiciones de este experimento fue de 0,237 gramos de materia seca producidos por dm^2 de área foliar por semana siendo el valor máximo obtenido igual a 0,50 $\text{g}/\text{dm}^2/\text{sem}$ que correspondió a los primeros 20 días de crecimiento.

Los modelos matemáticos ensayados para definir la tendencia de la curva no ajustaron significativamente en ninguna de las cuatro funciones ensayadas (lineal, logarítmica, exponencial y cuadrática) lo cual es consecuencia de la dificultad que existe en el ajuste matemático de las respuestas de fenómenos biológicos complejos en los casos en que como éste, se encuentran fluctuaciones y dispersión de puntos. El IAN es muy complejo en su naturaleza ya que incluye la asimilación fotosintética del CO_2 la cual está determinada por un gran número de factores que regulan y limitan el anabolismo y que no se toman en cuenta al efectuar el cálculo de índice; además se considera la totalidad del peso de la planta como materia prima para el crecimiento cuando en realidad existe una elevada proporción del mismo integrada por material de sostén y de almacenamiento que no participan en el crecimiento activo.

Sin embargo, la consideración de éste índice en conjunto con el resto de índices que se calcularon para cuantificar el crecimiento del frijol y su eficiencia fotosintética permitió establecer las particularidades fisiológicas del cultivo.

4.2.4 Parámetro Alfa ($\alpha = \text{ICR}/\text{ICR}_L$)

Para la evaluación de la proporción de los asimilados que son utilizados en el crecimiento del área foliar o en otras actividades de la planta tales como floración, fructificación, etc., se utiliza la relación propuesta por Whitehead y Myerscough (40) y que se denomina parámetro o coeficiente α y que expresa la relación entre el aumento en peso seco total por unidad de materia seca y el crecimiento del área foliar por unidad de área foliar.

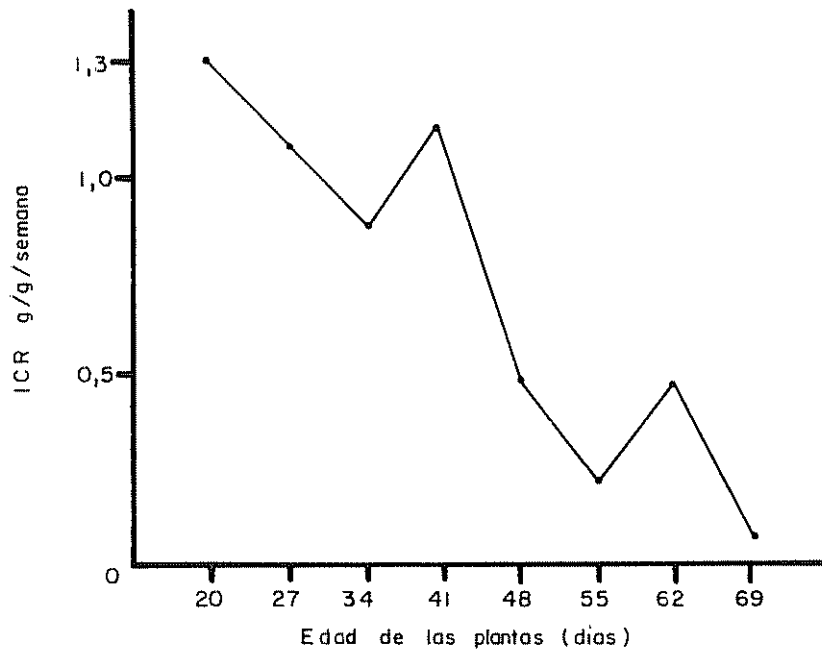


Fig 12 Variación del índice de crecimiento relativo con la edad en plantas de frijol var "Turrialba-4"

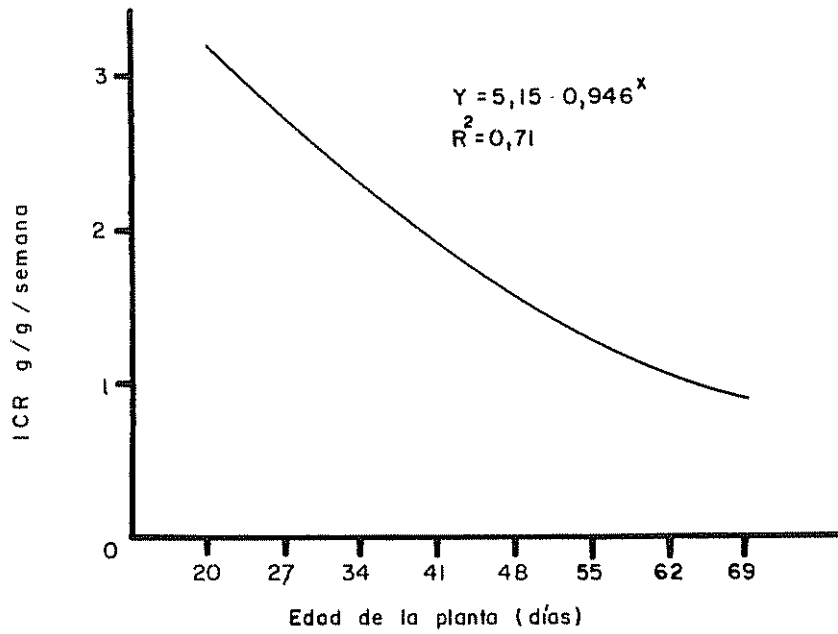


Fig. 13 Variación del ICR con la edad (curva ajustada) en plantas de frijol var. "Turrialba-4"

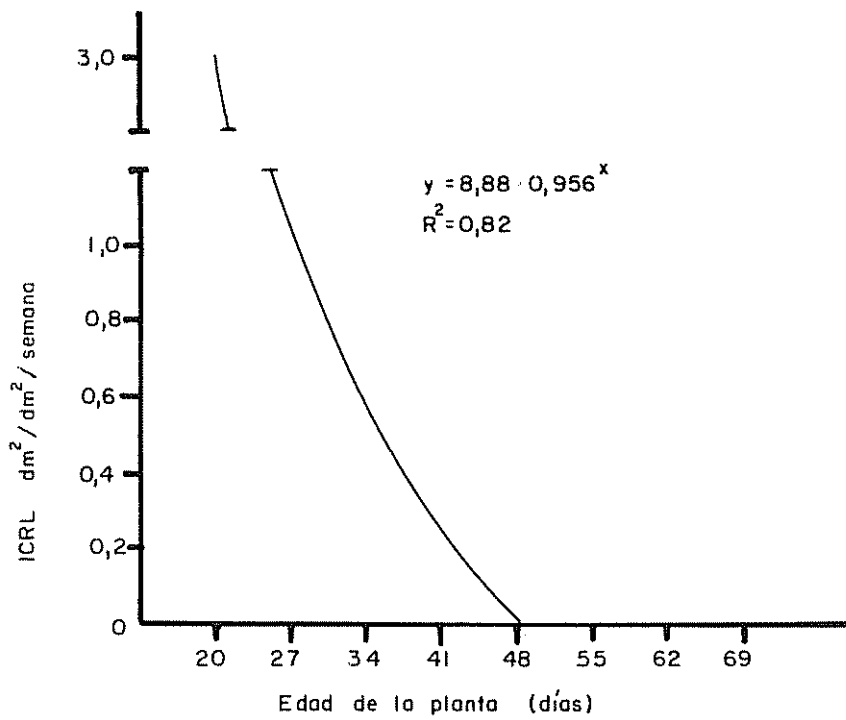


Fig 14 Variación del índice de crecimiento relativo del área foliar con la edad en plantas de frijol var "Turrialba-4"

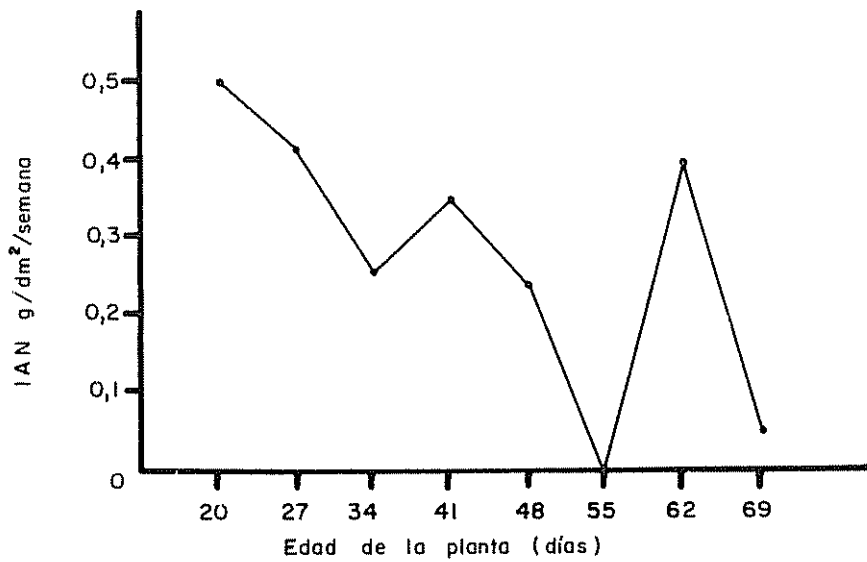


Fig 15 Variación del índice de asimilación neta con la edad en plantas de frijol var "Turrialba-4"

En la Fig. 16 se grafican los valores de α obtenidos para los diferentes períodos de crecimiento del frijol (Cuadro 4). El valor de α permanece alrededor de 1,0 hasta los 20 días de edad de la planta; esto significa que la materia seca que se produce se utiliza casi exclusivamente en mantener la planta como una unidad fotosintéticamente activa. Ya que la planta está canalizando sus actividades fundamentalmente hacia la producción de área foliar. Cuando se inicia la floración a los 34 días de edad α toma un valor = 1,30 y aumenta hasta el valor de 1,60 a los 41 días. Los aumentos en el valor de α por encima de 1,0 demuestran que existe un exceso de materia seca disponible para los procesos de floración y fructificación: cuando se inicia la floración se está utilizando el 30% del peso seco de la planta en estas funciones ($\alpha = 0,30$) y a medida que se avanza hacia la formación de frutos aumenta hasta alcanzar un valor del 60% del peso total. Según Whitehead y Myescough (40) la magnitud de este exceso puede calcularse con la fórmula $S = (\alpha - 1) W$ donde S es el aumento necesario en materia seca para que la planta pueda mantener la totalidad de sus funciones fisiológicas y W el peso seco total.

De acuerdo a esa fórmula en el caso del frijol var 'Turrialba-4' y en las condiciones de este experimento, la porción del peso total que se usó en la floración y fructificación varió entre 4,34 g y 30,57 g. Para los períodos subsiguientes a la floración los valores de alfa son negativos, lo cual se debe a que ha finalizado el crecimiento del área foliar pero hay aumento en el peso seco total debido al crecimiento de los frutos.

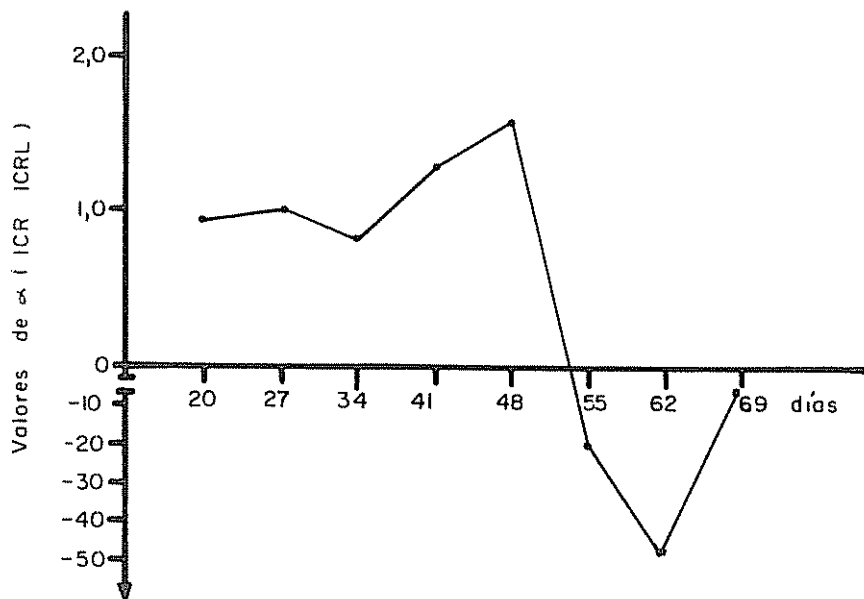


Fig 16 Variación en los valores de α para plantas de frijol var "Turrialba -4"

4.2.5 Razón de Peso Foliar (RPF).

La variación en el peso seco de las hojas (g) en relación al peso seco total de la planta (g) con la edad se debe a la distribución diferencial de fotosintetizados hacia un aumento en la producción de hojas, de otros órganos de la planta o de ambos a la vez. Para el frijol, y como puede verse en el Cuadro 4, la RPF es alta en las primeras semanas del crecimiento donde su valor se mantiene constante alrededor de 0,63 gramos de hojas por gramo de peso seco total o sea que el 63% de peso total de la planta está integrado por las hojas. Durante la floración y fructificación se observa una disminución en este valor debido al traslado de fotosintetizados hacia los órganos en formación, pero en términos generales el valor de la RPF permanece elevado durante casi todo el ciclo del cultivo debido a la sobreproducción de hojas con un valor promedio de 0,454 gramos de hojas por gramo de peso seco total y por semana. El modelo de regresión que ajusta la variación de la RPF con la edad corresponde a una función cuadrática $y = 0,67 + 0,0013x - 0,000113x^2$ con un $R^2 = 0,98$ (Fig. 17).

4.2.6 Razón de Area Foliar (RAF).

La superficie asimilatoria (dm^2) por unidad de peso seco total (g) para el frijol se muestra en la Fig. 18 y en el Cuadro 4, donde puede observarse que hasta los 41 días de edad el área foliar del cultivo se incrementa al equivalente del doble del peso seco total siendo menor que 1,0 únicamente en estadios tardíos del crecimiento cuando los frutos contribuyen con casi todo el aumento en peso seco de la planta y no hay producción de nuevas hojas. La Razón de Area Foliar depende de la Razón de

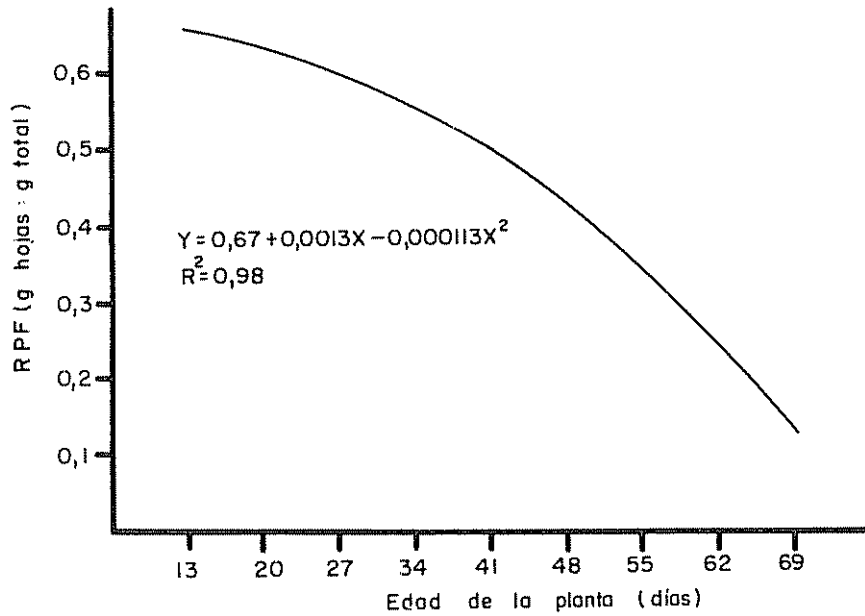


Fig. 17 Variación de la razón de peso foliar con la edad en plantas de frijol var "Turrialba - 4"

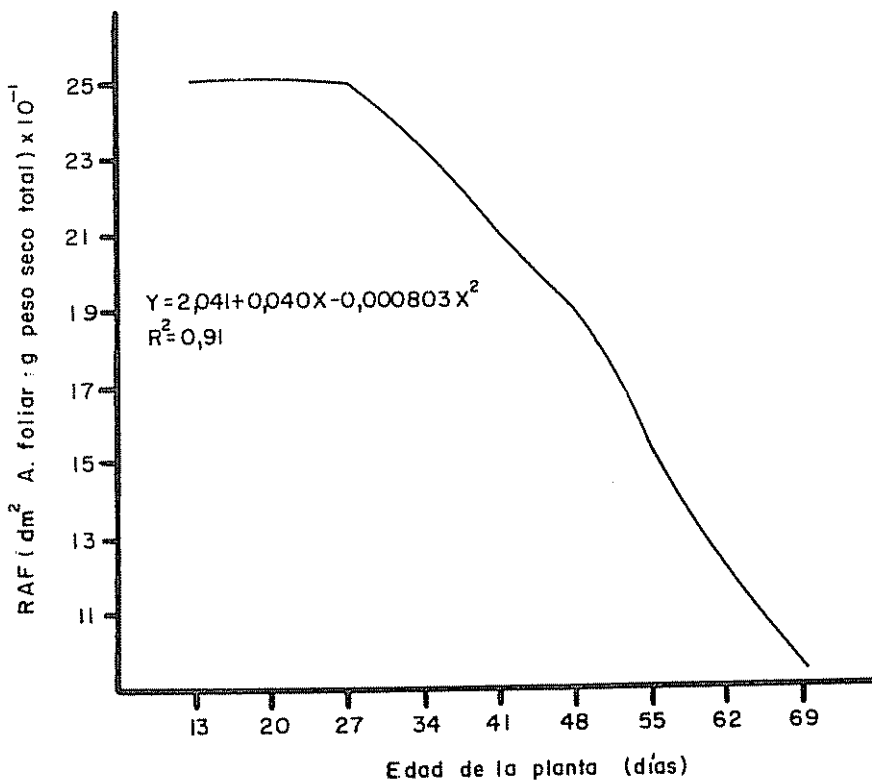


Fig. 18 Variación de la razón de área foliar con la edad en plantas de frijol var. "Turrialba - 4"

Peso Foliar lo cual se manifiesta en el coeficiente de correlación elevado entre estos dos índices igual a 0,94 (Cuadro 5). El valor promedio semanal alcanzado para la RAF fue de 1,915 dm² de área foliar por gramo de peso seco total. El modelo de regresión que se ajusta a la variación de la RAF con la edad corresponde a una función cuadrática.

$$y = 2,041 + 0,040 x - 0,000803 x^2 \text{ con un } R^2 = 0,91$$

4.2.7 Índice de Area Foliar (IAF).

En las condiciones del experimento, donde cada planta ocupaba un área de 0,20 metros cuadrados se alcanzó una IAF máximo de 7,06 a los 48 días de edad de la planta (Cuadro 4) manteniéndose este valor más o menos constante hasta el final del ciclo del cultivo. Sin embargo, se encontró un valor óptimo de IAF = 2 con el que se obtuvo un Índice de Crecimiento Relativo Máximo (Fig. 20).

La variación del IAF con la edad de la planta responde a un modelo de regresión logarítmico $\ln y = -10,42 + 30,74 \ln x$ con un $R^2 = 0,94$ (Fig. 19).

4.2.8 Area Foliar Específica (AFE).

La variación de la superficie foliar (dm²) por gramo de hoja (g) se presenta en el Cuadro 4 donde puede observarse que esa variación es muy pequeña manteniéndose alrededor de 4,0 durante casi todo el ciclo del cultivo. Como resultado del mayor aumento en el área foliar en relación con el peso, las hojas del frijol son delgadas ya que el espesor de la hoja está dado por el inverso del AFE lo cual significa que para el frijol en las condiciones de este trabajo de investigación se favoreció la expansión foliar como resultado del ICR_L elevado y como consecuencia, el espesor de las hojas alcanzó un valor promedio de 0,238 g/dm² (Cuadro 3).

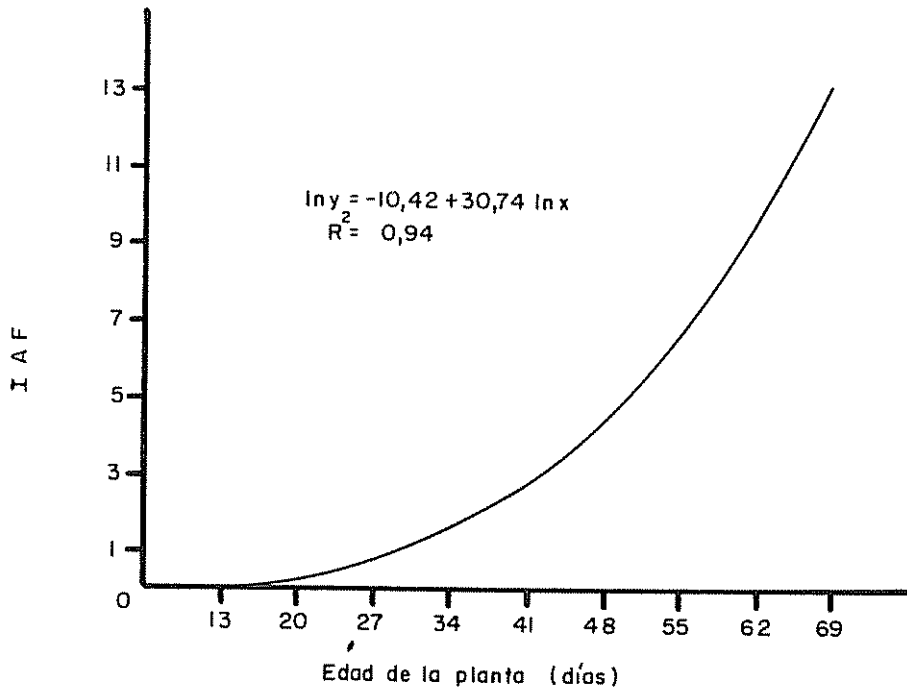


Fig 19 Variación de índice de área foliar con la edad en plantas de frijol var. "Turrialba-4"

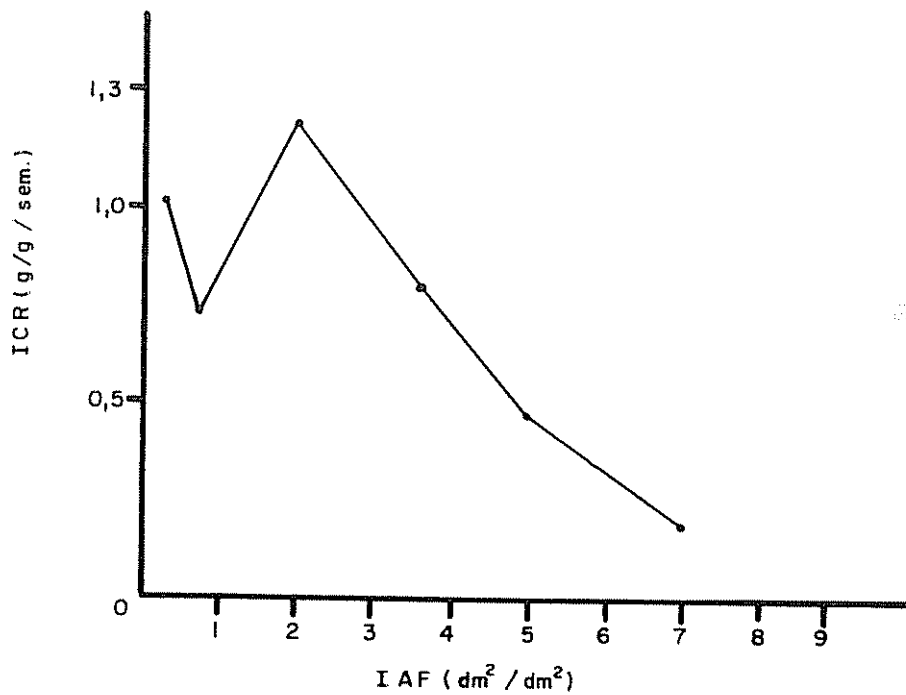


Fig 20 Relación entre el índice de crecimiento relativo y el índice de área foliar para el ciclo de vida del frijol var "Turrialba-4"

En condiciones normales y para la mayoría de los cultivos, el espesor de las hojas aumenta con la edad, en el caso del frijol aunque estos valores fluctúan, permanecen dentro de un rango en el cual el aumento en espesor es mínimo; sin embargo esta parece ser la situación normal para plantas de frijol desarrolladas en condiciones de soluciones nutritivas. Jones (21) cita valores de AFE para frijol con condiciones de campo y de invernadero; de acuerdo con este autor el AFE de plantas desarrolladas en soluciones nutritivas es hasta 3 veces mayor que el de plantas desarrolladas en el campo lo cual se debe a la exuberancia del crecimiento en estas condiciones.

Las variaciones en el AFE tienen gran influencia en el ICR ya que debido a la relación que existe entre el ICR y la RAF y entre esta y el AFE cualquier cambio en el área foliar específica hará variar el índice de crecimiento relativo a través de la razón de área foliar. La correlación entre el ICR y el RAF para el frijol es de 0,87 lo cual es altamente significativo (Cuadro 5).

4.3. Absorción de Nutrientos.

La rata de absorción de nutrientes por las raíces varió durante todo el ciclo de la planta. Tal variación se presentó tanto entre los diferentes elementos como entre los períodos de crecimiento.

En el Cuadro 6 se presenta la absorción de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Azufre en mg/planta para los diferentes períodos de crecimiento considerados.

4.3.1. Absorción de Nitrógeno.

La absorción total de nitrógeno por planta aumenta rápidamente desde el inicio del crecimiento hasta la floración, disminuye durante el

Cuadro 5. Matriz de correlación entre diferentes índices de crecimiento calculados para el frijol var 'Turrialba-4'

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
X ₁	1,00						
X ₂	0,43	1,00					
X ₃	0,46	0,94	1,00				
X ₄	0,73	0,87	0,88	1,00			
X ₅	0,63	0,83	0,93	0,94	1,00		
X ₆	0,02	0,25	-0,05	0,07	-0,22	1,00	
X ₇	-0,62	-0,83	-0,94	-0,91	-0,98	0,25	1,00

X₁ = IAN

X₄ = ICR

X₇ = IAF

X₂ = RAF

X₅ = ICR_L

X₃ = RPF

X₆ = AFE

crecimiento de los frutos y aumenta en la maduración como puede observarse en la Fig. 21. El período de absorción máxima se registró entre los 27 y los 41 días cuando se produjo la floración.

La absorción de N por gramo de peso seco de raíz disminuye en forma continua desde el inicio hasta el final del ciclo (Fig. 24); hasta los 27 días de edad la cantidad incorporada es muy elevada y disminuye siguiendo un modelo de regresión cuadrático de ecuación:

$$y = 2050,25 - 64,95x + 0,537x^2 \text{ con un } R^2 = 0,97 \text{ (Fig. 26).}$$

4.3.2 Absorción de Potasio y Calcio.

La absorción de Potasio por planta aumenta progresivamente hasta la floración y disminuye entre los 41 y 55 días aumentando posteriormente durante la maduración de frutos. La absorción de Calcio siguió el mismo patrón pero las variaciones después de la floración son menos bruscas como puede observarse en la Fig. 22. La absorción por gramo de peso seco de raíz presenta el mismo ritmo de variación para ambos elementos (Fig. 24), pero las cantidades de K absorbidas equivalen, en la mayoría de los casos, a aproximadamente al doble o al triple del Calcio.

4.3.3 Absorción de Fósforo y Magnesio.

El patrón de absorción de estos dos elementos por planta es similar como puede observarse en la Fig. 22 y 23, con máximos en los 41 y 62 días. Sin embargo, la cantidad inicial de P incorporada por gramo de peso seco de raíz es muy elevada al principio y disminuye hasta los 27 días en tanto que el Mg aumenta progresivamente desde el inicio hasta los 41 días (Fig. 25).

Cuadro 6. Absorción de macro elementos en mg/planta para los diferentes períodos de crecimiento del frijol var 'Turrialba-4' (datos promedio de cinco plantas).

Períodos Días	N	P	K	Ca	Mg	S
0 - 13	157,60	18,50	56,0	20,00	2,40	15,50
13 - 27	547,7	67,46	244,70	108,10	37,60	40,10
27 - 41	1.168,91	325,44	1.893,76	723,26	269,10	114,10
41 - 55	451,36	44,40	389,40	468,84	101,60	184,60
55 - 62	998,83	173,80	1.947,72	617,20	266,80	177,70
62 - 69	279,10	75,50	79,44	300,80	144,0	266,00
Total	3.603,50	705,10	4.611,12	2.238,20	821,10	798,00
Porcentaje	28,20	5,51	36,08	17,51	6,42	6,24

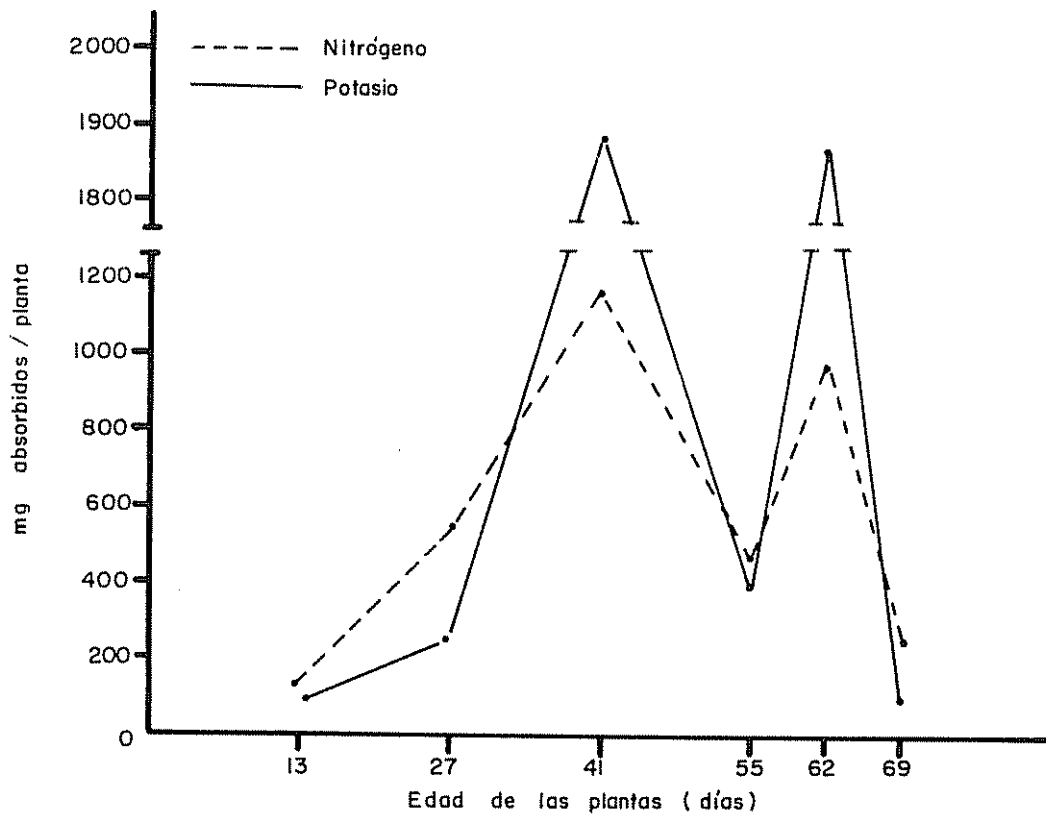


Fig. 21 Absorción de nitrógeno y potasio (mg/planta) por el frijol var. "Turrialba-4" a diferentes edades

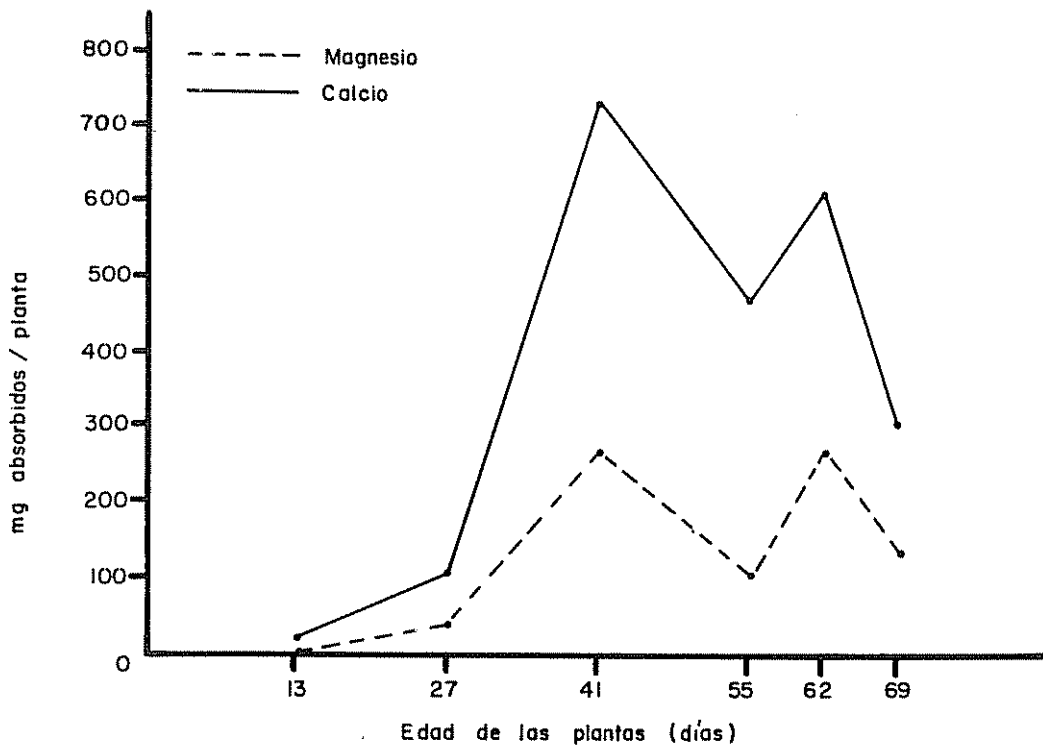


Fig. 22 Absorción de calcio y magnesio (mg/planta) por el frijol var. "Turrialba-4" a diferentes edades

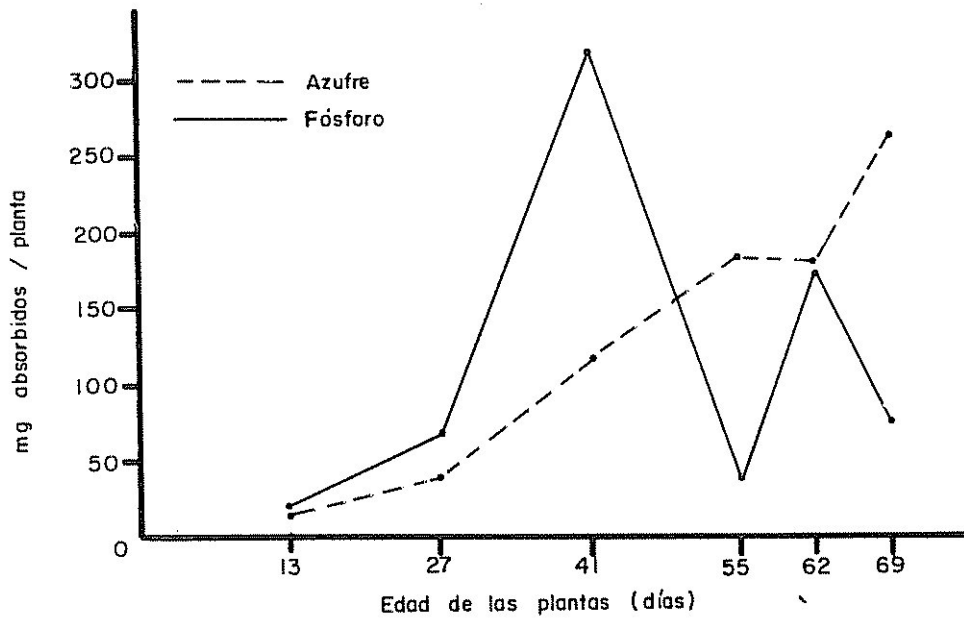


Fig. 23 Absorción de fósforo y azufre (mg/planta) por el frijol var. "Turrialba-4" a diferentes edades

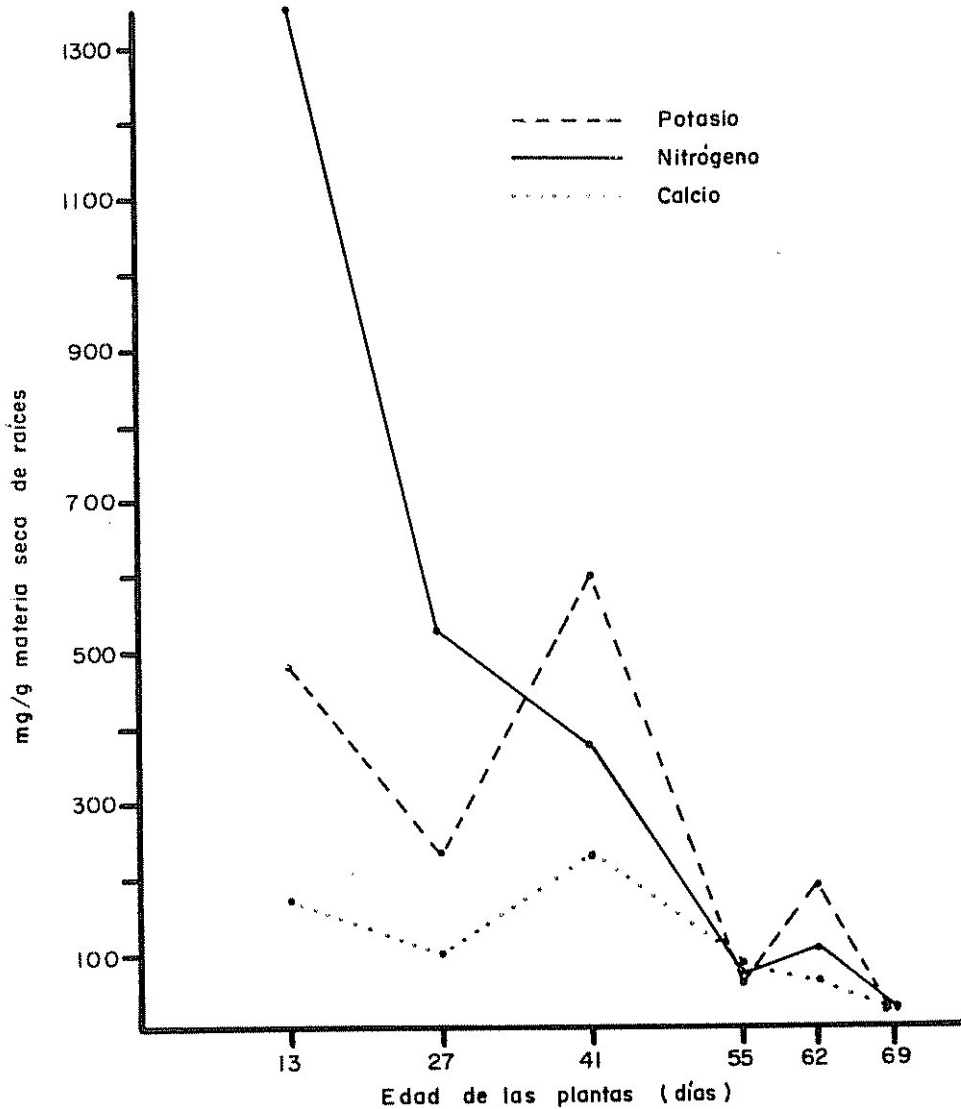


Fig. 24 Relación entre la absorción de nitrógeno, potasio y calcio, en mg. por gramo de materia seca, de raíces y la edad en plantas de frijol var. "Turrialba-4"

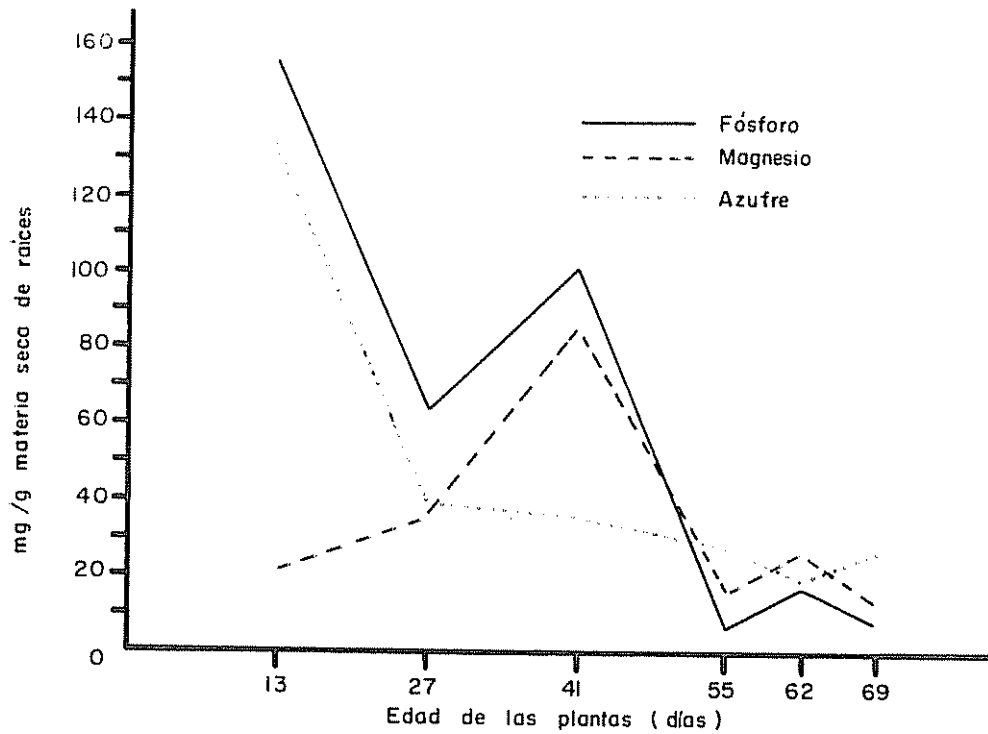


Fig 25 Relación entre la absorción de fósforo, magnesio y azufre en mg por gramo de materia seca de raíces y la edad en plantas de frijol var "Turrialba-4"

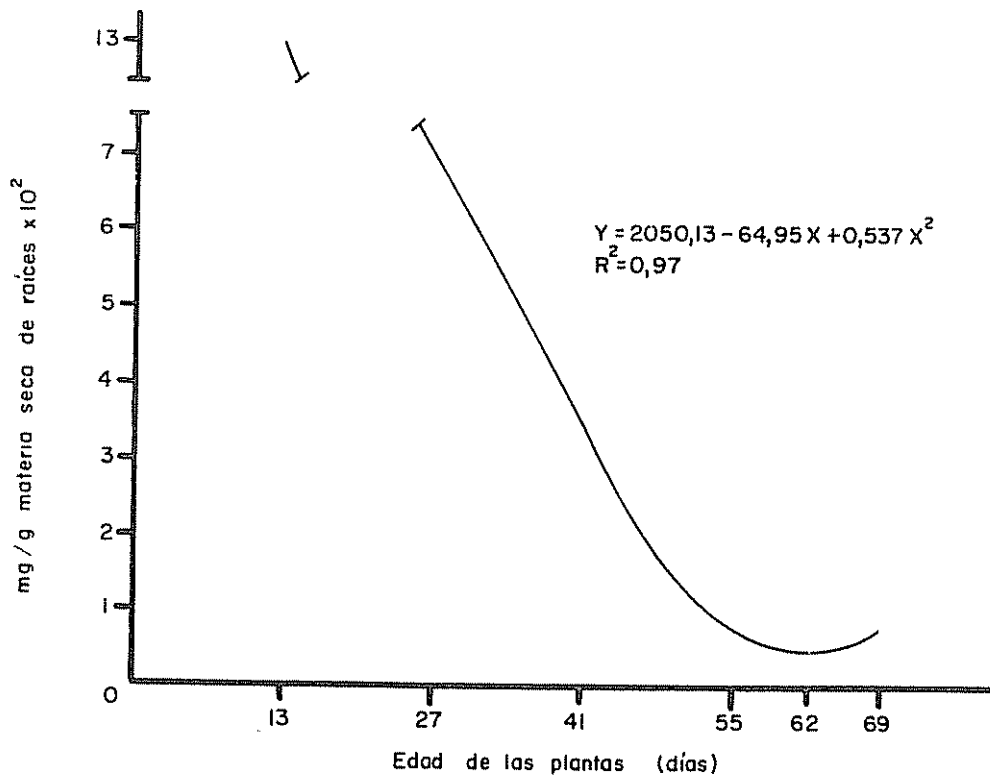


Fig. 26 Variación de la absorción de nitrógeno por gramo de materia seca de raíces durante el ciclo de vida de plantas de frijol var "Turrialba-4"

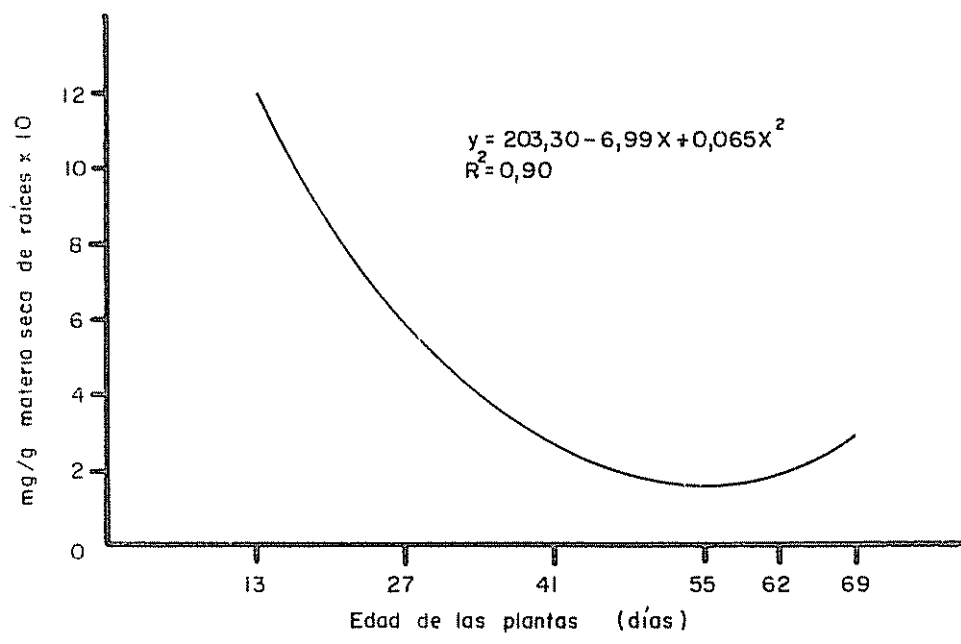


Fig 27 Variación de la absorción de azufre por gramo de materia seca de raíces durante el ciclo de vida de plantas de frijol var "Turrialba-4"

4.3.4 Absorción de Azufre.

La absorción total de S por planta aumenta en forma lineal hasta los 55 días cuando se observa una pequeña disminución que ocurre entre los 55 y 62 días y aumenta al final del ciclo (Fig. 23).

La absorción por gramo de peso seco de raíz disminuye progresivamente hasta los 62 días; esta variación se ajusta a un modelo de regresión cuadrática de ecuación: $y = 203,30 - 6,99x + 0,065x^2$ con un $R^2 = 0,90$ (Fig. 27).

4.4. Análisis de Tejidos.

4.4.1 Nitrógeno.

El porcentaje de N en las hojas se mantiene más o menos constante hasta los 41 días de edad y luego empieza a disminuir hasta el final del ciclo (Fig. 28). En las raíces aumenta de los 13 a los 27 días y hacia el final del ciclo. La disminución del porcentaje de N en los tallos con la edad se realiza en forma continua. En los frutos el N varió poco estando su concentración cerca del 2,7% (Fig. 34).

4.4.2 Fósforo.

El contenido de P es muy elevado en las raíces, como puede observarse en la Fig. 29, y empieza a disminuir rápidamente cuando las plantas comienzan a desarrollar la gúfa (a los 27 días de edad aproximadamente). La variación continua que se observa en los tallos y en las hojas indica que este elemento no se acumula y es movilizado rápidamente a los órganos en formación. El porcentaje de P en los frutos está cerca del 0,5% (Fig. 35) y su concentración varía poco con la edad pero como su peso seco total aumenta mucho en poco tiempo el P total aumenta con el proceso de maduración.

Cuadro 7. Porcentaje de macro-elementos en base a materia seca contenidos en Raíces (R), Tallos (T), Hojas (H), y Frutos (F) de frijol Var 'Turrialba-4', adiferentes edades (datos promedio de cinco plantas).

Edad (Días)	N				P				K			
	R	T	H	F	R	T	H	F	R	T	H	F
13	4,74	4,84	5,56		2,39	0,89	0,95		7,00	5,80	5,85	
27	5,19	3,84	5,56		2,29	0,86	0,76		7,85	5,58	5,63	
41	3,63	2,57	5,39		1,20	0,62	0,61		1,55	5,97	4,93	
55	2,92	1,17	3,48	3,05	0,51	0,28	0,37	0,54	4,75	2,75	2,88	2,80
62	3,51	0,90	3,08	2,41	0,51	0,18	0,29	0,42	5,26	2,51	4,16	1,95
69	2,41	0,72	2,89	2,82	0,27	0,15	0,26	0,47	2,55	2,95	4,40	2,45

Edad (Días)	Ca				Mg				S			
	R	T	H	F	R	T	H	F	R	T	H	F
13	0,47	0,53	1,26		0,52	0,23	0,46		1,13	0,52	0,19	
27	0,34	0,64	1,70		0,21	0,20	0,55		0,70	0,33	0,37	
41	1,07	0,79	3,30		0,80	0,27	0,77		0,59	0,31	0,37	
55	0,70	0,76	2,97	0,62	0,28	0,29	0,62	0,53	1,13	0,30	0,27	0,27
62	0,78	0,64	3,32	0,60	0,32	0,70	0,60	0,30	0,81	0,20	0,25	0,20
69	0,97	0,80	4,26	0,62	1,85	0,21	0,62	0,29	1,51	0,25	0,30	0,23

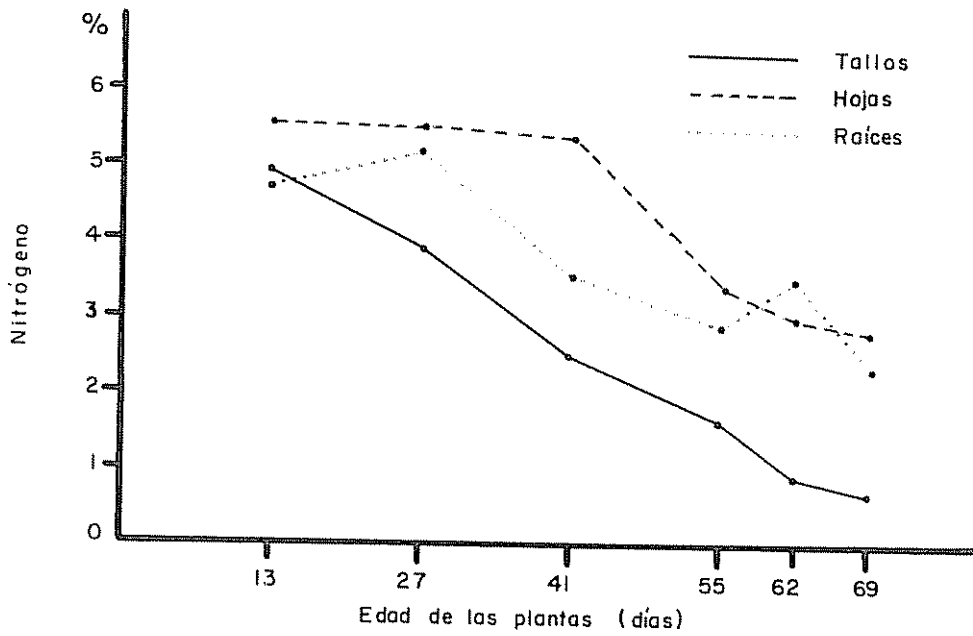


Fig 28 Variación en el porcentaje de nitrógeno en raíces, tallos y hojas de frijol var. "Turrialba-4" en relación con la edad

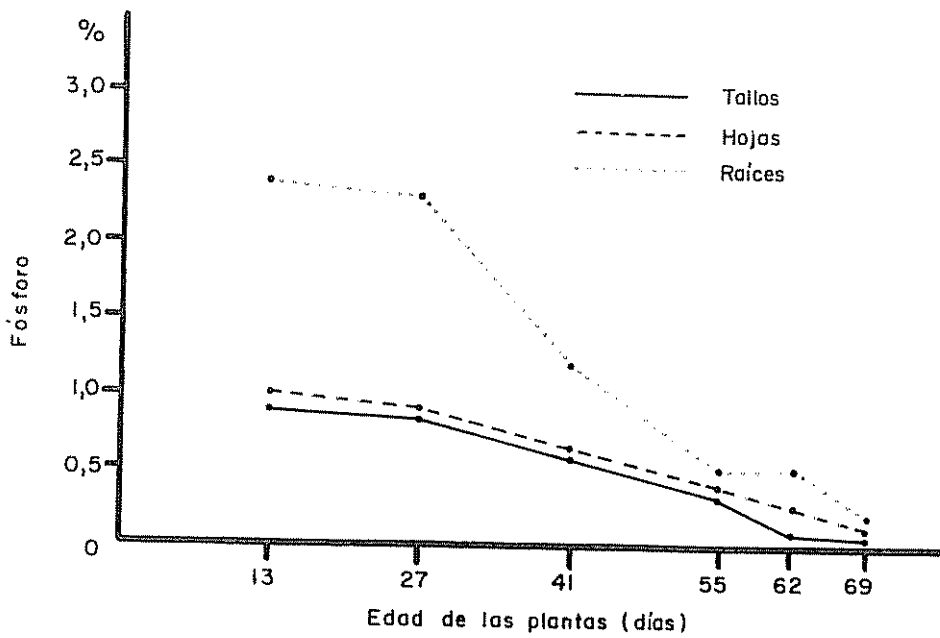


Fig. 29 Variación en el porcentaje de fósforo en raíces, tallos y hojas de frijol var. "Turrialba-4" en relación con la edad

4. 4. 3 Potasio.

El porcentaje de K es mayor en las raíces hasta los 27 días de edad (Fig. 30), cuando disminuye bruscamente para aumentar durante la fructificación y maduración; en las hojas y tallos comienza a disminuir a los 27 días y aumenta durante la maduración de los frutos. El contenido de K en raíces tallos y hojas fue mayor en porcentaje que el de cualquier otro elemento. El contenido de este elemento en los frutos varió poco, siendo su concentración de aproximadamente 2.5% (Fig. 34).

4. 4. 4 Calcio.

Como puede observarse en la Fig. 31 el Calcio se acumula en forma progresiva en las hojas hasta los 41 días y empieza a disminuir ligeramente durante el período de crecimiento de los frutos para aumentar nuevamente durante la maduración de los frutos. En los tallos no hay variación apreciable en el contenido de Ca con la edad de la planta manteniéndose su porcentaje cerca de 0,7 hasta el final del ciclo de vida.

El contenido de Ca es de aproximadamente 0,6% en los frutos y esta concentración cambia poco con su edad (Fig. 35).

4. 4. 5 Magnesio.

La variación en el contenido de Mg en las raíces es muy notable (Fig. 32) y con concentraciones altas a los 41 días y después a los 69 días. En las hojas se mantiene casi constante a través del ciclo y en los tallos hay tendencia a la acumulación durante la maduración de frutos y llega a tener 0,21% al final del ciclo lo cual es bajo comparado con el 1,85% de los frutos y el 0,62% de las hojas. El porcentaje de Mg en los frutos decae con la maduración (Fig. 35).

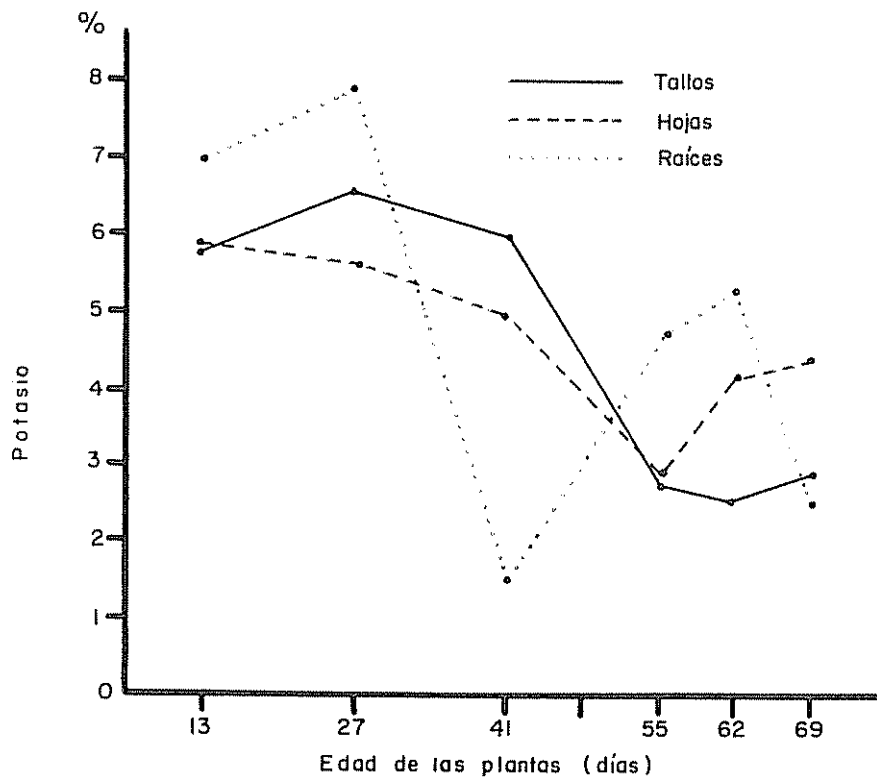


Fig 30 Variación en el porcentaje de potasio en raíces, tallos y hojas de frijol var "Turrialba-4" en relación con la edad

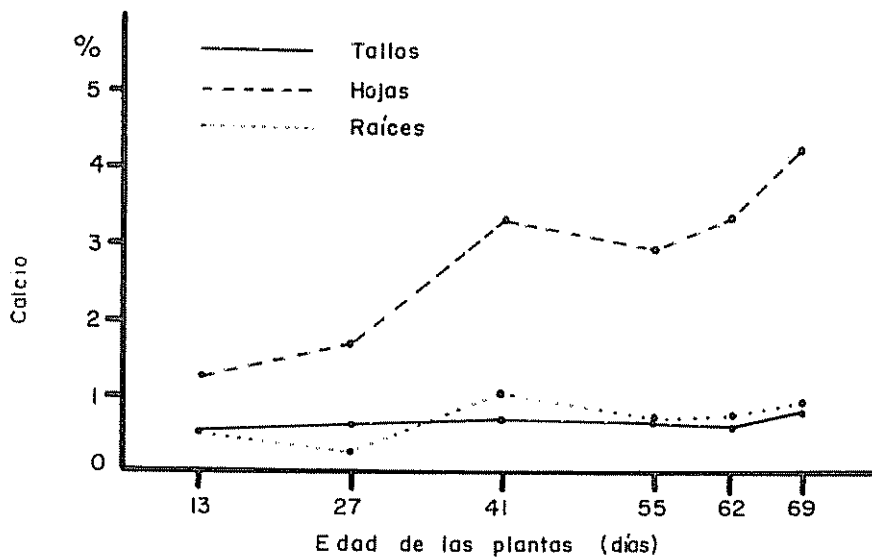


Fig. 31 Variación en el porcentaje de calcio en raíces, tallos y hojas de frijol var. "Turrialba-4" en relación con la edad

4.4.6 Azufre.

El contenido de S es relativamente elevado en las raíces como puede observarse en la Fig. 33; en los tallos y en las hojas su variación es poco notable y las concentraciones en ambos órganos en las diferentes edades es parecida, aproximadamente al 0,3% como promedio. En los frutos también el S varía poco con la edad manteniéndose en aproximadamente 0,25 (Fig. 35).

4.5. Relación entre la Producción de materia seca y la absorción de nutrientes.

La relación entre el aumento de materia seca total y la absorción de nutrientes se ajusta para todos los elementos considerados a modelos de regresión logarítmicos de alta significación como puede observarse en las Figs. 36 y 37. La obtención de curvas sigmoidales para la relación materia seca-nutrientes absorbidos indica que el status nutricional de la planta estuvo en condiciones óptimas a lo largo del ciclo. De acuerdo con Steenbjerg (52) cuando se presenta deficiencia de algún elemento o variaciones desfavorable en el balance de nutrientes, la curva se desvía de la forma sigmoidal que es precisamente la curva normal de crecimiento a través del tiempo.

La similitud entre las ecuaciones de regresión para el azufre y el fósforo indican que la utilización de estos elementos sigue un patrón similar. La matriz de correlación para el ICR, IAN y el IAF en relación con el porcentaje de N, P, K, Ca, Mg y S en las hojas para los diferentes períodos de crecimiento se presenta en el Cuadro 8.

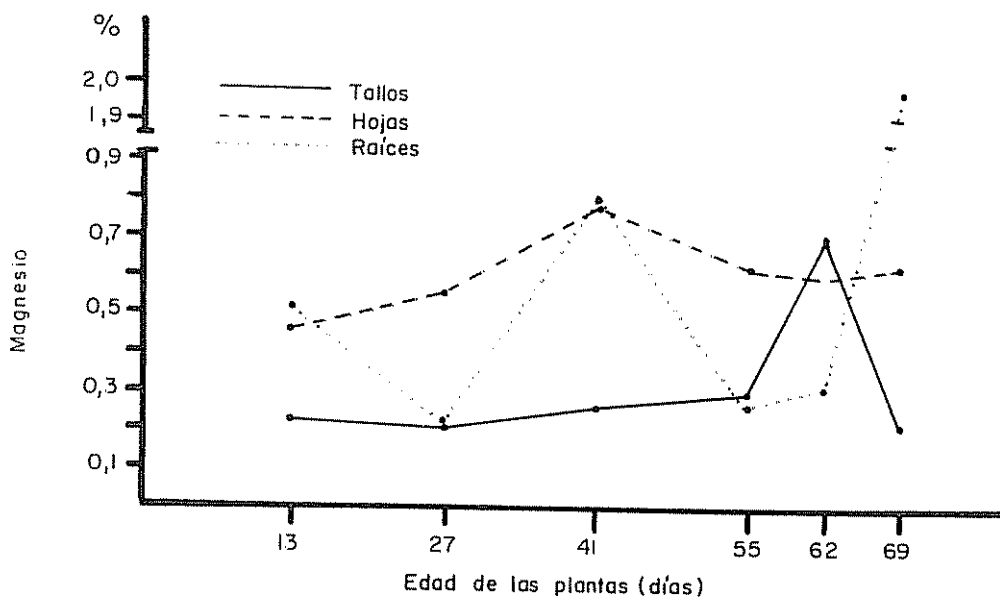


Fig. 32 Variación en el porcentaje de magnesio en raíces, tallos y hojas de frijol var. "Turrialba-4" en relación con la edad

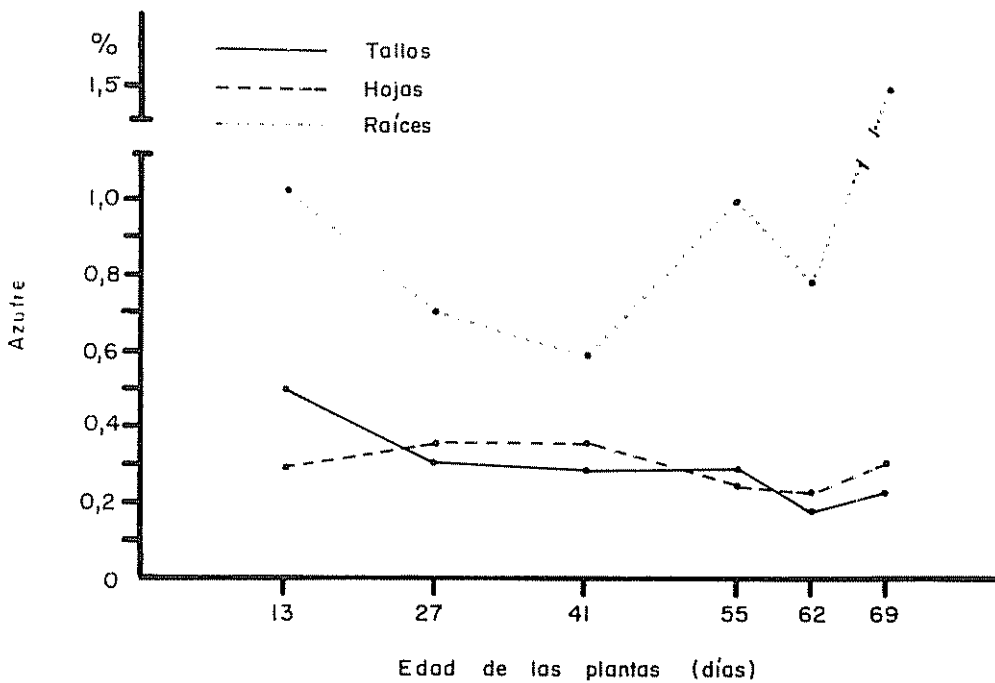


Fig. 33 Variación en el porcentaje de azufre en raíces, tallos y hojas de frijol var. "Turrialba-4" en relación con la edad

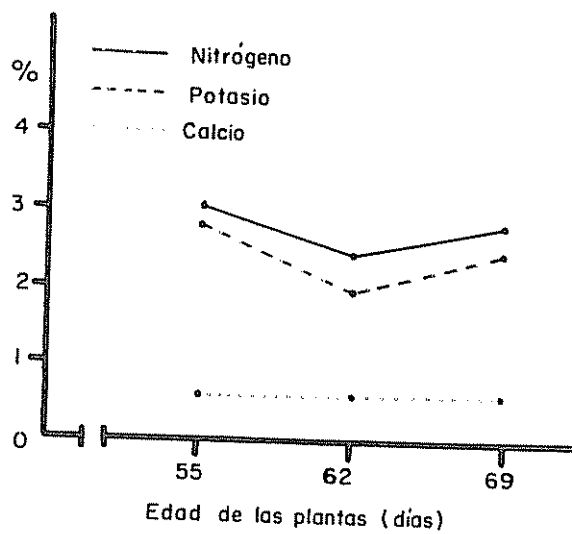


Fig. 34 Variación en el porcentaje de nitrógeno, potasio y calcio en los frutos de frijol var. "Turrialba-4" en relación con la edad

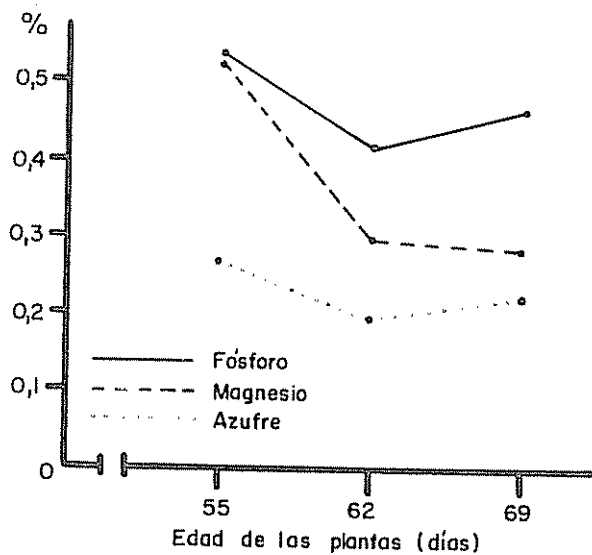


Fig. 35 Variación en el porcentaje de fósforo, azufre y magnesio en los frutos de frijol var. "Turrialba-4" en relación con la edad

4.6. Relación entre la Producción de Materia Seca y el Porcentaje de Nutrientes en la Planta.

Para todos los nutrientes se observa una disminución de su concentración en los tejidos de la planta con el aumento en la producción de materia seca con la edad. (Figs. 38, 39). La única excepción bien establecida es para el calcio el cual se acumula en las hojas debido a su poca movilidad. El incremento que se observa en las curvas para el azufre y el magnesio se debe a la tendencia del primero de acumularse en las raíces al final del ciclo y al contenido elevado de Mg en los frutos antes de que se produzca la degradación de la clorofila como consecuencia de la maduración.

4.7. Componentes del Rendimiento.

Los componentes primarios del rendimiento para el frijol se expresan a través del número de frutos por planta, número de semillas por fruto, peso de 100 semillas y peso de semillas por planta (rendimiento). Las variedades del frijol varían ampliamente respecto a los componentes individuales del rendimiento, en el caso de la variedad 'Turrialba-4', los valores obtenidos en las condiciones del experimento se detallan en el Cuadro 9.

4.7.1 Número de Frutos por Planta.

El número promedio de frutos por planta fue de 64,65 con un promedio de frutos vanos de 1,76. La planta con mayor número de frutos produjo 84 frutos y la de menor 36 frutos encontrándose la siguiente distribución:

entre 30-40 frutos: 2 plantas

entre 40-50 frutos: 5 plantas

entre 50-60 frutos: 2 plantas

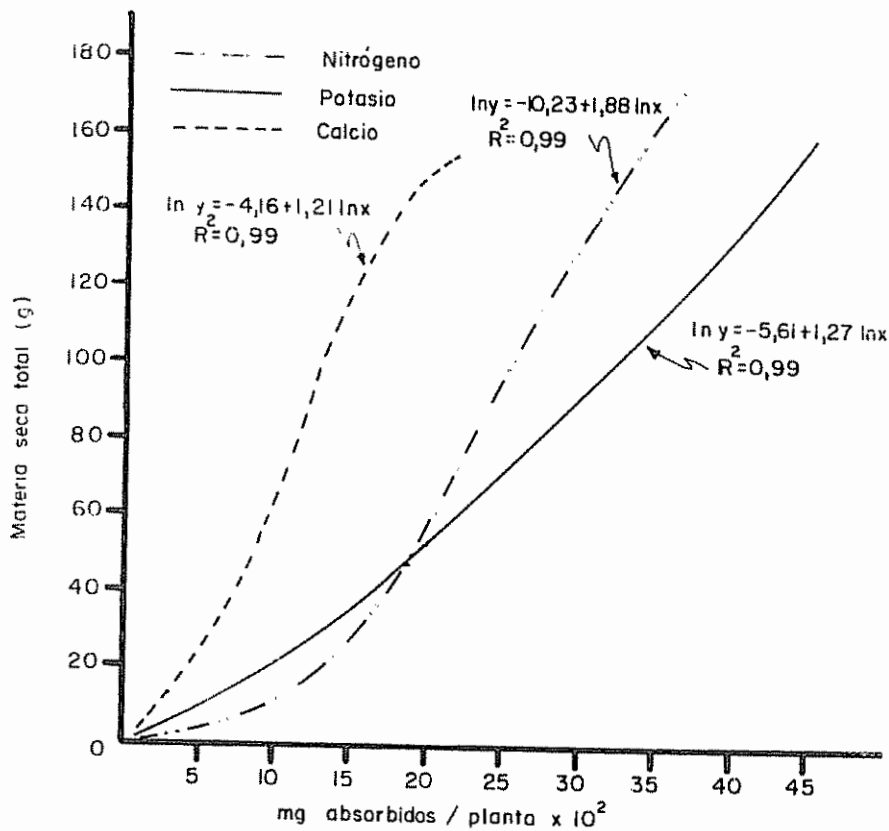


Fig 36 Variación de la materia seca total en relación con la cantidad de nitrógeno, potasio y calcio absorbidos por plantas de frijol var. "Turrialba-4"

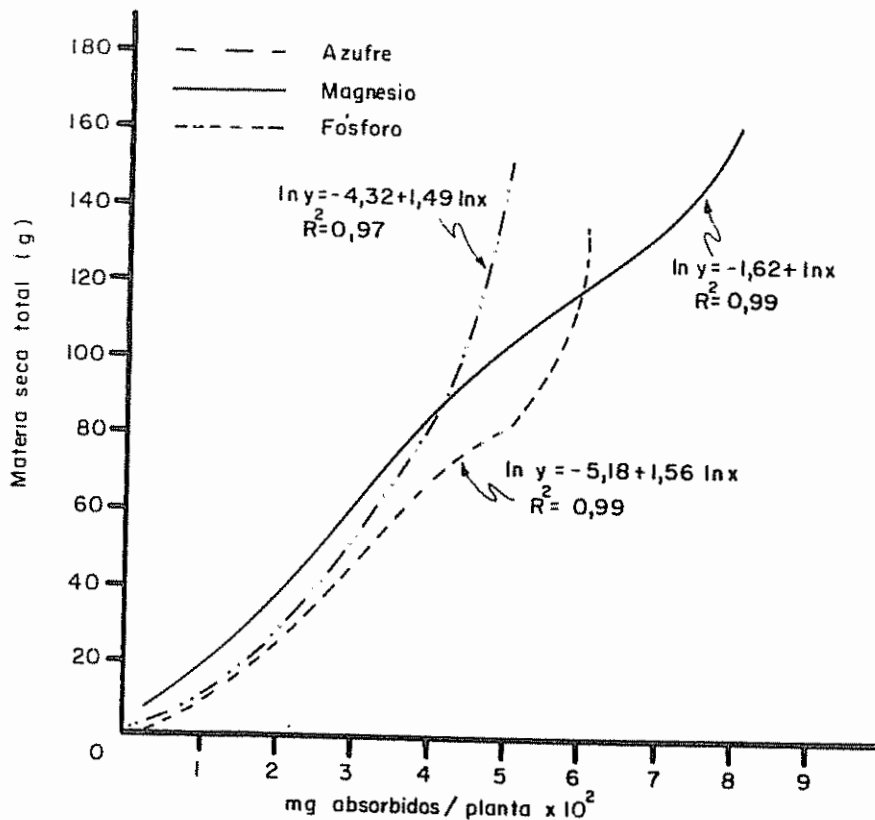


Fig 37 Variación de la materia seca total en relación con la cantidad de fósforo, azufre y magnesio absorbidos por plantas de frijol var. "Turrialba-4"

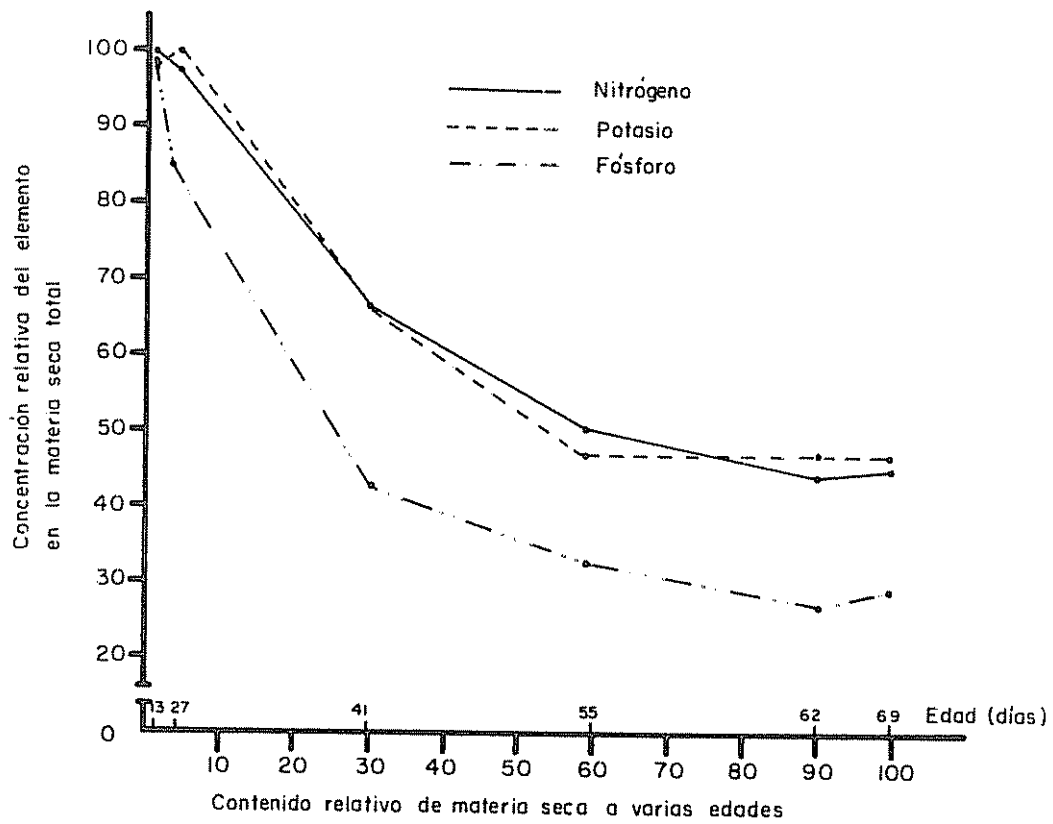


Fig 38 Relación entre la concentración relativa de N, P y K y el contenido relativo de materia seca a varias edades en el frijol var. "Turrialba-4"

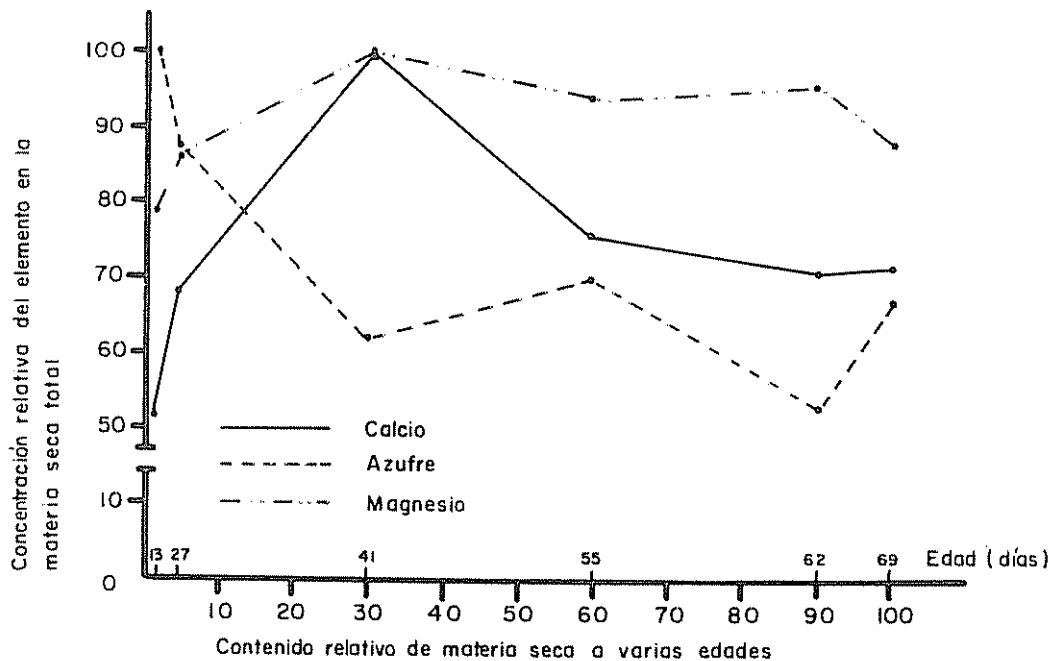


Fig 39 Relación entre la concentración relativa de Ca, Mg y S y el contenido relativo de materia seca a varias edades en el frijol var. "Turrialba-4"

Cuadro 8. Matriz de correlación para índices de crecimiento y porcentajes de nutrimentos en las hojas de frijol var 'Turrialba-4'.

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
X ₁	1,00								
X ₂	0,18	1,00							
X ₃	0,66	0,69	1,00						
X ₄	0,33	0,97	0,70	1,00					
X ₅	0,35	0,90	0,82	0,87	1,00				
X ₆	0,51	0,90	0,72	0,95	0,89	1,00			
X ₇	-0,37	-0,69	-0,39	-0,80	-0,42	-0,73	1,00		
X ₈	-0,68	0,26	-0,00	0,07	0,31	-0,04	0,40	1,00	
X ₉	-0,19	-0,99	-0,66	-0,98	-0,90	-0,92	0,70	-0,24	1,00

X₁ = IAN X₄ = % P X₇ = % Ca

X₂ = % N X₅ = % S X₈ = % Mg

X₃ = % K X₆ = ICR X₉ = IAF

entre 60-70 frutos: 6 plantas

entre 70-80 frutos: 12 plantas

entre 80-90 frutos: 1 planta

el 40,7% de las plantas muestreadas en este trabajo tuvieron entre 70 y 80 vainas por planta.

4.7.2 Número de semillas por fruto:

El promedio encontrado para el número de semillas por fruto fue de 7,15. El número de semillas por fruto estuvo distribuido de la siguiente manera:

Frutos con 9 semillas	4,5%
Frutos con 8 semillas	40,9%
Frutos con 7 semillas	31,6%
Frutos con 6 semillas	16,6%
Frutos con menos de 6 semillas	6,6%

4.7.3 Peso de 100 semillas.

El peso promedio para 100 semillas obtenido de tres determinaciones efectuadas al azar entre el número total de semillas fue de 21,60 gramos.

4.7.4 Peso de semillas por planta (rendimiento).

El rendimiento promedio que se obtuvo en las condiciones de este experimento fue de 83,5 g/planta. El rendimiento estuvo distribuido en la siguiente forma:

Cuadro 9. Componentes del rendimiento para plantas de frijol var 'Turrialba-4' cultivado en solución nutritiva (valores promedio de 28 plantas).

Número de vainas por planta	64,65
Número de semillas por vaina	7,15
Peso de 100 semillas	21,60 g
Peso total de semillas por planta	83,5 g
Número total de semillas por planta	462,25

Plantas entre 50 y 60 g	2
Plantas entre 60 y 70 g	1
Plantas entre 70 y 80 g	6
Plantas entre 80 y 90 g	10
Plantas entre 90 y 100 g	9

4.8. Absorción de Agua.

Con los datos de absorción de agua registrados a través de todo el experimento se obtuvo la cantidad de agua absorbida por la planta en su ciclo de vida. En la Fig. 40 se muestra la variación en el consumo de agua por día para 10 semanas de crecimiento; entre las semanas cuarta y quinta, cuando se inició la floración, se produjo un aumento en la absorción de agua llegando a absorberse hasta 7000 ml de agua por día lo cual implicó una reposición constante de diferentes horas del día del volúmen de agua perdida por planta en cada uno de los recipientes. Esto fue especialmente aparente en aquellos días en que tanto la temperatura como la radiación solar tuvieron valores elevados.

En general en horas del mediodía cuando la temperatura dentro del invernadero alcanzó hasta 34°C, las plantas en estado adulto absorbían la mitad del agua contenida en los recipientes (4 litros) , el consumo máximo por día se presentó durante el crecimiento y la maduración de los frutos, a partir de ese momento la absorción de agua fue disminuyendo hasta hacerse casi nula a medida que las hojas de la planta entraban en senescencia.

La absorción de agua total por planta de frijol durante el ciclo de vida del cultivo en las condiciones de este experimento fue de 252 litros.

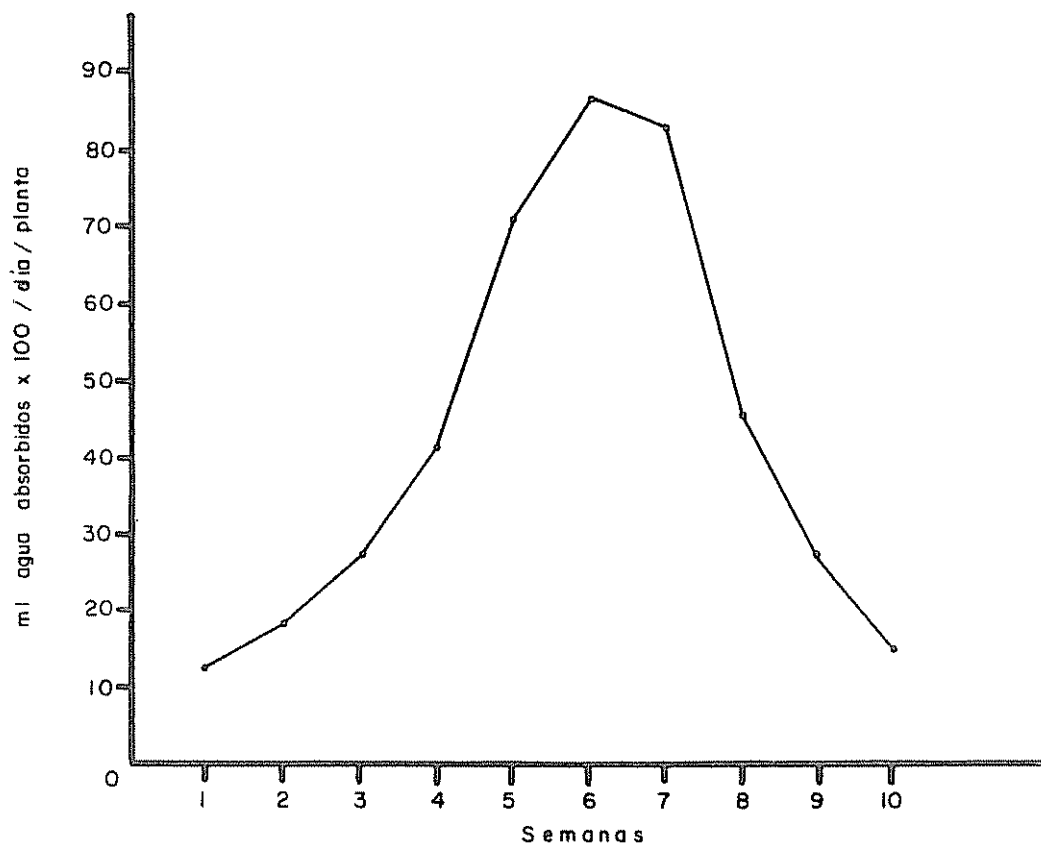


Fig 40 Absorción de agua por el frijol var. "Turrialba-4" durante su ciclo de vida (Valores promedio de 7 días y obtenidos de 5 plantas por día)

Cuadro 10. Contenido de macro-elementos en por ciento de materia seca total y porcentajes relativos a sus valores máximos (se incluyen los totales de materia seca (M.S.) y sus correspondientes porcentajes relativos)

Edad (Días)	N		P		K		Ca		Mg		S		M.S.	
	%	Relativo %	%	Relativo %	%	Relativo %	%	Relativo %	%	Relativo %	(G)	%		
											Total	Relativo		
13	5,26	100	1,22	100	6,05	98	0,96	52	0,39	79	0,47	100	0,53	0,3
27	5,16	98	1,03	84	6,18	100	1,26	68	0,42	86	0,41	87	6,18	4
41	3,50	66	0,53	43	4,10	66	1,85	100	0,49	100	0,29	62	49,29	30
55	2,61	50	0,40	33	2,94	47	1,41	76	0,46	94	0,33	70	96,08	59
62	2,31	44	0,33	27	2,88	47	1,32	71	0,47	96	0,25	53	154,74	95
69	2,35	45	0,35	29	2,91	47	1,33	72	0,43	88	0,32	68	163,07	100

5. DISCUSION

5.1. Relaciones entre los índices y el crecimiento.

Las variaciones sin tendencia definida observadas en el Índice de Asimilación Neta (IAN) están aparentemente relacionadas con la alternancia entre días nublados y días despejados lo cual influye en los procesos de asimilación de la planta a través del Índice de Área Foliar (IAF) que en unos casos será subóptimo y en otros supraóptimo para el aprovechamiento de la luz. Los valores más bajos obtenidos para el IAN corresponden a los períodos caracterizados por una baja radiación, estos pueden observarse en la Fig. 2 y en el Cuadro 4. Con los valores elevados de radiación no se notó esta relación probablemente debido a que las máximas de radiación estuvieron acompañadas de noches frías. Los valores elevados del IAN que se registran en las primeras semanas de crecimiento del cultivo (Cuadro 4), corresponden a un período de mayor radiación y temperatura además de la condición favorable de la planta de tener un menor número de hojas que disminuye el autosombreamiento.

Los valores del Índice de Asimilación Neta y el Índice de Crecimiento Relativo que reporta la literatura (25, 27) para variedades de frijol altamente productoras en condiciones de campo y de radiación solar elevada, (mayor de $400 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$), son para el ICR promedio $0,052 \text{ g/g/día}$ y para el IAN promedio $3,80 \text{ g/dm}^2/\text{día}$. Este valor, sumamente elevado para el IAN, se obtuvo en condiciones de campo y con dos aplicaciones de nitrógeno en la fase vegetativa del cultivo.

Alvim (1) presenta como dato informativo valores promedio de estos dos índices para algunas plantas cultivadas, entre ellas el frijol, con un ICR de 0,097 g/g/día y un IAN de 0,035 g/dm²/día en condiciones de campo. Los valores encontrados para frijol en solución nutritiva y las condiciones de invernadero de este experimento (Cuadro 4) corresponden a un IAN promedio de 0,0345/g/dm²/día y un ICR promedio de 0,095 g/g/día los cuales son valores muy similares a los que cita Alvim como los típicos para el frijol pero muy diferentes a los encontrados por Magalhaes y Montojos en Brasil (25), a lo cuales hemos hecho referencia anteriormente.

Probablemente el factor responsable, en nuestro caso, del menor valor del IAN en relación con los datos de los dos últimos investigadores fue la radiación solar, ya que el promedio en el invernadero fue de 185 cal/cm²/día que correspondió a la mitad del valor de radiación que prevaleció en los trabajos citados. Por otra parte no se debe descartar la posibilidad de que existieron diferencias en la capacidad genética de aprovechar la energía radiante por las diferentes variedades de frijol.

En relación con el aspecto genético, Heath y Gregory (15) estudiando diferentes especies de plantas en distintas condiciones ambientales, establecieron que existe constancia en el IAN durante la fase vegetativa de los cultivos anuales. De acuerdo con estos autores el IAN, en esta fase, no es una magnitud muy variable en su naturaleza, ya que la cantidad neta de CO₂ utilizada por unidad de área foliar es una característica intrínseca de la planta y las variaciones en la asimilación dependen de la intensidad de la luz y la temperatura. Sean cuales fueren los mecanismos involucrados en las variaciones que presenta el IAN el hecho de que plantas tan diferentes

como cebada, tomate, algodón, magnolias, etc., que fueron las estudiadas por Heath y Gregory en lugares tan distintos como Inglaterra y Africa en el campo y el invernadero, mantengan su valor característico del IAN durante la fase vegetativa del crecimiento nos permite suponer que efectivamente se trata de una característica genética del cultivo.

Las variedades que citan Magalhaes y Montojos (25) como altas productoras se caracterizaron por un IAN muy elevado y un ICR bajo, lo cual se explica por la menor área foliar del cultivo ya que el IAF máximo encontrado por estos autores fue de 3,0 - A la luz de estos resultados es evidente que las condiciones en que se desarrolló el experimento aquí descrito favorecieron el crecimiento del área foliar a través de la formación de nuevas hojas y de su expansión; esto se manifiesta en la relación estrecha que existe entre los valores encontrados para el Índice de Crecimiento Relativo total (ICR) y el Índice de Crecimiento Relativo del Area Foliar (ICR_L) durante el período vegetativo del cultivo lo que repercute en una Razón de Peso Foliar (RPF) y una Razón de Area Foliar (RAF) muy elevadas y un IAN bajo debido al auto sombreadamiento (Cuadro 4).

El aumento en peso seco total de la planta y la utilización de la materia seca producida en el metabolismo se traduce en una producción acelerada de hojas que sobrepasa el óptimo necesario para lograr un mayor aprovechamiento de la luz por unidad de área foliar. Esto se manifiesta en el valor de 2 obtenido en este trabajo como óptimo para el Índice de Area Foliar (IAF) como puede observarse en la Fig. 20 en la que se grafica el IAF vs. ICR. Sin embargo, el IAF máximo obtenido entre el trabajo fue de 7,06 como se aprecia en el Cuadro 4.

Teniendo en cuenta que el ICR de un cultivo es la resultante del producto del IAN x RAF (31) en el caso del frijol el ICR elevado se debe que la RAF es elevada y no al IAN aunque no puede descartarse el efecto positivo de los altos valores en el Índice de Asimilación Neta al inicio del período de crecimiento a los que nos hemos referido con anterioridad.

Solo en los primeros días de crecimiento las hojas de la planta no están en competencia por luz y la rata de crecimiento del cultivo depende del área foliar inicial de la planta y por lo tanto de un IAN elevado. La reducción posterior en los valores del IAN se debe a que los frijoles producen un exceso de área foliar que resulta en una eficiencia baja por decímetro cuadrado de hoja aunque el aprovechamiento total de la luz por la comunidad, considerada como un todo, es elevado justamente por el área foliar elevada. En estas condiciones el ICR y el rendimiento del frijol estarán determinados por la Razón de Area Foliar y no por el Índice de Asimilación Neta; esto está de acuerdo con los resultados obtenidos por Blackman en Fagopyrum (6) donde al igual que en el caso del frijol, los valores bajos encontrados para el IAN están compensados por una RAF elevada que resulta en un ICR elevado para el cultivo.

La ventaja para el cultivo de tener una RAF elevada parece ser que los productos de la fotosíntesis se utilizan en la respiración de una menor proporción de tejidos que no realizan fotosíntesis lo cual elimina el catabolismo acelerado de los fotosintetizados que es una forma de influir sobre el balance anabolismo/catabolismo en favor del primero.

Por otra parte el área foliar específica que permanece elevada durante casi todo el ciclo de vida del cultivo con un valor promedio de $4,23 \text{ dm}^2/\text{g/sem}$ indica que las hojas son delgadas con un espesor promedio de

0,238 g/dm² que evidentemente es un indicio del poco peso de tejidos por dm² de área foliar. Dado que las correlaciones entre el ICR, ICR_L y RAF son altamente significativas como puede observarse en la matriz de correlación de los diferentes índices (Cuadro 5), podemos establecer que para el frijol la Razón de Area Foliar (RAF) es el índice más estrechamente relacionado con las variaciones en el crecimiento del cultivo. En relación con este punto, Wallace y Munger (36) trabajando con seis variedades de frijol consideran que un área foliar y una RAF elevados determinan conjuntamente los rendimientos en grano de la planta.

Todo parece indicar que para el frijol la intensidad de fotosíntesis neta depende del tamaño del aparato fotosintético, esto es del área foliar total, la cual es responsable de las diferencias en la producción de materia seca, o sea, una RAF elevada determina una elevada producción de materia seca (8). La correlación entre ambos parámetros es altamente significativa lo cual puede observarse en el valor de $r = 0,87$ para la correlación entre el Índice de Crecimiento Relativo (ICR) y la Razón de Area Foliar (RAF) (Cuadro 5).

5.2. Relaciones entre el Crecimiento y la Nutrición Mineral.

En relación con los aspectos nutricionales de las plantas de frijol estudiadas podemos observar lo siguiente: Con excepción del Calcio, el porcentaje de nutrimentos en las hojas y en los tallos se mantuvo constante o disminuyó con la edad (Cuadro 7 y Fig. 31). La concentración de Potasio absoluta tanto en las hojas como en los tallos fue mayor durante las primeras semanas de crecimiento comparado con el cualquier otro elemento, sin embargo, como en esas semanas los tallos no aumentan el peso tan

rápidamente como las hojas debe de existir un rápido abastecimiento de este elemento desde las raíces a otras partes de la planta. En general se ha establecido para un gran número de plantas (30) que el K se absorbe en cantidades mucho mayores a las necesarias para el funcionamiento normal de los tejidos especialmente si este es abundante en el medio de cultivo lo cual explica en parte las cantidades elevadas de este nutrimento encontrado en las plantas de frijol.

La variación del porcentaje de nutrimentos en la raíz del frijol no es continua con la edad y se presentan grandes fluctuaciones en todos los elementos con excepción del fósforo y del calcio cuya concentración bajó o se mantuvo constante con la edad de la planta. Diversos autores (3, 4) establecen que hay algo de retención de fósforo en las raíces del frijol lo cual fue aparente también en este caso ya que los tejidos de la raíz presentaron a través del ciclo un mayor porcentaje de fósforo que las hojas y los tallos (Fig. 29 y Cuadro 7).

La distribución de los nutrimentos en la planta se debe a que con excepción del calcio y el azufre el resto de los elementos estudiados son móviles dentro de la planta; los máximos de acumulación corresponden al inicio de períodos de gran demanda de nutrimentos (floración y maduración) por los demás órganos siendo rápidamente translocados al resto de la planta. Esto puede observarse mediante el análisis de las figuras que representan aumento en concentración de nutrimentos en tejidos vegetales y absorción a partir de la solución nutritiva respectivamente.

El porcentaje de azufre presenta fluctuaciones muy marcada en las raíces y se acumula hacia el final del ciclo de la planta. Esta distribución

irregular del azufre puede deberse a que este elemento se inmoviliza en los tejidos de la raíz como resultado de las reacciones metabólicas y no presenta por ello fluctuaciones muy marcadas en las hojas y en los tallos. En condiciones de cultivo en solución nutritiva las raíces del frijol acumulan gran cantidad de azufre comparado con las hojas y los tallos lo cual contrasta con los resultados de Biddulph et al. (5) quienes establecen que el frijol tiene poco azufre en los tejidos de la raíz en comparación con los del tallo y las hojas.

El análisis de la relación entre el porcentaje relativo de nutrimentos totales en los tejidos de la planta y el de la materia seca producida en cada intervalo de tiempo durante el crecimiento (Cuadro 10) muestra que para los elementos nitrógeno, el fósforo y potasio se obtienen curvas decrecientes con el aumento neto en materia seca con la edad (Fig. 38). El porcentaje de Calcio y Azufre fluctua mucho con el aumento en peso seco con la edad (Fig. 39) y la concentración de magnesio permanece más o menos constante. El análisis de estas relaciones indica que al tomar muestras de tejido vegetal con fines de diagnóstico de deficiencias es de gran importancia el período en el cual se realiza dicho análisis ya que las fluctuaciones fueron grandes a pesar de que las plantas estuvieron permanentemente bien nutridas.

En general, y para todos los elementos excepto Calcio y Magnesio (Fig. 34 y 35) se observó una disminución de su concentración en los frutos de los 55 a los 62 días aumentando posteriormente de los 62 a los 69 días. Estas variaciones de concentración de nutrimentos en los frutos podría ser consecuencia de los procesos asociados con la maduración.

Las relaciones nutricionales analizadas desde este punto de vista son consecuencia de dos aspectos del problema: movilidad y utilización de los nutrimentos por los diferentes órganos de la planta una vez incorporados a la raíz.

Como era de esperarse es muy difícil establecer únicamente mediante correlaciones la relación entre los índices de crecimiento, especialmente el IAN, y los elementos nutricionales dada la complejidad de los factores que determinan la eficiencia en la asimilación del carbono por unidad de superficie solar. Sin embargo es evidente el efecto del Potasio sobre el IAN el cual ya ha sido considerado por Gregory citado por Watson (39), y que para el frijol resulta en nuestro caso con un coeficiente de correlación positivo de 0,66 (Cuadro 8). Esto implica que el potasio tiene funciones específicas relacionadas con el proceso fotosintético como fue explicado por Watson (39), al analizar las causas fisiológicas de la variación en el rendimiento en materia seca producida por diferentes niveles nutricionales de este elemento. La correlación encontrada entre el IAN y el magnesio ($r = -0,68$) (Cuadro 8), es más compleja de analizar en base a estos resultados; sin embargo, es importante que los dos elementos que mostraron relación significativa con el IAN tienen gran importancia en el mecanismo de asimilación del carbono.

El ICR mostró correlaciones significativas con todos los nutrimentos presentes en la hoja (Cuadro 8); esto se explica por el hecho de que este índice mide en forma global la totalidad de la marcha del crecimiento y no un aspecto del mismo y al no ser tan específico como el IAN se encuentra correlación con todos los factores que influyen en la marcha de ese proceso. En todos los casos, la correlación fue positiva lo cual indica que,

dentro de los límites considerados, el aumento o la disminución de alguno de los nutrimentos tendrá iguales consecuencias en el proceso del crecimiento.

La correlación altamente significativa del IAF con el contenido de nitrógeno en la hoja es el resultado del efecto directo de este elemento sobre el desarrollo del área foliar; esta correlación ($r = -0,99$) implica que a mayor contenido de nitrógeno menor es el IAF. Esto podría deberse a que en los primeros estados del crecimiento, el nitrógeno está incluido en pocas hojas o que estas son más pequeñas y que a medida que aumenta la expansión foliar y debido a la movilización, este elemento disminuye como porcentaje del total aunque la superficie foliar sea elevada lo cual es más aparente cuando el IAF sobrepasa el valor de 5,0. Los nutrimentos que mostraron un mayor efecto sobre el área foliar, medido a través de su correlación con el IAF, fueron $N > P > S > Ca > K$; para el Mg la correlación no fue significativa. En todos los casos el coeficiente de correlación fue negativo a excepción del calcio: el efecto de este elemento sobre el IAF radica en la concentración del mismo en las hojas a la que nos hemos referido anteriormente la cual aumenta o disminuye en relación directa con el área foliar total.

Considerando que el aumento en materia seca total y para los diferentes órganos de la planta obtenidos en esta investigación duplican las cantidades obtenidas por Masaya (26) y por Loayza (23) para componentes primarios del rendimiento número de vainas por planta y rendimiento por planta (en gramos de granos secos totales producidos) trabajando con la

misma variedad, se consideró conveniente tratar de explicar el origen de estas diferencias.

La luminosidad y la radiación solar medida dentro del invernadero en que se realizaron los trabajos anteriormente citados varía alrededor de una media de 17000 lux en días claros despejados y $80 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ respectivamente. Estos valores están muy por debajo a los encontrados en el invernadero donde se realizó el presente trabajo. Basándose en estas consideraciones y teniendo en cuenta que la bibliografía considera $500 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ en el campo como valor promedio de radiación para estudios de productividad (24) y siendo el frijol un cultivo anual de rápido crecimiento es necesario tener en cuenta estos aspectos en la realización de este tipo de estudios.

6. CONCLUSIONES

1. La Razón de Area Foliar (RAF) es el índice de crecimiento que refleja mejor las condiciones de productividad y eficiencia del sistema fotosintético del frijol.
2. El número elevado de hojas por planta, que origina disminución de los valores del IAN por planta, aumenta la eficiencia de la comunidad como un todo.
3. El valor encontrado para el Índice de Area Foliar óptimo fue de dos (2,00) y los valores de IAF por encima de este valor son los responsables de la disminución en el IAN.
4. El nitrógeno es el elemento más importante a considerar en estudios de productividad y rendimiento a través de su efecto sobre el Índice de Area Foliar (IAF).
5. El potasio fue el elemento que presentó mayor correlación con la formación de materia seca por decímetro cuadrado de hoja.
6. Los elementos nutricionales absorbidos en mayor cantidad por la planta fueron Nitrógeno, Potasio y Calcio.
7. El azufre fue el elemento que mostró mayor retención en las raíces de la planta.

7. RESUMEN

Debido a importancia que tiene sobre los rendimiento de cualquier cultivo su eficiencia fotosintética y otras características fisiológicas relacionadas con su crecimiento y desarrollò y en vista de los escasos conocimientos de esta naturaleza que se tienen sobre el frijol, se concibió el presente trabajo con el objetivo de analizar la efectividad de ciertos índices fisio-morfológicos para analizar y evaluar dichas características en Phaseolus vulgaris L. var 'Turrialba-4'.

Las plantas fueron cultivadas en solución Hoagland No. 2 y ubicadas al azar en mesas de un invernadero acondicionado para este sistema de cultivo y con instrumentos climatológicos apropiados. Los datos básicos para poder calcular los índices fueron peso seco y área foliar que se obtuvieron de lotes de cinco plantas muestreadas a intervalos de siete días. Se determinaron también otras características fisiológicas del cultivo que influyen notablemente sobre su crecimiento vegetativo como la absorción y distribución de nutrimentos en la planta.

Los principales índices utilizados para evaluar el crecimiento del frijol fueron ICR, IAN y RAF y su cálculo se hizo de acuerdo a la metodología de Blackman, citado por Watson (38), Análisis de Regresión y Correlación.

Las características del rendimiento (peso de 100 semillas, número de vainas/planta, número semillas/vaina, peso total de semillas/planta) se obtuvieron de 28 plantas que se dejaron llegar a completa madurez manteniendo su espaciamento original.

Se estableció que la eficiencia de una comunidad de plantas de frijol, considerada como un todo, depende de la Razón de Area Foliar (RAF) y

de un número elevado de hojas por planta. Por otra parte el Índice de Crecimiento Relativo del cultivo tuvo un valor promedio de 0,712 g/g/sem, el Índice de Asimilación Neta 0,237 g/dm²/sem y la Razón de Area Foliar 1,92 dm²/g.

Los análisis de correlación mostraron que el nitrógeno es el elemento más importante a considerar a través de su efecto sobre el Índice de Area Foliar. La variación del contenido de nutrimentos en la planta en relación con el aumento en peso seco con la edad es muy marcada para todos los elementos estudiados (N, K, Ca, Mg, P, S) tanto si se considera el peso de los órganos por separado como el peso total de la planta, esto significa que en la realización de análisis químicos con fines de diagnóstico de deficiencias, debe considerarse la edad de la planta.

El rendimiento promedio de 28 plantas fue de 83,5 g/planta y de 64,7 vainas/planta con 7,2 semillas/vaina. El peso de 100 semillas fue de 20,2 g. El mayor número de frutos estuvo ubicado en la base de la planta donde se presentó la mayor ramificación.

7a. SUMMARY

Due to the importance of the photosynthetic efficiency of any crop on its growth and other related physiological characteristics and because of the limited knowledge in that field on beans, the present work has as a main objective to analyze the growth and the photosynthetic efficiency of Phaseolus vulgaris L. var 'Turrialba-4'.

The plants were grown in Hoagland's nutrient solution No. 2 and randomly arranged on tables in a greenhouse conditioned for this system of culture and provided with appropriate climatological apparatus. The basic data for the calculation of the growth indexes were dry weight and leaf area obtained from five plants sampled weekly. Other physiological characteristics that affect the crop's vegetative growth such as absorption and nutrient distribution within the plants were also studied.

The principal parameters used to evaluate the growth of the plant were RGR, NAR and LAR which were calculated using Blackman's methodology of growth analysis, Regression and Correlation.

The yield characteristics (weight of 100 seeds, number of pods per plant, number of seeds per pod, total weight of seeds per plant) were obtained from 28 plants which were not used for analysis until they reached complete maturity.

It was established that the efficiency of a group bean plants, considered as a whole, depended on the LAR and a high number of leaves per plant. Furthermore the Relative Growth Rate reach a mean value of 0, 712 g/g/week,

the Net Assimilation Rate 0, 237 g/dm²/week and the Leaf Area Ratio 1, 92 dm²/g.

The correlation analysis showed that nitrogen was the most important element to consider as far as its effect on the Leaf Area Index was concerned.

There was a good correlation between nutrient content in the plant and the increase in dry weight with age for all the elements (N, K, Ca, Mg, P, S) when organs were weighed as whole or separately. This meant that the age of the plant must be considered in chemical analysis for the diagnosis of deficiencies.

The mean yield of 28 plants was 83, 5 pods/plant and 64, 7 pods/plant with 7, 2 seeds/pod. The weight of 100 seeds was 20, 2g. The highest number of seeds was found at the base of the plant where ramification was most abundant.

8. LITERATURA CITADA

1. ALVIM, P. DE TARSCO. Fisiología del crecimiento y de la floración del cafeto. *Café (Costa Rica)* 2(6):57-64. 1960.
2. ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. Official; methods of analysis. 9a. ed. Washington, D. C. 1960. 1009 p.
3. BIDDULPH, O. et al. Circulation patterns for phosphorus, sulphur and calcium in the bean plant. *Plant Physiology* 33:293-300. 1958.
4. _____, et al. Circulation patterns for P^{32} , S^{35} , Ca^{45} in the bean plant. *Plant Physiology* 33:293-300. 1958.
5. _____, CORY, R. y BIDDULPH, S. F. The absorption and translocation of sulfur in red kidney bean. *Plant Physiology* 31:28-33. 1956.
6. BLACKMAN, G. E. y RUTTER, A. J. Physiological and ecological studies in the analysis of plant environment. II. The interaction between light intensity and mineral nutrient supply in the growth and development of the bluebell (Scilla nonscripta). *Annals of Botany* 11:125-158. 1947.
7. BROUGHAM, R. W. The relationship between critical leaf area, total chlorophyll content and maximum growth rate of some pasture crop plants. *Annals of Botany N. S.* 24:463-474. 1960.
8. DALE, J. E. Some effects of alternating temperatures on the growth of french bean plants. *Annals of Botany* 28:127. 1964.
9. GALLO, J. R. y MIYASAKA, S. Composição química do feijoeiro e absorção de elementos nutritivos de florescimento a maturação. *Bragantia* 20(40):867-884. 1961.
10. GREGORY, F. G. Mineral nutrition of plants. *Annual Review of Biochemistry* 6:557-578. 1937.
11. _____, BAPTISTE, E. C. Physiological studies in plant nutrition V. Carbohydrate metabolism in relation to nutrient deficiency and to age in barley leaves. *Annals of Botany* 50:579-619. 1936.
12. _____, RICHARDS, F. J. Physiological studies in plant nutrition I. The effect of manurial deficiency on the respiration and assimilation rate in barley. *Annals of Botany* 43:119-161. 1929.
13. HAMMOND, L. C. y KIRKHAM, D. Growth curves of soybeans and corns. *Agronomy Journal* 41(1):23. 1949.

14. HAY, R. W., EARLEY, E. B. y DE TURK, E. E. Concentration and translocation of nitrogen compounds in the corn plant (Zea mays) during granin development. *Plant Physiology* 28:606-621. 1953.
15. HEATH, O. E. y GREGORY, F. C. The constancy of the mean net assimilation rate and its ecological importance. *Annals of Botany* 2:311-318. 1938.
16. HEWITT, E. J. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. 2nd. ed. Bucks, England, Commonwealth Agricultural Bureaux, 1966. 547 p.
17. HOAGLAND, D. R. y ARNON, D. I. Physiological aspects of a availability of nutrients for plant growth. *Soil Science* 51:431-443. 1941.
18. INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS. Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola. Frijol (Phaseolus spp.) Ed. acum. Turrialba, Costa Rica, 1972. 299 p. (IICA Bibliografías no. 4).
19. JACKSON, J. E. Relationship of relative growth rate to net assimilation rate and its relevance to the physiological analysis of plant yield. *Nature (Londres)* 200 (4909):909. 1963.
20. JAIN, T. C. Effect of temperature on growth of Zea mays. *Bulletin de la Classe des Sciences (Bélgica)* 5a. serie. pp. 745-772. 1968.
21. JONES, R. G. W. y LUNT, O. R. The function of calcium in plants. *Botanical Review* 33:407-426. 1967.
22. LASTUVKA, Z. y MINAR, J. The relation between nutrient solution concentration and growth and ion absorption of peas (Pisum sativum) II. Accumulation, distribution and utilization of Nitrogen, Phosphorus and Potassium. *Plant & Soil* 32:412-423. 1970.
23. LOAYZA TORRES, J. M. Respuesta de tres variedades de frijol (Phaseolus vulgaris L.) a tres tensiones osmóticas en soluciones nutritivas. Tesis M. S. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 75 p.
24. LOOMIS, R. S y WILLIAMS, W. A. Maximum crop productivity: and estimate. *Crop Science* 3:67. 1963.
25. MAGALHAES, A. C. y MONTOJOS, J. C. Effect of solar radiation on the growth parameters and yield of two varieties of common beans (Phaseolus vulgaris L.). *Turrialba* 21(2):165-168. 1971.

26. MASAYA SANCHEZ, P. Estudio de la absorción de nutrimentos y crecimiento de raíces en la planta de frijol. Tesis M. S. Turrialba, Costa Rica, IICA-CTEI, 1971.
27. MONTOJOS, J. C. y MAGALHAES, A. C. Growth analysis of dry beans (Phaseolus vulgaris L. var 'Pintado') under varying conditions of solar radiation and nitrogen application. *Plant and Soil* 35(1):217-223. 1971.
28. MULLER, L. Un aparato micro-kjeldhal simple para análisis rutinarios rápidos de materiales vegetales. *Turrialba* 11(1):17-25. 1961.
29. NICIPOROVIC, A. Photosynthesis and the theory of obtaining high crop yields. *Field Crop Abstracts (Londres)* 13(3):169-175. 1960.
30. PARKER, F. W. y PIERRE, W. H. The relation between the concentration of mineral elements in a culture medium and the absorption and utilization of those elements by plants. *Soil Science* 25:337-343. 1928.
31. RADFORD, P. J. Growth analysis formulae. Their use and abuse. *Crop Science* 7(3):171-175. 1967.
32. RICHARDS, F. J. Physiological studies in plant nutrition III. Further studies on the effect of potash deficiency on the rate of respiration in leaves of barley. *Annals of Botany* 46:367-388. 1932.
33. SCHWABE, W. Physiological studies in plant nutrition. XVI. The mineral nutrition of brachen. Part I. Prothallial culture and the effects of phosphorus and potassium supply on leaf production in the sporophyte. *Annals of Botany* 15:417-446- 1951.
34. SHEAR, C. B., GRANE, H. L. y MYERS, A. T. Nutrient element balance: a fundamental concept in plant nutrition. *Proceedings of the American Society of Horticultural Science*. 47:239-248. 1946.
35. STEENBJERG, F. Manuring, plant production and the chemical composition of plants. *Plant & Soil* 5:226-242. 1954.
36. WALLACE, D. H. y MUNGER, H. M. Studies of the physiological basis for yield differences. I. Growth analysis of six dry bean varieties. *Crop Science* 5:343-348. 1965.

37. WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in the net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany N. S.* 11:41-76. 1947.
38. _____. The physiological bases of variation in yield. *Advances in Agronomy* 4:101. 1952.
39. _____. Comparative physiological studies on the growth of field crops. II. The effect of varying nutrient supply on NAR and Leaf area. *Annals of Botany* 2:375-407. 1957.
40. WHITHEAD, F. H. y MYERSCOUGH, P. S. Growth analysis of plants The rate of mean relative growth rate and mean relative rate of leaf area increase. *New Phytologist* 5:314. 1962.
41. WILLIAMS, R. F. The physiology of plant growth with special reference to the concept of net assimilation rate. *Annals of Botany* 10(37): 40. 1946.
42. _____. Redistribution of mineral elements during development. *Annual Review of Plant Physiology* 6:25-42. 1955.